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 ПО ГРУППАМ НАУЧНЫХ СПЕЦИАЛЬНОСТЕЙ: 01.02.01 — Теоретическая механика, 01.02.04 — Механика деформируемого твердого тела, 01.02.06 — Динамика, прочность машин, приборов и аппаратуры, 05.02.02 — Машиноведение системы приводов и детали машин, 05.02.04 — Трение и износ в машинах, 05.02.05 — Роботы, мехатроника и робототехнические системы, 05.02.07 — Технология и оборудование механической и физико-технической обработки, 05.02.10 — Сварка, родственные процессы и технологии, 05.02.11 — Методы контроля и диагностика в машиностроении, 05.02.13 — Машины, агрегаты и процессы, 05.02.18 — Теория механизмов и машин, 05.04.11 — Атомное реакторостроение, машины, агрегаты и технология материалов атомной промышленности

2019 Том 20 / 8 (229)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологическая оснастка для сборки

Дубовик Е.А. Приспособление для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320 339

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Шишкарев М.П. Выбор оптимальной точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт 342

Соединение деталей машин

Розинов А.Я. Физические и технико-экономические особенности процесса сборки монтажных соединений балок набора металлоконструкций 349

Трение и смазка в машинах и механизмах

Панин С.В., Корниенко Л.А., Хуан Цитао, Буслович Д.Г., Алексенко В.О. Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным силансодержащими модификаторами (часть 1) 354

Петров А.Н., Таусенев Д.С., Мизера С.В., Петров М.А. Гранулометрический анализ коллоидного графита, применяемого для смазочных материалов в процессах горячей обработки металлов давлением 361

Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Шехтман С.Р. Повышение износостойкости "дуплексных" покрытий для режущего инструмента путем ионного смешивания 366

В помощь конструктору, технологу

Рапилбекова Н.С. О распространении тепла при несовершенном теплообмене в сечении двухмерной среды 370

Подготовка специалистов

Буяновский И.А., Самусенко В.Д. Граничная смазка как защита трибосопряжения от износа и заедания при жестком режиме работы 379

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96

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

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

Б.Н. МАРЬИН, д.т.н.
А.М. ШПИЛЕВ, д.т.н., проф.

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

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", 2019

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 BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.01 — Theoretical mechanics, 01.02.04 — Mechanics of a deformable solid, 01.02.06 — Dynamics, durability of machines, devices and apparatus, 05.02.02 — Machine science of drive systems and machine parts, 05.02.04 — Friction and wear in machines, 05.02.05 — Robots, mechatronics and robotic systems, 05.02.07 — Technology and equipment for mechanical, physical and technical processing, 05.02.10 — Welding, related processes and technologies, 05.02.11 — Control methods and diagnostics in mechanical engineering, 05.02.13 — Machines, units and processes, 05.02.18 — Theory of mechanisms and machines, 05.04.11 — Nuclear reactor construction of machine, units and technology of the nuclear industry materials

2019 Vol. 20 **8 (229)**

CONTENTS

Technological equipment for assembly

Dubovik E.A. Fixture for disassembly of the generator of the truck KamAZ-5320 339

Quality assurance. Testing. Monitoring

Shishkarev M.P. The choice of the optimal precision operation the adaptive friction clutches 342

Connection of mashines parts

Rozinov A.Ya. Physical and technical-economic features of the assembly process mounting joints of beams of a set of metal structures 349

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Panin S.V., Kornienko L.A., Huang Qitao, Buslovich D.G., Aleksenko V.O. Mechanical and tribological properties of UHMW-PE composites with chopped glass fibers functionalized with polyorganosiloxane reagents (part 1) 354

Petrov A.N., Tausenev D.S., Mizera S.V., Petrov M.A. Granule analyzing onto colloidal graphite for hot deformation lubricants 361

Migranov M.Sh., Migranov A.M., Shekhtman S.R. Improvement of wear resistance of "duplex" coatings for cutting tools by ion mixing 366

Industrial and design engineer's aid

Rapilbekova N.S. The heat propagation at imperfect heat exchange in crossection of two-dimensional medium 370

Preparation of experts

Buyanovskii I.A., Samusenko V.D. Boundary lubricantion as protection for tribocoupling against wear and scuffing at hard work 379

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

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

Editors

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

Regional editors

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
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

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", 2019

УДК 656.13:05.22.10

Е.А. Дубовик
(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: dubovik1982@list.ru

Приспособление для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320

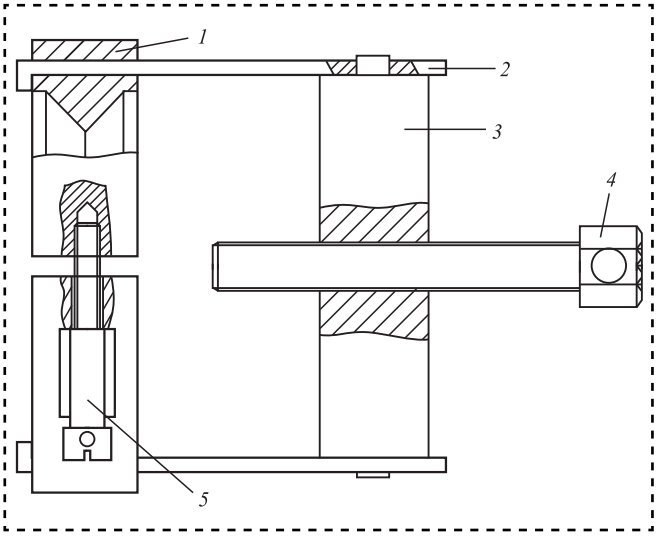
Предложен кинематический и силовой расчет съемного приспособления для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320.

The paper proposes a kinematic and power calculation of the removable device for disassembly of the truck generator KamAZ-5320.

Ключевые слова: генератор, достаточность, разборка, съемник, приспособление.

Keywords: generator, sufficiency, disassembly, puller, device.

Шкив генератора рекомендуется снимать специальным съемником, иначе можно повредить его или другие детали генератора (например, крышку, шкив, подшипник). Съемник шкивов генератора оригинальной конструкции имеет съемные захваты полукольца, что позволяет использовать его для различных генераторов, в частности для генераторов автомобиля КамАЗ-5320 (рисунок). Данное приспособление позволяет быстро и качественно снять шкив, при этом затрачивается минимум усилий и повышается производительность труда. При использовании съемника можно получить экономический эффект за счет снижения затрат труда, исключения выхода из строя деталей, изготовления его на собственном предприятии.



Съемник шкива генератора:
1 — захват; *2* — тяга; *3* — траверса; *4* — винт; *5* — винт захвата

Используют приспособление следующим образом. Тяги *2* вставляют в пазы захватов *1* и устанавливают их на шкив. Винтами *5* стягивают захваты на шкиве, при этом тяги *2* должны быть надеты на оси траверсы *3*. После того как захваты *1* будут стянуты полностью, вращением винта съемник подводят к валу генератора. Съемник вначале упрется в вал генератора, а затем начнет стягивать шкив с вала. Вращать винт необходимо до тех пор, пока шкив полностью не сойдет с вала генератора. Шпонку необходимо снять с вала, так как она будет мешать при разборке генератора.

Кинематический и силовой расчет винта с метрической резьбой

Материал деталей — сталь 45; допустимое напряжение [σ], Н/мм^2; усилие рабочего, прилагаемое к рукоятке $P_р$, Н; длина рукоятки $L_р$, мм; параметры резьбы — наружный

диаметр d, мм; внутренний d_1, мм; средний d_2, мм; шаг резьбы S, мм.

Определим момент, приложенный к рукоятке M', Н·мм:

$$M' = P_{\text{р}} L_{\text{р}}.$$

Найдем приведенный угол трения ρ', °:

$$\rho' = \operatorname{arctg}\left(\frac{f'}{\cos(\alpha/2)}\right),$$

где f — коэффициент трения скольжения между витками резьбы;

α — угол при вершине витка резьбы, °.

Вычислим угол подъема винтовой линии λ, °:

$$\lambda = \operatorname{arctg}(S/\pi d_2),$$

где d_2 — средний диаметр резьбы винта, мм.

Рассчитаем силу, действующую вдоль оси винта, Q, Н:

$$Q = \frac{M'}{0,5 d_2 \operatorname{tg}(\lambda + p')} + f\frac{D_{\text{о}}^3 - d_{\text{о}}^3}{3\left(D_{\text{о}}^2 - d_{\text{о}}^2\right)},$$

где f — коэффициент трения между опорной поверхностью винта и деталью;

$D_{\text{о}}$ — внешний диаметр опорной поверхности винта, мм;

$d_{\text{о}}$ — внутренний диаметр опорной поверхности винта, мм.

Получаем момент сил трения в резьбе $M_{\text{рез}}$, Н·мм, и на опорной поверхности $M_{\text{оп}}$, Н·мм:

$$M_{\text{рез}} = Q\frac{d_2}{2}\operatorname{tg}(\lambda + \rho');$$

$$M_{\text{оп}} = Qf\frac{D_{\text{о}}^3 - d_{\text{о}}^3}{3\left(D_{\text{о}}^2 - d_{\text{о}}^2\right)}.$$

По условию равновесия момент, приложенный к рукоятке, равен сумме моментов сил трения в резьбе и на опорной поверхности:

$$M' = M_{\text{рез}} + M_{\text{оп}}.$$

Если условия равновесия соблюдены, значит расчеты сделаны правильно.

Проверочный расчет винта на прочность

Рассчитываем нормальные напряжения сжатия σ, Н/мм^2, и касательные напряжения τ, Н/мм^2:

$$\sigma = \frac{4Q}{\pi d_1^2};$$

$$\tau = \frac{M_{\text{оп}}}{0,2 d_1^3},$$

где d_1 — внутренний диаметр резьбы винта, мм.

Определяем эквивалентные напряжения в винте $\sigma_{\text{экв}}$, Н/мм^2:

$$\sigma_{\text{экв}} = \sqrt{\sigma^2 + 4 + \tau^2}.$$

Для винтов, изготовленных из стали 45, допускаемое напряжение $[\sigma]$ = 90 Н/мм^2. Согласно расчетам $\sigma_{\text{экв}} < [\sigma]$, следовательно, марка стали и диаметр винта выбраны правильно.

Расчет тяг на прочность

Рассчитываем тяги на внецентренное растяжение σ, Н/мм^2:

$$\sigma = \frac{Q}{2F} + \frac{Q}{2W}e,$$

где F — площадь поперечного сечения тяги, мм^2;

e — эксцентриситет, мм;

W — момент сопротивления сечения изгибу, мм^3, $W = bh^2/6$;

b — ширина тяги, мм;

h — толщина тяги, мм.

Если полученное максимальное напряжение в тягах σ меньше, чем допустимое для стали 45 ($[\sigma]$ = 90 Н/мм^2), выбор материала и размеров деталей сделан правильно.

Расчет на прочность рукоятки [1]

Найдем напряжение изгиба в сечениях рукоятки σ, Н/мм^2:

$$\sigma = \frac{M_{\text{и}}}{W},$$

где $M_и$ — изгибающий момент в опасном сечении, Н·мм, $M_и = \frac{P_р\left(L_р - D\right)}{2}$;

D — диаметр винта в месте, где проходит рукоятка, мм;

W — момент сопротивления сечения изгибу, мм^3, $W = 0{,}1d^3$;

d — диаметр рукоятки.

Если полученное максимальное напряжение изгиба в сечениях рукоятки меньше, чем допустимое для стали 45 ($[\sigma]$ = 90 Н/мм^2), выбор материала и размеров детали сделан правильно.

Расчет оси захватывающей тяги на срез и на смятие [1]

Вычисляем расчетное напряжение среза $\tau_{ср}$, Н/мм^2:

$$\tau = \frac{Q}{\pi d_3^2},$$

где d_3 — диаметр оси тяги, мм.

Полученное напряжение среза не должно превышать допустимое $[\tau] = (0{,}5...0{,}6)[\sigma]$, Н/мм^2.

Проводим проверочный расчет данного сечения на смятие $\sigma_{см}$, Н/мм^2:

$$\sigma_{см} = \frac{Q}{2F_{см}},$$

где $F_{см}$ — площадь смятия, мм^2, $F_{см} = b_1 d_3$;

b_1 — ширина опорной поверхности тяги на оси, мм.

Полученное напряжение смятия не превышает допустимое $[\sigma]_{см} = (2...2{,}2)[\sigma]$, Н/мм^2.

Целесообразность использования данного приспособления для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320 оценим с помощью интегрального показателя достаточности — линейной комбинации оценок по отдельным критериям с вектором коэффициентов [2, 3]:

$$Z_i = \sum_{j=1}^{m} b_i \beta_i\left(x_{ij}\right),$$

где β_i — характеристическая функция "ценности" для j-го критерия.

Алгоритм поиска интегрального показателя достаточности реализован на ЭВМ ЕС-1841 в виде экспертной программы "Выбор". С помощью данного программного продукта проводят многофакторную оценку рейтингового выбора множества разнообразных вариантов приспособлений для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320. Программный продукт "Выбор" используют для анализа качества и количества факторов проверки качества приспособления для разборки генератора грузового автомобиля КамАЗ-5320.

Библиографический список

1. **Андросов А.А., Спиченков В.В., Андрющенко Ю.Е.** Основы конструирования машин: учеб. пособие, Ростов-н/Д.: ДГТУ, 1993. 152 с.

2. **Заде Л.А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенного решения. М.: Мир, 1976. 165 с.

3. **Авен П.О.** Построение интегрального показателя в критериальном пространстве // Автоматика и Телемеханика. 1985. № 4. С. 87—91.

УДК 621.838.222

М.П. Шишкарев,
д-р техн. наук (Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: shishkarevm@mail.ru

Выбор оптимальной точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт

Показано, что повышение точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт приводит к уменьшению габаритных размеров и массы привода и увеличению собственной массы муфты. Минимизация общей массы привода, включая муфту, основана на оптимизации точности срабатывания при определенном соотношении массы привода и муфты. Установлено, что минимальная общая масса привода машины зависит от состава привода, первоначальной массы муфты, скорости изменения ее массы и точности срабатывания в зависимости от коэффициента усиления.

It is shown that the increase in the accuracy of the adaptive friction clutches leads to a decrease in the overall dimensions and weight of the drive and an increase in the self-mass of the clutch. Minimizing the total weight of the drive, including the clutch, is based on optimizing the actuation accuracy at a certain ratio of the drive and clutch weight. It is established that the minimum total weight of the machine drive depends on the composition of the drive, the initial mass of the clutch, the rate of change in its mass and the accuracy of operation, depending on the magnitude of the gain.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, точность срабатывания, масса, привод машины, коэффициент усиления, поколение.

Keywords: adaptive friction clutch, accuracy of operation, weight, machine drive, gain, generation.

Введение

Одна из основных особенностей адаптивных фрикционных муфт (АФМ) различных типов — возможность варьирования точности срабатывания [1, 2]. Это достигается изменением коэффициента усиления (КУ) обратной связи за счет варьирования угла давления отжимных (распорных) элементов [3, 4].

В некоторых типах АФМ последнего поколения возможность варьирования точности срабатывания обеспечивается выбором соответствующей формы кривой нагрузочной характеристики (зависимости вращающего момента АФМ от коэффициента трения) [5—7].

Увеличение КУ обратной связи приводит к повышению точности срабатывания АФМ, которое характеризуется большей стабильностью вращающего момента при изменении коэффициента трения [8].

Одновременно с повышением точности срабатывания АФМ при увеличении КУ возрастает распорная сила управляющего устройства (УУ), что приводит к уменьшению вращающего момента муфты. Для сохранения требуемого вращающего момента АФМ необходимо:

увеличить радиальные размеры пар трения фрикционной группы или увеличить число пар трения или повысить силу натяжения замыкающих силовых упругих элементов нажимного узла АФМ.

Использование любого из перечисленных способов приводит к увеличению массы АФМ, причем масса увеличивается практически пропорционально увеличению любого из перечисленных параметров [9].

Таким образом, стремление к уменьшению действующих в приводе машины перегрузок за счет повышения точности срабатывания АФМ посредством увеличения КУ обратной связи

приводит к увеличению массы муфты, которое должно быть, по меньшей мере, компенсировано уменьшением общей массы узлов и деталей привода, защищаемых муфтой [10].

Цель работы — оценка возможности минимизации общей массы привода машины, включая АФМ, путем варьирования точности срабатывания ее за счет изменения КУ обратной связи.

Рассматривали АФМ первого поколения, оснащенные одноконтурной отрицательной обратной связью [11], а также АФМ других типов.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Теоретические предпосылки оптимизации массогабаритных показателей приводов машин:

— уменьшение действующих в приводе перегрузок при увеличении точности срабатывания АФМ и, как следствие, — возможность уменьшения габаритных размеров (площади поперечного сечения и длины) деталей привода при условии сохранения необходимого запаса их прочности;

— установление закономерности увеличения массы АФМ в результате повышения точности ее срабатывания;

— установление закономерности изменения общей массы привода, включая АФМ, при изменении точности ее срабатывания.

Если при уменьшении действующих в приводе перегрузок (речь идет о защищаемой части привода, расположенной между приводным двигателем и АФМ) сохранить неизменными размеры узлов и деталей, то они будут работать с увеличенным запасом прочности. Согласно схеме на рис. 1 имеем:

$$n_1 = \frac{\sigma_в}{\sigma_1};$$

$$n_2 = \frac{\sigma_в}{\sigma_2},$$

где n_1, n_2 — коэффициент запаса прочности, принимаемый при расчетах деталей с учетом прогнозируемых максимальных нагрузок, и коэффициент запаса прочности с учетом действующих нагрузок, ограничиваемых АФМ с более высокой точностью срабатывания соответственно;

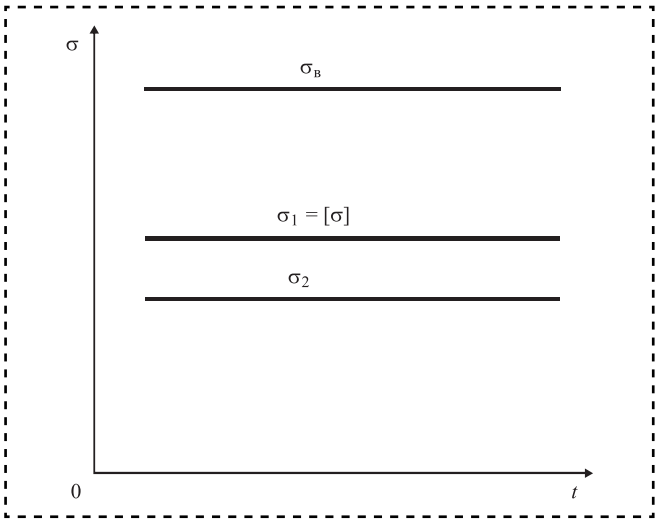


Рис. 1. Схема механических напряжений в деталях привода машины:
t — время

$\sigma_в$ — предел прочности материала деталей привода;

σ_1, σ_2 — действующее напряжение в сечениях деталей привода при расчетах по прогнозируемым нагрузкам, и напряжение, действующее с учетом нагрузок при установке АФМ с более высокой точностью срабатывания соответственно.

Если принять

$$\sigma_1 = [\sigma],$$

где $[\sigma]$ — допускаемое напряжение, принимаемое при расчетах деталей привода [12], то при использовании в приводе АФМ с более высокой точностью срабатывания, обеспечивающей меньшие нагрузки, будет выполняться неравенство

$$\sigma_2 < [\sigma]$$

при условии, что $[\sigma]$ = const для одного и того же материала.

Следовательно, в данном случае уменьшение действующих нагрузок от T_{max1} (при использовании предохранительной фрикционной муфты, обладающей более низкой точностью срабатывания) до T_{max2} (в приводе с АФМ, имеющей более высокую точность срабатывания) приводит к необходимости увеличения коэффициента запаса прочности n_2. Это представляется нерациональным, поскольку материал деталей работает с меньшими механическими напряжениями, и физико-механические свойства его используются недостаточно полно.

В связи с этим следует привести в соответствие с допускаемыми напряжениями [σ] напряжения, действующие в деталях привода, т.е. уменьшить поперечные сечения деталей и их линейные размеры, снизив, тем самым, массу деталей.

Увеличение КУ обратной связи АФМ, которое приводит к повышению точности срабатывания, требует соответствующего увеличения массы муфты. При этом увеличение КУ непропорционально повышению точности срабатывания муфты, которая выражается коэффициентом точности [9, 12].

Коэффициент точности характеризует кратность изменения предельного вращающего момента муфты относительно его настроечной величины, в качестве которой принимают вращающий момент, вычисляемый при минимальном значении коэффициента трения [13].

Кривая *1* на рис. 2 отражает график зависимости $K_т(C)$ (где $K_т$ — коэффициент точности АФМ, C — КУ обратной связи). В данном случае прямая *2* построена в координатных осях "C—C" для того, чтобы показать, что значение коэффициента точности изменяется нелинейно при линейном изменении C.

Естественно, что в указанных прямоугольных координатных осях это будет прямая *2*, которая является биссектрисой угла, образованного координатными осями.

При линейном характере изменения КУ (прямая *2*) и, соответственно, приблизительно линейном изменении массы АФМ точность срабатывания ее изменяется нелинейно (кривая *1*).

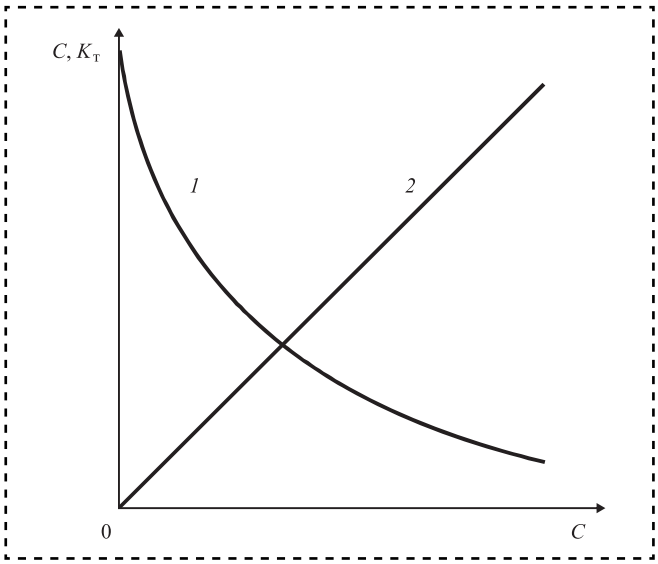


Рис. 2. Зависимости коэффициента точности от КУ и изменения величины КУ

Масса элементов привода, защищаемых АФМ, изменяется приблизительно по линейному закону в зависимости от коэффициента точности муфты [14].

Кривая *1* на рис. 3 отражает зависимость $M_1(K_т)$, прямая *2* — $M_2(C)$ (где M_1, M_2 — совокупная масса защищаемой АФМ части привода машины и масса муфты соответственно).

Форма кривой *1* на рис. 3 учитывает характер зависимости $K_т(C)$ на рис. 2 (кривая *1*).

Графики на рис. 3 показывают следующее:

— совокупная масса элементов, составляющих защищаемую часть привода, уменьшается нелинейно при увеличении КУ, т.е. при уменьшении коэффициента точности АФМ. Уменьшение массы M_1 замедляется по мере увеличения КУ и уменьшения коэффициента точности (в данном случае $K_т$ рассматривается как функция C);

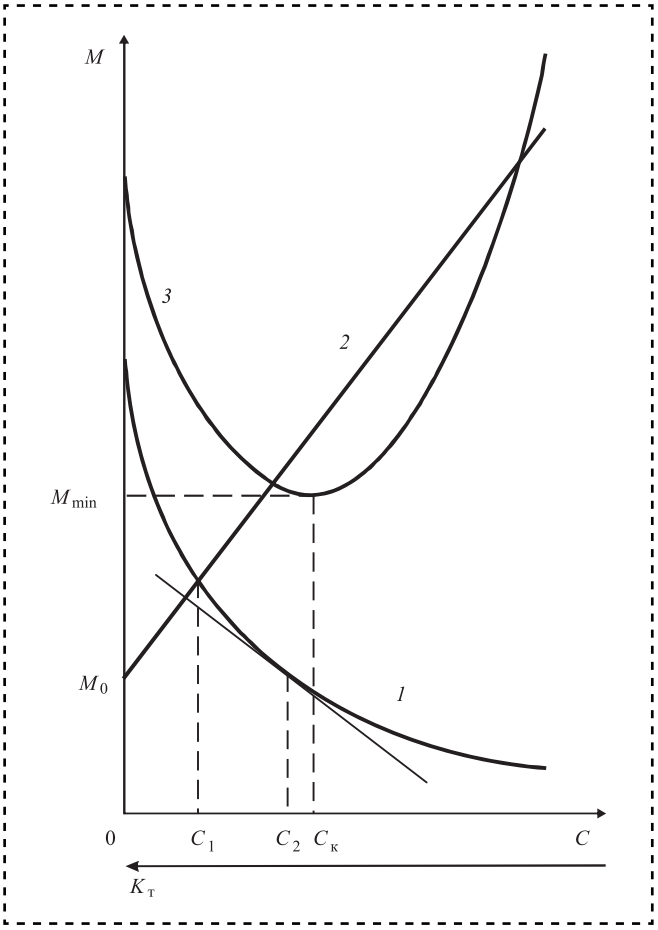


Рис. 3. Зависимости общей массы элементов защищаемой части привода и массы АФМ от КУ и коэффициента точности

— масса АФМ в данных условиях возрастает пропорционально КУ и при определенной его величине (значение C_1, соответствующее общей точке кривой *1* и прямой *2*) становится больше, чем масса M_1;

— при определенном КУ угол наклона прямой *2* становится больше угла наклона касательной к кривой *1*, что свидетельствует о дальнейшем опережении увеличения массы АФМ уменьшения совокупной массы элементов защищаемой части привода машины (значение C_2).

Рассмотренные зависимости подтверждают, что при определенном КУ общая масса привода, включая АФМ, начинает увеличиваться, несмотря на то, что точность срабатывания муфты повышается.

Угол наклона прямой *2* к оси абсцисс определяет скорость изменения массы АФМ в результате варьирования величины КУ. Скорость изменения массы АФМ зависит от типа муфты и определяется ее конструктивной сложностью [15].

При сходной закономерности изменения общей массы привода, включая АФМ, для муфт различных типов КУ, соответствующий общей точке кривой *1* и прямой *2*, а также критическая величина КУ, при превышении которой происходит увеличение общей массы привода, включая АФМ, будут различными.

На значения указанных КУ влияет первоначальная масса муфты (M_0 при $C = 0$, см. рис. 3). Это масса муфты, общая конструктивно-компоновочная схема которой идентична схеме АФМ без УУ обратной связи. Для передачи одинаковой номинальной нагрузки АФМ различных типов имеют различные конструктивно-компоновочные схемы, отличающиеся набором составляющих элементов, следовательно, и различные габаритные размеры и массу.

Как правило, АФМ, обладающие более высокой точностью срабатывания при одном и том же КУ, имеют повышенные габаритные размеры и первоначальную массу [13]. Характер влияния КУ на точность срабатывания АФМ различных типов неодинаков, поэтому для анализа влияния точности срабатывания их на общую массу привода необходимо учитывать указанные обстоятельства.

В результате изменения точности срабатывания АФМ за счет варьирования КУ можно создать условия для минимизации общей массы привода, включая АФМ, которая соответствует определенной точности срабатывания муфты. Причем, как показывает кривая *3* на рис. 3, минимальная общая масса привода $M_{\min}$ не соответствует максимальной точности срабатывания АФМ (кривая *1*).

С точки зрения расчетов, проектирования, компоновки в приводе и эксплуатации АФМ выбор рациональных параметров АФМ обусловлен, прежде всего, обеспечением минимальной общей массы привода. При этом достигается не только экономия материалов, энергоемкости и минимизация габаритов привода, но и снижение динамических нагрузок, действующих в приводе в переходные периоды, и повышение показателей надежности узлов и элементов привода (работоспособности и долговечности).

Оценка эффективности влияния характеристик АФМ различных типов на общую массу привода

Угол наклона прямой $M(C)$ к оси абсцисс (см. рис. 3) характеризует скорость изменения массы АФМ в зависимости от КУ и зависит от типа муфты. Тип АФМ характеризуется конструктивно-компоновочной схемой муфты и ее конструктивной сложностью.

АФМ первого поколения. В зависимости от компоновочной схемы фрикционной группы (с дифференцированными парами трения или со всеми ведущими парами трения) и числа пар трения достигаемый на практике коэффициент точности АФМ данного типа колеблется в пределах $K_т$ = 2,5...4,0 при рассеивании коэффициента трения в интервале 0,1...0,8 [16].

АФМ первого поколения наиболее простые в конструктивном отношении и обладают наименьшей нагрузочной способностью, по сравнению с муфтами других типов, при одинаковых конструктивных параметрах.

При равной, по отношению к АФМ других типов, нагрузочной способности эти муфты, несмотря на конструктивную простоту, имеют приблизительно ту же первоначальную массу M_0 (см. рис. 3), что и АФМ других типов.

При увеличении КУ точность срабатывания АФМ первого поколения повышается медленнее, чем у АФМ других типов, поэтому при указанной выше зависимости массы муфт от КУ точка минимума кривой *3* (см. рис. 3) будет

смещаться влево сильнее, чем у АФМ других типов.

Это означает, что для обеспечения минимальной общей массы привода, включая АФМ, необходим меньший КУ. В этом случае соответствующая точность срабатывания АФМ будет относительно невелика, что свидетельствует о достаточно большой минимальной общей массе привода, включая АФМ.

Следовательно, АФМ первого поколения обеспечивают относительную минимизацию общей массы привода, однако применение этих муфт не приводит к существенному уменьшению массы.

АФМ второго поколения. Эти муфты характеризуются более сложной конструкцией вследствие того, что они построены на основе двухконтурной отрицательной или смешанной (комбинированной) обратной связи, требующей две фрикционные группы и, как правило, два УУ [17]. При одинаковых параметрах УУ муфты данного типа обладают более высокой точностью срабатывания, а при одинаковых параметрах фрикционной группы и нажимного узла — меньшей, по сравнению с АФМ первого поколения, нагрузочной способностью, за исключением базового варианта [18].

Первоначальная масса АФМ второго поколения (базовый вариант) при одинаковой нагрузочной способности будет меньше, чем у АФМ первого поколения, а точность срабатывания повышается быстрее при увеличении КУ до определенной предельной величины [18].

Если минимальная общая масса привода достигается при КУ, меньшем или равном предельной величине, то соответствующий КУ будет меньше, чем у АФМ первого поколения. При этом минимальная общая масса привода также будет меньше.

Наоборот, первоначальная масса АФМ второго поколения (модифицированный вариант) при указанных условиях больше, чем у АФМ первого поколения, поскольку нагрузочная способность первой муфты ниже [19], а конструкция сложнее из-за наличия УУ второго контура отрицательной обратной связи.

Особенность АФМ данного типа — увеличение точности срабатывания при росте КУ до определенной критической величины $C_к$, затем уменьшение точности срабатывания при дальнейшем увеличении КУ.

Точность срабатывания АФМ второго поколения (модифицированный вариант) при критической величине КУ значительно превышает точность срабатывания АФМ других типов [19] и близка к точности срабатывания "идеальной" АФМ ($K_т$ = 1). При этом масса АФМ увеличивается приблизительно пропорционально КУ, а точность срабатывания повышается быстрее, чем у АФМ первого поколения и у АФМ второго поколения (базовый вариант).

Минимальная общая масса привода будет соответствовать $C_к$, который превышает соответствующие КУ АФМ первого поколения и у АФМ второго поколения (базовый вариант), при этом может быть достигнута абсолютная минимальная общая масса привода, включая АФМ.

Следовательно, АФМ второго поколения (базовый и модифицированный варианты) обеспечивают значительное уменьшение общей массы привода, чем АФМ первого поколения, за счет более высокой точности срабатывания АФМ.

АФМ третьего поколения. Для данного типа АФМ характерно наличие либо комбинированной — положительно-отрицательной, либо положительной обратной связи [20]. Эти муфты отличаются более высокой нагрузочной способностью по сравнению с АФМ других типов.

Что касается точности срабатывания, то для большинства конструктивных разновидностей АФМ данного типа она выше, чем у АФМ первого поколения и у АФМ второго поколения (базовый вариант), приблизительно в 1,4...1,6 раза (по коэффициенту точности).

Первоначальная масса АФМ третьего поколения зависит от конструктивного способа реализации УУ обратной связи. Например, конструкция УУ АФМ с V-образными упругими лепестковыми элементами, которые, в зависимости от их конструктивного исполнения, могут реализовать положительно-отрицательную или положительную обратную связь, сходна с конструкцией АФМ первого поколения [21].

Первоначальная масса АФМ такого конструктивного исполнения будет меньше, чем масса АФМ первого поколения, приблизительно в 1,6 раза. Это объясняется тем, что примерно в 1,6 раза меньше сила замыкания пар трения фрикционной группы, создаваемая нажимной пружиной, что и обеспечивает меньшую массу муфт.

В рассматриваемых муфтах КУ не постоянен в процессе эксплуатации: в режиме действия положительной обратной связи он уменьшается по мере увеличения коэффициента трения, в режиме действия отрицательной обратной связи — увеличивается.

Конструктивное изменение КУ возможно в АФМ данного типа за счет изменения геометрических параметров V-образных упругих лепестковых элементов или их числа.

Как и в АФМ первого поколения, увеличение КУ в АФМ с V-образными упругими лепестковыми элементами приводит к повышению точности срабатывания муфт, главным образом, за счет улучшения действия отрицательной обратной связи.

При меньшей первоначальной массе АФМ третьего поколения и более высокой, чем у АФМ первого поколения, точности срабатывания муфты данного типа обеспечивают достижение меньшей общей массы привода. Однако, поскольку точность срабатывания АФМ второго поколения (модифицированный вариант) выше, чем у АФМ третьего поколения, минимальная общая масса привода, достигаемая с использованием последних, все же больше.

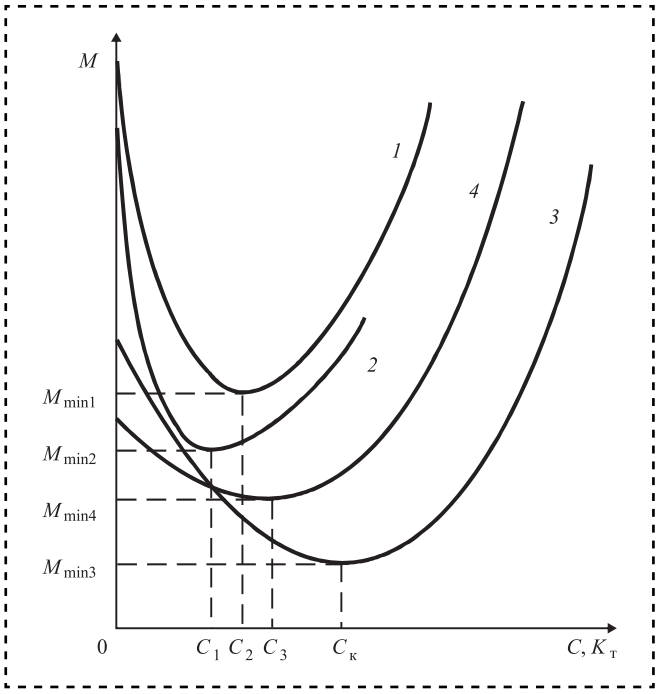


Рис. 4. Зависимости общей массы привода от КУ для различных типов АФМ:

M_{min1}, ..., M_{min4} — минимальные общие массы привода; C_1, ..., C_3 — КУ для кривых *2*, *1*, *4* соответственно; $C_к$ — КУ для АФМ второго поколения (модифицированный вариант)

Кривая *1* на рис. 4 отображает график зависимости общей массы привода машины, включая АФМ, от КУ для АФМ первого поколения, кривая *2* — график аналогичной зависимости для АФМ второго поколения (базовый вариант), кривая *3* — для АФМ второго поколения (модифицированный вариант), кривая *4* — для АФМ третьего поколения с V-образными упругими лепестковыми элементами.

Для каждого типа АФМ существует оптимальный КУ, при котором обеспечиваются рациональные параметры привода машины, в составе которого работает муфта. Это свидетельствует о том, что для наиболее эффективного использования АФМ следует при расчетах и проектировании учитывать параметры привода и использовать эти параметры при определении оптимальных технических характеристик муфты.

Результаты исследования могут быть использованы для разработки методики оптимизации эксплуатационных параметров привода в рамках расчетов и проектирования АФМ различных типов.

Выводы

1. Благодаря более высокой точности срабатывания АФМ и ее варьирования появляется возможность уменьшения нагрузок, действующих в приводе машины.

2. Повышение точности срабатывания АФМ приводит к уменьшению габаритов и массы привода и одновременно с этим к увеличению собственной массы муфты. Минимизация общей массы привода, включая АФМ, основана на оптимизации точности срабатывания при определенном соотношении массы привода и муфты. Обеспечение минимума общей массы привода машины, включая АФМ, основано на линейном характере изменения массы АФМ и на нелинейном характере изменения массы привода при варьировании КУ, исключая АФМ.

Минимальная общая масса привода машины зависит от состава привода, первоначальной массы АФМ, интенсивности изменения массы муфты и точности срабатывания ее в зависимости от изменения КУ.

3. Минимальная общая масса привода машины не соответствует максимальной точности срабатывания АФМ, кроме АФМ второго поколения (модифицированной). Наиболь-

ший эффект при минимизации общей массы привода машины, включая АФМ, достигается при использовании АФМ второго поколения (модифицированной), наименьший эффект — при использовании АФМ первого поколения (базовый вариант).

4. Для каждого типа АФМ существует оптимальный КУ, при котором для одного и того же варианта привода общая масса его, включая АФМ, минимальная.

5. Для наиболее эффективного применения АФМ для защиты привода от перегрузок необходимо учитывать параметры привода при определении оптимальных параметров муфты.

Библиографический список

1. **Шишкарев М.П.** Условие высокой точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Тракторы и сельхозмашины. 2011. № 7. С. 46—48.

2. **Шишкарев М.П.** Повышение надежности адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 4. С. 6—9.

3. **Шишкарев М.П.** Математические модели высокой надежности адаптивных фрикционных муфт / под общ. ред. В.С. Балакирева // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XVI Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 "Компьютерная поддержка производственных процессов". Ростов н/Д.: РГАСХМ ГОУ, 2003. С. 231—234.

4. **Шишкарев М.П.** Оптимизация величины коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2003. № 6. С. 30—31.

5. **Шишкарев М.П., Лущик А.А.** Эксплуатационные характеристики адаптивной фрикционной муфты второго поколения с раздельным силовым замыканием // Тракторы и сельхозмашины. 2013. № 3. С. 28—31.

6. **Шишкарев М.П., Угленко А.Ю.** Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 10. С. 3—6.

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

8. **Шишкарев М.П.** Математическая модель устойчивости движения привода с адаптивной фрикционной муфтой / под общ. ред. В.С. Балакирева // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XV Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 8. Секция 8 "Компьютерная поддержка технологических процессов и производственных систем". Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2002. С. 70—75.

9. **Шишкарев М.П.** Влияние величины коэффициента усиления на массу адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 2. С. 88—93.

10. **Шишкарев М.П.** Компоновочные решения приводов машин с адаптивными фрикционными муфтами // Вестник машиностроения. 2003. № 7. С. 7—12.

11. **Шишкарев М.П.** Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2005. № 12. С. 17—18.

12. **Шишкарев М.П.** Синтез и анализ адаптивной фрикционной муфты со смешанной структурой обратной связи // Вестник машиностроения. 2004. № 3. С. 3—8.

13. **Шишкарев М.П.** Оптимальный способ настройки предохранительных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 3. С. 16—19.

14. **Шишкарев М.П.** Влияние точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт на массу привода машины // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2008. № 3. С. 6—12.

15. **Шишкарев М.П.** Эволюционная классификация адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2009. № 11. С. 16—18.

16. **Шишкарев М.П.** Повышение надежности работы адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения // Известия ОрелГТУ. 2010. № 2-2/284. С. 73—77.

17. **Шишкарев М.П.** Теоретические основы применения двухконтурной отрицательной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестник машиностроения. 2005. № 8. С. 19—21.

18. **Шишкарев М.П.** Оптимизация компоновочного решения базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения // Вестник машиностроения. 2006. № 6. С. 7—10.

19. **Шишкарев М.П.** Математические модели адаптивного фрикционного контакта твердых тел 2-го поколения / под общ. ред. В.С. Балакирева // Математические методы в технике и технологиях: сб. тр. XVIII Междунар. науч. конф. В 10 т. Т. 5. Секция 5 "Компьютерная поддержка производственных процессов". Казань: Изд-во Казанского гос. технол. ун-та, 2005. С. 72—76.

20. **Шишкарев М.П.** Теоретические основы применения комбинированной обратной связи в адаптивных фрикционных муфтах // Вестник машиностроения. 2005. № 7. С. 16—19.

21. **Шишкарев М.П.** Точность срабатывания адаптивных фрикционных муфт 1-го поколения с дифференцированными парами трения (ч. 2) // Известия ОрелГТУ. 2008. № 3-2/271 (546). С. 67—71.

УДК 621.757.07

А.Я. Розинов, *д-р техн. наук*
Тел. 8 (812) 532-7742

Физические и технико-экономические особенности процесса сборки монтажных соединений балок набора металлоконструкций

Проанализирована технология выполнения операций сборки соединений обшивки и подкрепляющих ее балок набора. Рассмотрены схема приложения сборочных сил, обеспечивающих соединения балок набора, и особенности физики действия этих сил на основе положений теории изгиба и кручения балок-полосок и стержневых систем. Описана механика изгиба и кручения соединяемых балок набора с учетом влияния приварки этих балок к поверхности обшивок. Приведены результирующие расчетные выражения перемещений концов соединяемых балок набора под действием сборочных сил, а также результаты анализа технико-экономических показателей традиционной технологии сборки соединений балок набора металлоконструкций и способа изменения этой технологии путем механизации процесса стыкования балок набора.

The technology of performing operations for assembling the shell plating joints and the beams of the set supporting it is analyzed. The scheme of application of the Assembly forces providing connection of beams of a set, and features of physics of action of these forces on the basis of the basic provisions of the theory of a bend and torsion of beams-strips and rod systems is considered. The mechanics of bending and torsion of the connected beams of the set is described taking into account the influence of welding of these beams to the surface of the sheathing. The resulting calculated expressions for the displacements of the ends of the joining beams of the set under the action of the assembly forces are given, as well as the results of the analysis of the technical and economic indicators of the traditional assembly technology for the joints of the set of metal structures and the method of changing this technology by mechanizing the process of joining the beams of the set.

Ключевые слова: схема сил, упругое защемление, линии действия сил, поворот, перемещение, координаты, центр изгиба, цилиндрическая жесткость, момент инерции, чистое кручение, трудозатраты, материалоемкость, энергопотребление, технология, сборочное устройство.

Keywords: force diagrams, elastic clamping, lines of action force, rotation, movement, coordinates, center of the bend, cylindrical rigidity, moment of inertia, net torsion, labor costs, material consumption, power consumption, technology, assembly device.

Изготовление крупногабаритных металлоконструкций, в том числе постройка корпусов судов из блоков и секций, включает в себя сборку соединений листов обшивки и балок подкрепляющего их набора, имеющего профиль таврового, углового или полособульбового сечения. Блоки и секции изготавливают в сборочно-сварочных цехах и подают на место формирования из них крупногабаритных металлоконструкций. Несмотря на то, что сборку предварительно изготавливаемых блоков и секций осуществляют в соответствии с требованиями монтажных допусков при их установке на штатное место в составе формируемых крупногабаритных металлоконструкций, торцы стыкуемых балок профильного набора зачастую не совпадают друг с другом, что приводит к необходимости пригоночных работ, связанных с силовым сведением стыкуемых концов балок подкрепляющего набора, поэтому концы стыкуемых балок не приваривают к обшивке.

Особенности выполнения операций сборки соединений обшивки и подкрепляющих ее балок набора следующие:

— монтажные соединения балок подкрепляющего набора выполняют после того, как в месте расположения соединений балок будут полностью собраны соединения обшивки;

— сборку монтажных соединений каждой балки подкрепляющего набора проводят независимо друг от друга;

— силовое действие сборки соединений балок подкрепляющего набора прикладывают к свободным концам соединяемых друг с другом балок набора, которые (для увеличения податливости) не доваривают по стенке в месте их контакта с обшивкой;

— в процессе сборки монтажных соединений балок подкрепляющего набора концы этих балок ориентируют, сдвигая их по горизонтали и вертикали, а также поворачивая вокруг оси, параллельной линии приварки стенок балок к поверхности подкрепляемой ими обшивки.

Процесс сборки монтажных соединений балок подкрепляющего набора рассмотрим на примере схемы сборочных сил, обеспечивающих выполнение стыкования соединяемых балок таврового или углового поперечного сечения (рис. 1).

Один конец произвольно выделенной балки (со стороны выполняемого соединения) свободен на длине a, а другой конец и часть кромки стенки на протяжении l упруго защемлены с коэффициентом податливости G_1 и G_2 соответственно. При этом соединяемый свободный конец балки загружен различно ориентированными в пространстве поперечными сборочными силами P_1, P_2, P_3, обеспечивающими горизонтальное и вертикальное перемещение, а также поворот торца балки набора в плоскости стыка. При этом действие указанных сборочных сил характеризуется тем, что линия действия силы P_1 совпадает с осью симметрии поперечного сечения стенки профиля соединяемой балки. А линия действия сил P_2 совпадает с осью симметрии поперечного сечения пояска этой же балки. Линии действия сил P_1 и P_2 проходят через центр изгиба сечения соединяемых балок. Действие сил P_1 и P_2 при сборке монтажных соединений балок подкрепляющего набора способно привести только к изгибу концов балок, тогда как действие силы P_3 будет не только изгибать, но также скручивать соединяемый конец балки набора. Влияние силы P_3 можно заменить ее действием в центре изгиба, суммирующимся с действием силы P_2, а также крутящим моментом $M_{кр} = P_3 h_{ст}$.

В связи с тем, что рассматриваемая балка набора имеет участок стенки протяженностью a, свободный для перемещения и поворота, а также участок стенки длиной l, приваренный к обшивке, затрудняющий перемещение и поворот балки, однозначную оценку величины перемещений концов соединяемых балок под действием указанных на рис. 1 сил невозможно.

Перемещения концов балок при сборке их монтажных соединений под действием данной системы сил определяют путем расчленения рассматриваемой балки на две отдельные части, включающие приваренный участок

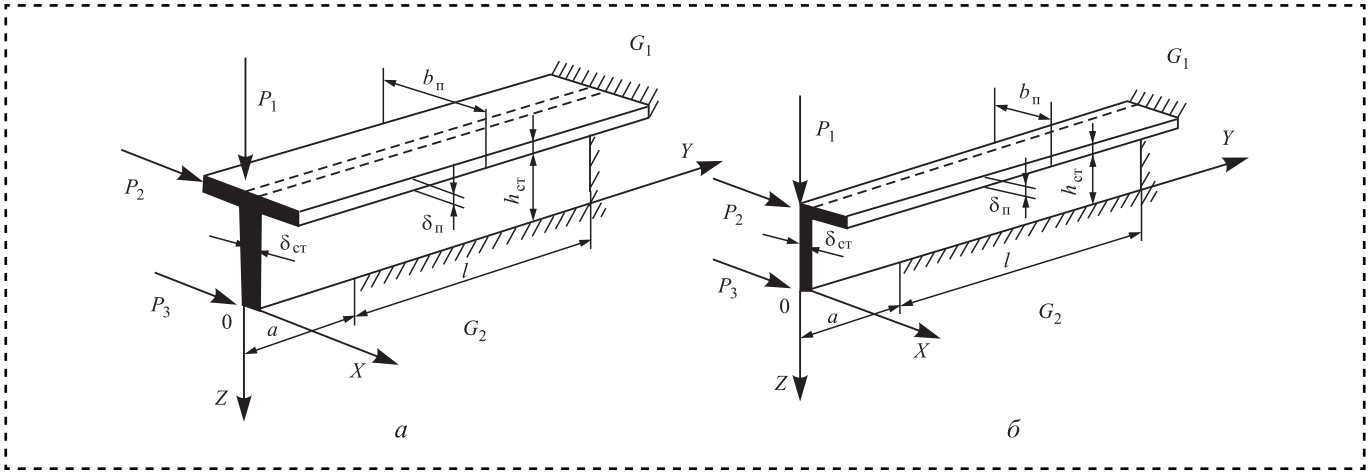


Рис. 1. Схемы приложения сборочных сил для выполнения монтажных соединений балок подкрепляющего набора: *а* — тавровое сечение; *б* — угловое сечение

протяженностью l и неприваренный конец протяженностью a. Отделение участка протяженностью a позволяет перенести начало координат в торец оставшегося приваренного участка протяженностью l и, чтобы не нарушалась система силового действия, позволяет вместе с началом координат перенести силы P_1; $P_2 + P_3$ и момент $M_{кр}$. Тогда в торце приваренной к обшивке части балки будут действовать следующие силы и моменты $M_{кр}$; $M_1 = P_1a$; $M_2 = (P_2 + P_3)a$.

Действие $M_{кр} = P_3h_{ст}$ можно заменить действием пары сил P_3, одна из которых приложена в центре изгиба сечения балки, а другая — в месте приварки ее стенки к обшивке. Последняя никакого перемещения балки не вызывает, поэтому из рассмотрения может быть исключена.

Первая составляющая пары сил P_3 будет приложена в той же точке, где действует сумма сил $P_2 + P_3$, которой P_3 противоположна по знаку. Следовательно, в результате действия момента $M_{кр}$ поясок балки окажется под действием только изгибающих его силы P_2 и момента M_2. Однако изгиб пояска вызовет также поворот профиля, которому будет препятствовать обшивка, связанная сваркой со стенкой балки. Величину этого сопротивления кручению балки можно охарактеризовать коэффициентом податливости G_2, определяемым углом поворота балки-полоски, выделенной из обшивки и расположенной в промежутках между смежными балками набора. Если рассматривать указанную выше балку-полоску как двухпролетную неразрезную балку, тогда можно характеризовать угол поворота обшивки φ в месте ее приварки к стенке балки набора выражением

$$\varphi = \frac{M_р b}{2 \cdot 3Д}, \tag{1}$$

где $M_р$ — реактивный момент, действующий вдоль кромки стенки балки в месте ее приварки к обшивке;

b — расстояние между смежными балками набора;

Д — цилиндрическая жесткость балки-полоски.

Коэффициент податливости определяется равенством вида:

$$G_2 = \frac{b}{6Д}. \tag{2}$$

Под действием силы P_2 и момента M_2 торец приваренного участка балки поворачивается и перемещается на величину U_l, зависящую от жесткости элементов балки набора и сопротивления изгибу приваренной обшивки:

$$Ei_п = \frac{d^4U_l}{dy^4} = P_2, \tag{3}$$

где E — модуль упругости при изгибе;

$i_п$ — момент инерции сечения пояска балки.

Повороту балки сопротивления препятствует приваренная к ней обшивка, поэтому перемещение торца балки составит:

$$U_l = h_{ст}\theta = h_{ст}M_рG_2, \tag{4}$$

где θ — угол поворота балки набора;

$h_{ст}$ — высота стенки балки.

Согласно последнему выражению реактивные моменты, действующие в сечениях балки, определяются зависимостью

$$M_р = \frac{U_l}{G_2h_{ст}}. \tag{5}$$

При повороте балки под действием силы P_2 и момента M_2, а также возникающими при этом моментами $M_р$ будут создаваться реактивные силы $P_р$, равные силе P_2, но направленные навстречу ей:

$$P_р = \frac{U_l}{G_2h_{ст}} = -P_2. \tag{6}$$

С учетом жесткости пояска балок и сопротивления обшивки, к которой приварена балка, перемещение U_l найдем из уравнения:

$$Ei_п = \frac{d^4U_l}{dy^4} + \frac{U_l}{G_2h_{ст}^2} = 0, \tag{7}$$

т.е. из решения дифференциального уравнения изгиба балки на сплошном упругом основании жесткостью $\frac{1}{G_2h_{ст}^2}$.

Запишем общий интеграл указанного дифференциального уравнения:

$$\begin{aligned} U_l = e^{-\alpha y}(B_1\cos\alpha y + B_2\sin\alpha y) + \\ + e^{-\alpha y}(B_3\cos\alpha y + B_4\sin\alpha y), \end{aligned} \tag{8}$$

где α — коэффициент относительной жесткости,

$$\alpha = \sqrt[4]{\frac{1}{4EG_2h_{ст}i_п}}.$$

Примем граничные условия:

$$y = 0;\ \frac{d^2U_l}{dy^2} = \frac{M_2}{Ei_{\text{п}}};\ \frac{d^3U_l}{dy^3} = \frac{P_2}{Ei_{\text{п}}};$$

$$y = l;\ U_l = 0;\ \frac{dU_l}{dy} = -G_1 Ei_{\text{п}} \frac{d^2U_l}{dy^2}.$$

Под действием сосредоточенной силы P_1 и изгибающего момента M_1 рассматриваемый участок балки протяженностью l изгибается вместе с приваренной обшивкой. Если включить в состав площади поперечного сечения балки присоединенный поясок обшивки, равный ширине между двумя смежными балками набора, то прогиб конца балки определяют уравнением:

$$EJ_{x_\Sigma} \frac{d^4\omega_l}{dy^4} = 0, \tag{9}$$

где J_{x_Σ} — статический момент инерции сечения профиля балки набора с присоединенным пояском обшивки;

ω_l — прогиб участка балки протяженностью l.

Общий интеграл последнего уравнения и граничные условия вида:

$$y = 0;\ \frac{d^2\omega_l}{dy^2} = \frac{M_1}{EJ_{x_\Sigma}};\ \frac{d^3\omega_l}{dy^3} = \frac{P_1}{EJ_{x_2}};$$

$$y = l;\ \omega_l = 0;\ \frac{d\omega_l}{dy} = -G_1 EJ_{x_\Sigma} \frac{d^2\omega_l}{dy^2}$$

позволяют определить, что под действием момента M_1 и силы P_1 приваренный к обшивке участок балки набора длиной l изогнется на величину

$$\omega_l = P_1 l \left[\frac{l^2}{3EJ_{x_2}} + \frac{al}{2EJ_{x_2}} + G_1(a + l) \right]. \tag{10}$$

При этом участок балки протяженностью a, свободный от приварки к обшивке, изогнется под действием сил P_1 и P_2, проходящих через центр изгиба сечения балки. В результате приложения силы P_3 под влиянием момента $M_{\text{кр}} = -P_3 h_{\text{ст}}$ часть балки набора протяженностью a оказывается в условиях чистого кручения. Угол закручивания θ_a торцевого сечения балки набора в процессе сборки соединения определяют из уравнения

$$-P_3 h_{\text{ст}} = YJ \frac{d\theta_a}{dy}, \tag{11}$$

где Y — модуль упругости при кручении;

J — момент инерции балок набора при чистом кручении.

Действие силы P_3 вызывает кручение балки набора только на протяжении неприваренного участка длиной a, что соответствует граничным условиям вида $y = 0$ и $\theta_a = 0$, тогда угол закручивания свободного конца балки набора составит:

$$\theta_a = \frac{P_3 h_{\text{ст}} a}{YJ}. \tag{12}$$

Наряду с этим под действием сил P_1, P_2 и P_3 прогиб конца балки набора определяется уравнениями:

$$EJ_x \frac{d^4\omega_a}{dy^4} = 0; \tag{13}$$

$$EJ_z \frac{d^4U_l}{dy^4} = 0, \tag{14}$$

где J_x и J_z — статические моменты сечения профиля балки набора, определенные относительно координатных осей OX и OZ.

Общие интегралы этих уравнений, а также граничные условия:

$$y = 0;\ \frac{d^2\omega_a}{dy^2} = 0;\ \frac{d^2U_a}{dy^2} = 0;\ \frac{d^3\omega_a}{dy^3} = \frac{P_1}{EJ_x};$$

$$\frac{d^3U_a}{dy^3} = \frac{P_2 + P_3}{EJ_z};$$

$$y = a;\ \omega_a = \omega_l;\ \frac{d\omega_a}{dy} = -\frac{d\omega_l}{dy};$$

$$U_a = U_l;\ \frac{dU_a}{dy} = -\frac{dU_p}{dy},$$

где ω_a — прогиб участка балки длиной a;

ω_l — прогиб участка балки длиной l;

$u_{\text{р}}$ — перемещение вдоль стенки балки,

позволяют определить, что концы соединяемых при сборке балок набора будут иметь перемещение

вдоль стенки

$$\omega_a - P_1 \left[\frac{l}{3EJ_{x_\Sigma}} + G_1\left(l^2 - a^2\right) - \frac{a^2 l}{EJ_{x_\Sigma}} + \frac{a^3}{3EJ_x} \right]; \tag{15}$$

поперек стенки (у пояска)

$$U_a = (1-\alpha a)B_1 + \alpha a B_2 + (1+\alpha a)B_3 + \\ + \alpha a B_4 + \frac{(P_2+P_3)a}{3EJ_z}; \quad (16)$$

поперек стенки (в нижней части) с поворотом

$$U_c = (1-\alpha a)B_1 + \alpha a B_2 + (1+\alpha a)B_3 + \alpha a B_4 + \\ + \frac{(P_2+P_3)a}{3EJ_z} + \frac{P_3 h_{\text{ст}}^2 a}{YJ}. \quad (17)$$

В практике традиционного изготовления металлоконструкций указанные перемещения концов соединяемых балок набора по вертикали и горизонтали, а также путем поворота относительно плоскости обшивки осуществляют при помощи П-образных скоб, временно привариваемых к обшивке в месте соединения балок набора. Под эти скобы забивают сборочные клинья, благодаря чему соединяемые концы балок набора перемещают по вертикали, поджимая их к плоскости обшивки, либо сдвигают торцы балок по горизонтали или поворачивают соединяемые концы балок в плоскости стыкования, обеспечивая тем самым возможность совмещения и сборки торцов балок набора.

Трудозатраты операций процесса сборки, нормо-ч

Установка на месте сборки временно привариваемых П-образных скоб	0,03...0,27
Приварка П-образных скоб на месте сборки	0,1...0,42
Установка применяемых сборочных клиньев	0,06...0,12
Силовое сведение концов балок набора	1,2
Удаление используемых сборочных клиньев	0,04...0,08
Удаление временно приваренных П-образных скоб	0,02...0,11
Зачистка остатков электроприхваток	0,12...0,42
Подварка мест временной приварки П-образных скоб	0,02...0,14
Зачистка поверхности обшивки	0,04...0,14

Показатели материалоемкости и энергопотребления

Материалоемкость, кг:	
временно привариваемых П-образных скоб	25,6
расхода электродов	0,12
Энергопотребление:	
электроэнергии, кВт·ч	2,1
кислорода, м^3	2,97
ацетилена, м^3	0,46
сжатого воздуха, м^3	108

В целях сокращения этих показателей разработаны технология и оборудование, обеспечивающие механизацию процесса сведения концов балок набора без применения временно привариваемых П-образных скоб и нажимных клиньев, забиваемых вручную кувалдой.

Новая технология предусматривает использование сборочного устройства в виде скобы, устанавливаемой на стык соединяемых балок. Скоба включает механизм одновременного выравнивания стенок балок по высоте и в поперечном направлении с возможностью поворота верхней части балок.

Сборочная скоба приводится в действие при помощи пневмогидравлического домкрата (рис. 2).

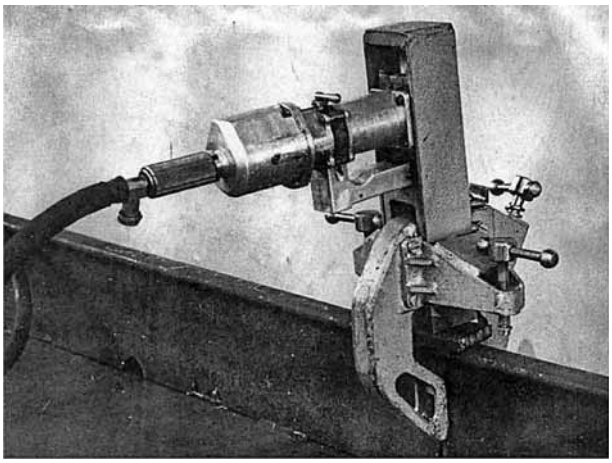


Рис. 2. Размещение сборочного устройства с пневмогидравлическим домкратом на балках подкрепляющего набора

Использование подобного сборочного устройства обеспечивает сокращение трудозатрат сборки, затраты на материалы и энергопотребление.

УДК 678.073:661.481

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

Механические и триботехнические свойства композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном, функционализированным силансодержащими модификаторами (часть 1)*

Исследованы механические и триботехнические характеристики композиций на основе сверхвысокомолекулярного полиэтилена (СВМПЭ), наполненных рубленым стекловолокном, предварительно обработанным в трех различных силансодержащих модификаторах в целях увеличения адгезии стекловолокна к матрице. Выбор наполнителя и промоутеров адгезии для сверхвысокомолекулярной матрицы обусловлен поиском эффективных промышленно выпускаемых наполнителей и модификаторов поверхности для создания износостойких полимерных композитов для узлов трения в машиностроении. Показано, что наиболее эффективными аппретами для стекловолокна являются промышленно выпускаемые промоутеры КН550 и "Пента-1006", обеспечивающие высокую износостойкость стеклокомпозита на основе матрицы сверхвысокомолекулярного ПЭ в широком интервале скоростей и нагрузок.

Mechanical and tribotechnical properties of ultrahigh-molecular weight polyethylene (UHMW-PE) composites filled with chopped fiberglass pretreated with three different silane-containing modifiers increasing adhesion of fiberglass to the polymer matrix in order were investigated. The choice of the filler and adhesion promoters for the ultrahigh-molecular weight PE matrix is due to search of effective industrially manufactured fillers and surface modifiers for developing wear-resistant polymer composites for friction units in mechanical engineering. It is shown that coupling agents KH550 and Penta-1006 are more efficient industrially produced adhesion promoters the for fiberglass which provide high wear resistance of reinforced UHMW-PE composite for their stable operation in a wide range of velocities and loads.

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

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

Сверхвысокомолекулярный полиэтилен (СВМПЭ) обладает повышенными характеристиками ряда механических и функциональных свойств: высоким сопротивлением изнашиванию, низким коэффициентом трения, устойчивостью к воздействию кислот и щелочей, ультрафиолетового и гамма-излучения и микроорганизмов [1—4]. С другой стороны, стекловолокно обладает высокой прочностью и жесткостью и широко используется в качестве наполнителя для многих полимерных композиционных материалов, прежде всего для повышения их механических свойств [5—7]. Однако в случае СВМПЭ неполярность матрицы обусловливает низкую межфазную адгезию [8, 9].

* Работа выполнена в рамках плана фундаментальных научных исследований государственных академий наук 2013—2020 гг., а также поддержана грантом президента РФ по государственной поддержке ведущих научных школ Российской Федерации НШ-5875.2018.8. Авторы выражают благодарность РФФИ за поддержку данных исследований, выполненных в рамках проекта № 18-58-00037.

Обработка стекловолокон с помощью силансодержащих модификаторов способна улучшить совместимость и адгезию между ними, приводя одновременно к повышению механических и триботехнических свойств СВМПЭ-композитов.

Поставлена задача повышения адгезии между матрицей СВМПЭ и наполнителем (рубленые стекловолокна — РСВ) путем их функционализации обработкой промышленно выпускаемыми силансодержащими модификаторами и сравнение влияния трех различных по составу аппретов на трибомеханические свойства СВМПЭ-композитов.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Использовали порошок СВМПЭ (GUR 2122) (АО "Селанез Сейлз Рус") с молекулярной массой 4,5 млн у.е., РСВ длиной 2 мм; силансодержащий модификатор "Пента-1006" (ООО "ПЕНТА-91"), представляющий собой композит на основе полиорганосилоксана $(CH_3)_3SiO[(CH_3)_2SiO]_n—Si(CH_3)_3$, а также другими силансодержащими модификаторами KH550 и ONS (ООО "Дунгуань", Китай), представляющие собой 3-аминопропилтриэтоксисилан $NH_2CH_2CH_2CH_2Si(OC_2H_5)_3$ и триметоксиоктадексисилан $(CH_3)_3SiOCH_3$.

Объемные образцы композитов получали горячим прессованием с помощью пресса МС-500 в пресс-форме, обогреваемой кольцевой разъемной печью с цифровым управлением (ООО "ИТМ", г. Томск): давление компрессионного спекания — 10 МПа; температура — 200 °С; скорость последующего охлаждения — 3...4 °С/мин. Износостойкость образцов в режиме сухого трения определяли по схеме "вал—колодка" при нагрузках на образец размером 15,8×6,4×10,0 мм^3, P = 60 и 140 Н и скоростях скольжения v = 0,3 и 0,5 м/с на машине трения 2070 СМТ-1 (согласно ASTM G99/DIN 50324). Диаметр контртела (вала) из стали ШХ15 составлял 35 мм. Объемный износ определяли по глубине дорожки трения с помощью контактного профилометра Alpha-Step IQ (KLA-Tencor), коэффициент трения — с помощью трибометра CSEM CH 2000 (по схеме "шар-по-диску"; нагрузка P = 5 Н, скорость скольжения v = 0,3 м/с). ИК-спектры получали на спектрометре NICOLET 5700. Структурные исследования проводили на растровом электронном микроскопе LEO EVO 50 при ускоряющем напряжении 20 кВ по поверхностям скола, полученным механическим разрушением образцов с надрезом, предварительно выдержанных в жидком азоте.

Исходные стекловолокна покрыты замасливателем и представляют собой в основном жгуты переплетенных волокон (рис. 1), поэтому их предварительно отжигали на воздухе при температуре 300 °С с последующей функционализацией.

Функционализацию волокон РСВ осуществляли путем их обработки в водно-этанольных (pH = 4,5...5,5) растворах каждого из силансодержащих модификаторов при комнатной температуре при непрерывном перемешивании в течение 30 мин. Содержание реагента составляло 1 % от массы наполнителя. Затем суспензию, содержащую, в том числе, отожженные стекловолокна, высушивали в тепловом шкафу при температуре 100 °С до полного выпаривания жидкости.

В табл. 1 представлены механические свойства СВМПЭ и композитов на его основе, содержащих 10 % стекловолокон в необработанном состоянии, после отжига и после функционализации тремя типами реагентов.

Добавление в СВМПЭ необработанных стекловолокон снижает предел прочности и удлинение при растяжении композита. Необработанные от замасливателя стекловолокна распределены пучками (неоднородно) в матрице (рис. 2).

Введение в матрицу отожженных при 300 °С стекловолокон привело к увеличению механических свойств композита (твердости, модуля упругости, предела прочности, удлинения при

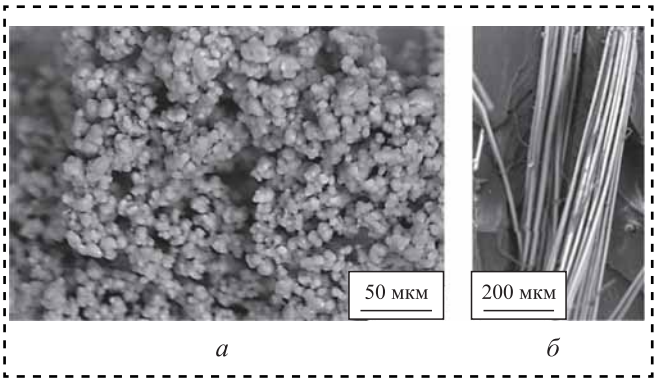


Рис. 1. РЭМ-микрофотографии исходного порошка СВМПЭ (*а*) и рубленых стекловолокон (*б*)

Таблица 1

Механические характеристики СВМПЭ и композиций на его основе

Компоненты	Плотность ρ, г/см^3	Твердость по Шору *D*	Модуль упругости *E*, МПа	Предел текучести $\sigma_{0,2}$, МПа	Предел прочности $\sigma_в$, МПа	Удлинение, %
СВМПЭ	0,934	57,7 ± 0,6	711 ± 40	21,6 ± 0,6	42,9 ± 3,1	485 ± 28
СВМПЭ + РСВ	1,001	58,0 ± 0,5	957 ± 82	23,7 ± 1,5	24,9 ± 1,3	198 ± 23
СВМПЭ + РСВ (отожженные)	0,999	58,8 ± 0,5	1038 ± 17	22,8 ± 1,2	34,2 ± 0,6	363 ± 22
СВМПЭ + РСВ (аппрет — КН550)	1,000	61,4 ± 0,5	1463 ± 95	40 ± 3,0	33,9 ± 3,7	263 ± 32
СВМПЭ + РСВ (аппрет — "Пента-1006")	1,001	60,2 ± 0,5	1483 ± 51	28,4 ± 0,9	37,7 ± 2,5	337 ± 45
СВМПЭ + РСВ (аппрет — ONS)	1,004	61,1 ± 0,4	1543 ± 99	28,1 ± 1,5	38,5 ± 1,3	337 ± 32

Примечание. Массовая доля РСВ — 10 %.

разрыве) по сравнению с введением необработанного РСВ. Распределение волокон в матрице достаточно однородное (см. рис. 2, *в*). Последующая функционализация отожженных стекловолокон тремя силансодержащими аппретами приводит к существенному повышению механических характеристик композитов по сравнению с чистым СВМПЭ: твердости — на 10 %, модуля упругости — в 1,4—2 раза, предела текучести — в 1,2—1,8 раза. Величина удлинения до разрушения остается достаточно высокой.

Силансодержащие реагенты КН550, "Пента-1006" и ONS по эффективности повышения механических свойств близки: твердость, модуль упругости, предел текучести в композитах со стекловолокном, функционализированным с помощью этих аппретов, превышают таковые (см. табл. 1) в композитах с исходным и отожженным стекловолокном, что свидетельствует о наличии межфазной адгезии, обеспечиваемой данными промоутерами адгезии (рис. 3).

Сильный пик поглощения 720 см$^{-1}$ и относительно слабый пик 1243 см$^{-1}$ — характеристические пики $SiCH_2$; пики 800 и 1260 см$^{-1}$ — характеристические пики $Si(CH_3)_2$, а 1030 и 1080 см$^{-1}$ — сдвоенные пики поглощения связи Si—O [10, 11]. Интенсивности характеристических пиков $SiCH_2$ и $Si(CH_3)_2$ в композите с функционализированными РСВ повышаются по сравнению с композитом с исходным РСВ. Степень повышения интенсивности пиков $SiCH_2$ и $Si(CH_3)_2$ определяется химической связью с модификатором. При 1030 и 1080 см$^{-1}$ наблюдался самый сильный характеристический сдвоенный пик, что обусловлено увеличением числа связей Si—O при функционализации стекловолокон аппретами [10, 11].

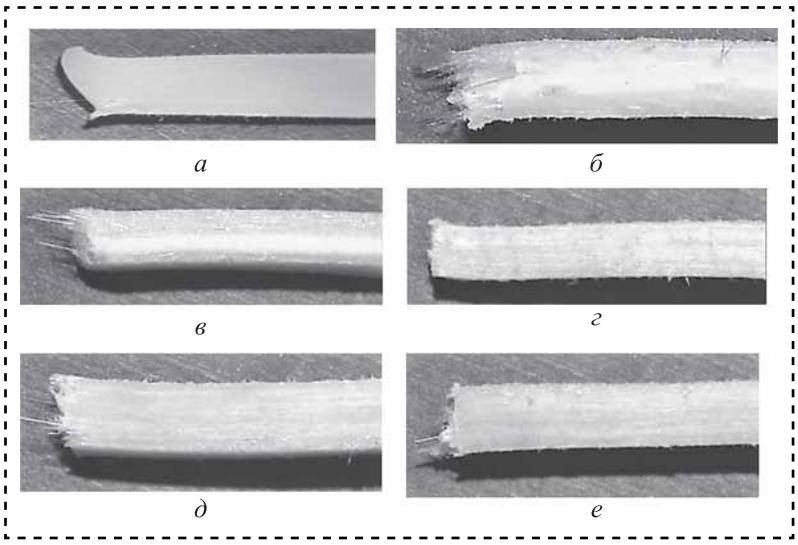


Рис. 2. Оптические фотографии разрушенных при растяжении образцов:

а — СВМПЭ; *б* — СВМПЭ + РСВ (исходные); *в* — СВМПЭ + РСВ (отожженные); *г* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *д* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *е* — СВМПЭ + РСВ (ONS); массовая доля РСВ — 10 %

На рис. 4 представлены РЭМ-фотографии надмолекулярной структуры композитов с отожженными и функционализированными стекловолокнами. Сферолитная надмолекулярная структура в композитах сохраняется при введении в матрицу до 10 % РСВ, однако размеры и форма сферолитов при этом существенно изменяются.

Исследование трибологических свойств композитов на основе СВМПЭ со стекловолокнами, функционализированными с помощью трех различных

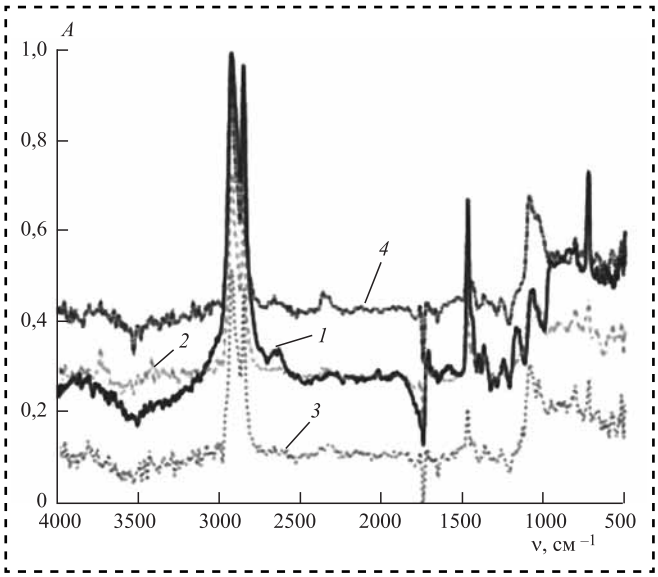


Рис. 3. ИК-спектры:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + РСВ (исходные); *3* — СВМПЭ + РСВ (отожженные); *4* — СВМПЭ + РСВ (КН550); массовая доля РСВ — 10 %

реагентов выявили, что композит со стекловолокном, функционализированным КН550, показывает более высокую износостойкость и низкий коэффициент трения (0,71 против 0,136 мм^3 и 0,079 против 0,102 соответственно) в сравнении с другими аппретами при трибоиспытании по схеме "шар-по-диску" (табл. 2).

Коэффициент трения во всех исследованных композитах имеет достаточно широкую амплитуду на всем пути испытания (1 км) по сравнению с исходной матрицей СВМПЭ (рис. 5).

При "мягких" условиях трибонагружения (P = 60 Н; v = 0,3 м/с) износостойкость композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном возрастала более чем вдвое (рис. 6). Дальнейшее увеличение скорости до 0,5 м/с при той же нагрузке сопровождалось снижением износостойкости в 1,3 раза по сравнению с "мягким" режимом трибонагружения. Более эффективными в "мягких" условиях испытаний (P = 60 Н; v = 0,3 и 0,5 м/с) оказался композит, в котором РСВ функционализировано аппретом "Пента-1006". В "жестких" условиях трибоиспытаний (P = 140 Н; v = 0,3 и 0,5 м/с), во-первых, износ всех исследованных композитов возрос на порядок (см. рис. 6, *б*); во-вторых, наибольшую износостойкость показал композит со стекловолокном, функционализированным КН550.

На рис. 7 данные по износостойкости композитов на основе СВМПЭ со стекловолокном в различном состоянии (необработанный, отожженный, функционализированный реагентами "Пента-1006", ONS и КН550) представлены в гра-

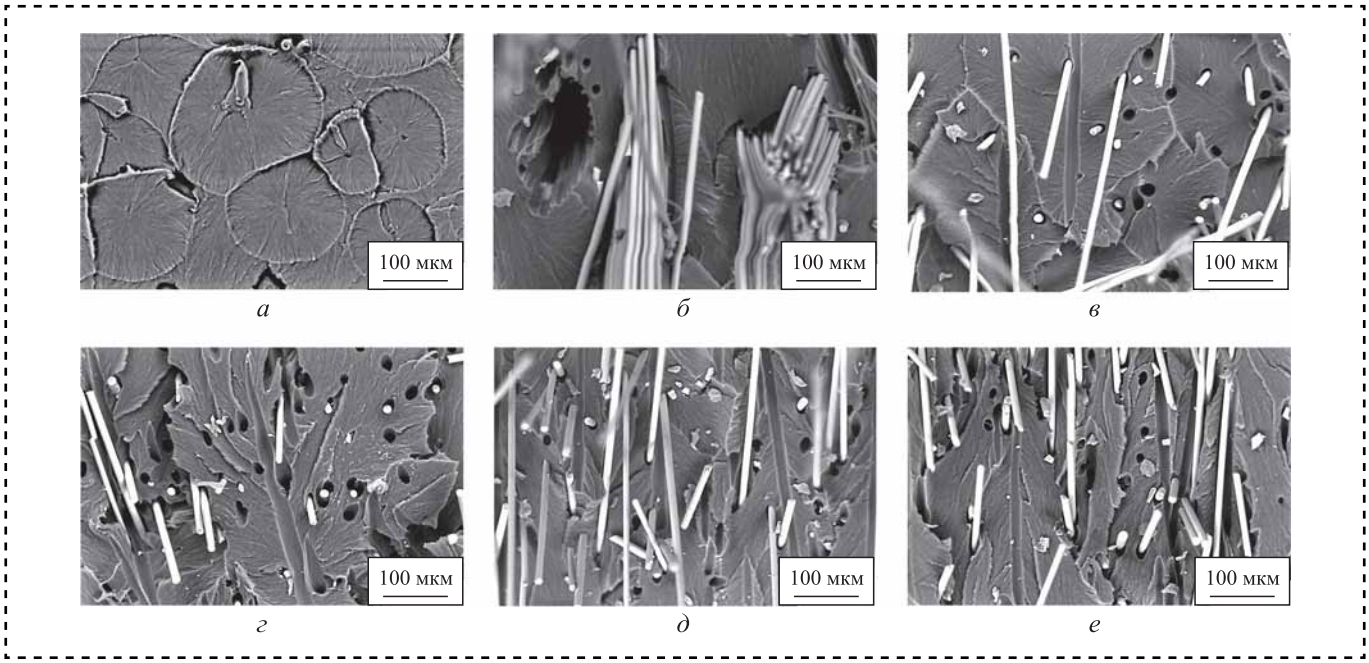


Рис. 4. РЭМ-фотографии надмолекулярной структуры:
а — СВМПЭ; *б* — СВМПЭ + РСВ (исходные); *в* — СВМПЭ + РСВ (отожженные); *г* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *д* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *е* — СВМПЭ + РСВ (ONS); массовая доля РСВ — 10 %

Таблица 2

Коэффициент трения и объемный износ композитов на основе СВМПЭ ("шар-по-диску")

Компоненты	Коэффициент трения *f*	Объемный износ, мм^3
СВМПЭ	0,102 ± 0,003	0,136 ± 0,024
СВМПЭ + РСВ	0,057 ± 0,011	0,101 ± 0,01
СВМПЭ + РСВ (отожженные)	0,069 ± 0,004	0,121 ± 0,01
СВМПЭ + РСВ (аппрет — КН550)	0,079 ± 0,010	0,071 ± 0,01
СВМПЭ РСВ (аппрет — "Пента-1006")	0,138 ± 0,008	0,096 ± 0,019
СВМПЭ + РСВ (аппрет — ONS)	0,158 ± 0,009	0,114 ± 0,015
Примечание. Массовая доля РСВ — 10 %.		

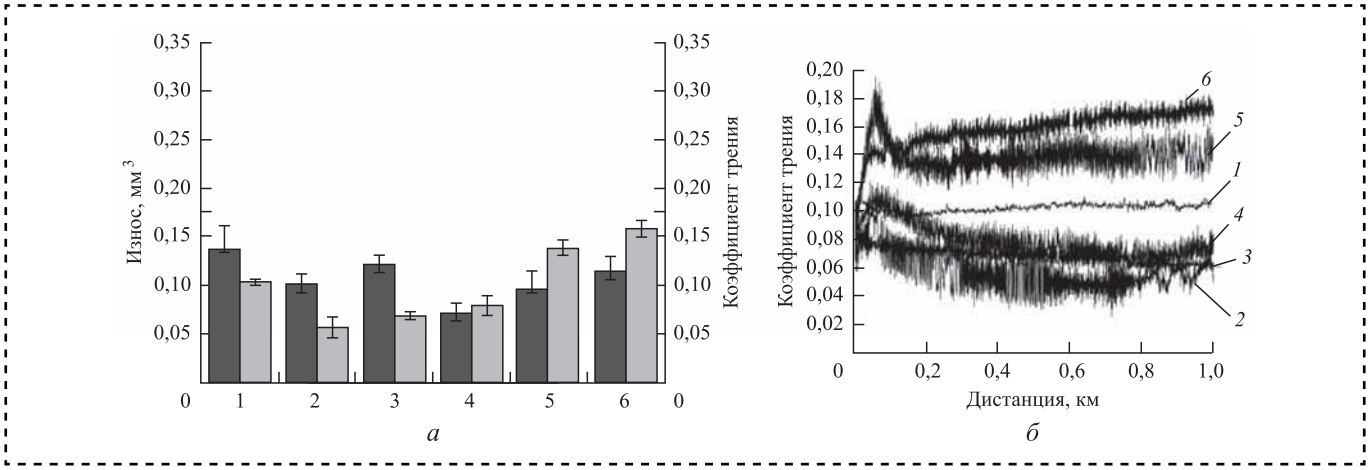


Рис. 5. Объемный износ (*а*) и коэффициент трения (*б*) для:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + РСВ (исходный); *3* — СВМПЭ + РСВ (отожженный); *4* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *5* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *6* — СВМПЭ + РСВ (ONS); схема "шар-по-диску", режим *P* = 10 Н и v = 0,3 м/с; массовая доля РСВ — 10 %

фическом виде в терминах объемного износа как функции произведения скорости скольжения на нагрузку. По этому критерию можно выбрать аппрет для наполнителя (стекловолокна) в зависимости от условий работы трибоузла.

Поверхности дорожек трения композитов со стекловолокном в различном состоянии для "мягких" условий трибонагружения (*P* = 60 Н; v = 0,3 м/с) практически гладкие с тонкими микробороздками износа (рис. 8): самая гладкая поверхность характерна для композита с РСВ, функционализированным аппретом "Пента-1006" (рис. 8, *д*). В таких условиях трибонагружения повышение износостойкости в меньшей степени определяется армирующим действием стекловолокна, но в большей — его "защитной" функцией на поверхности скольжения полимерного композита.

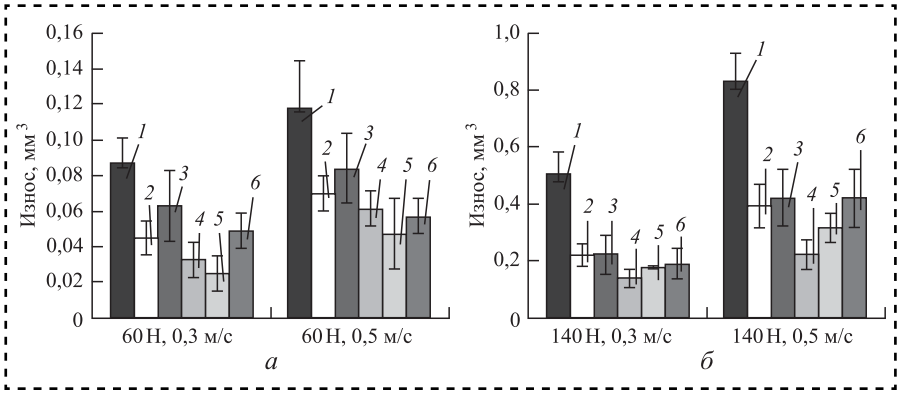


Рис. 6. Объемный износ:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + РСВ (исходный); *3* — СВМПЭ + РСВ (отожженный); *4* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *5* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *6* — СВМПЭ + РСВ (ONS) при *P* = 60 Н (*а*) и 140 Н (*б*); схема испытаний "вал—колодка"; массовая доля РСВ — 10 %

В "жестких" условиях трибонагружения (*P* = 140 Н и v = 0,5 м/с) топография поверхности дорожек трения иная (рис. 9): в композитах с необработанным и отожженным

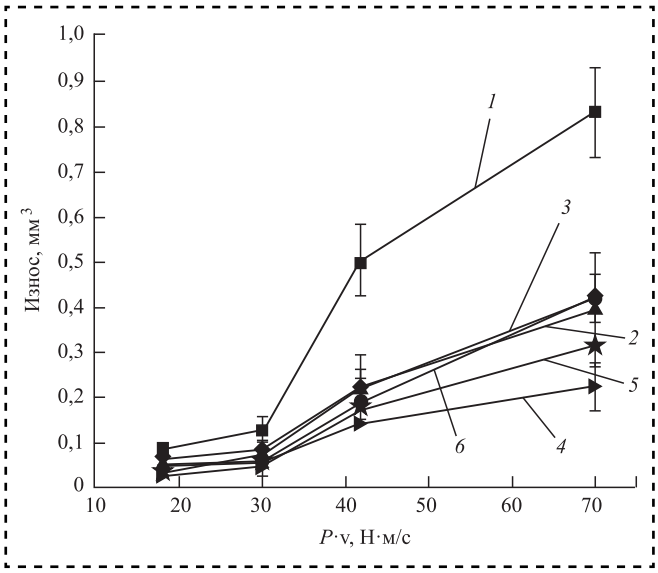


Рис. 7. Критерий износостойкости:
1 — СВМПЭ; *2* — СВМПЭ + РСВ (исходный); *3* — СВМПЭ + РСВ (отожженный); *4* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *5* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *6* — СВМПЭ + РСВ (ONS); массовая доля РСВ — 10 %

стекловолокном наблюдали глубокие борозды, вызванные пропахивающим действием фрагментов разрушенных РСВ (рис. 9, *б* и *в*). В композитах с функционализированным волокном поверхности более гладкие (рис. 9, *г—е*). С учетом кратно более высокого износа при "жестком" трибонагружении это связано именно с армирующим влиянием стекловолокон, поэтому наибольшая адгезия обеспечивает и максимальное сопротивление изнашиванию. Также в композите со стекловолокном, функционализированным аппретом КН550, поверхность дорожки трения наиболее гладкая, что хорошо согласуется с данными, приведенными на рис. 6, *б*.

Рубленые стекловолокна, функционализированные реагентами КН550 и "Пента-1006", — эффективный наполнитель для неполярной матрицы СВМПЭ для работы в широком интервале напряжений и скоростей трибонагружения в металлополимерных узлах трения. Эффективность функционализации стекловолокон указанными аппретами заключается в повышении адгезии за счет образования химических связей [10—12] силансодержащих модификаторов с гидроксильными группами на поверхности неорганических материалов (стекловолокон, силикатов, металлов и их оксидов) и образованию ковалентных связей. Другая химическая функциональная группа модификатора может образовывать ковалентную связь с матрицей, о чем свидетельствует проведенный анализ ИК-спектров исследованных композитов (см. рис. 3).

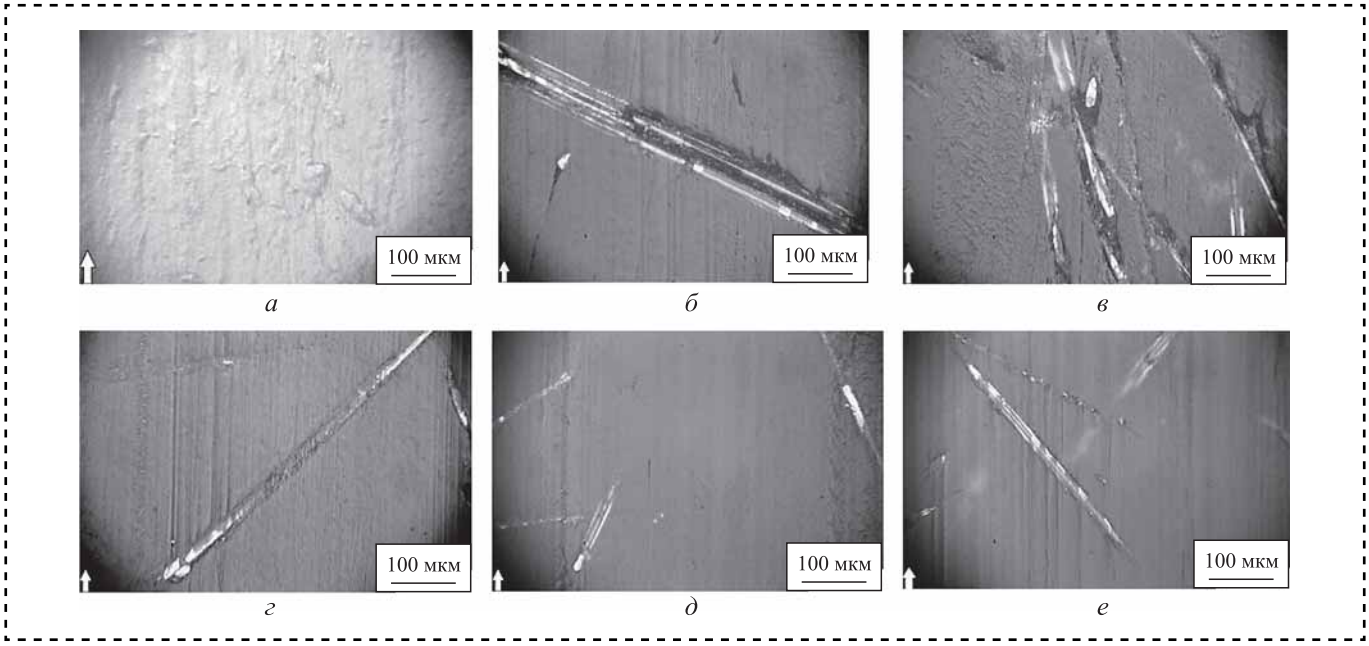


Рис. 8. Топография дорожек трения для схемы "вал—колодка", *P* = 60 Н, v = 0,3 м/с:
а — СВМПЭ; *б* — СВМПЭ + РСВ (исходный); *в* — СВМПЭ + РСВ (отожженный); *г* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *д* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *е* — СВМПЭ + РСВ (ONS); массовая доля РСВ — 10 %

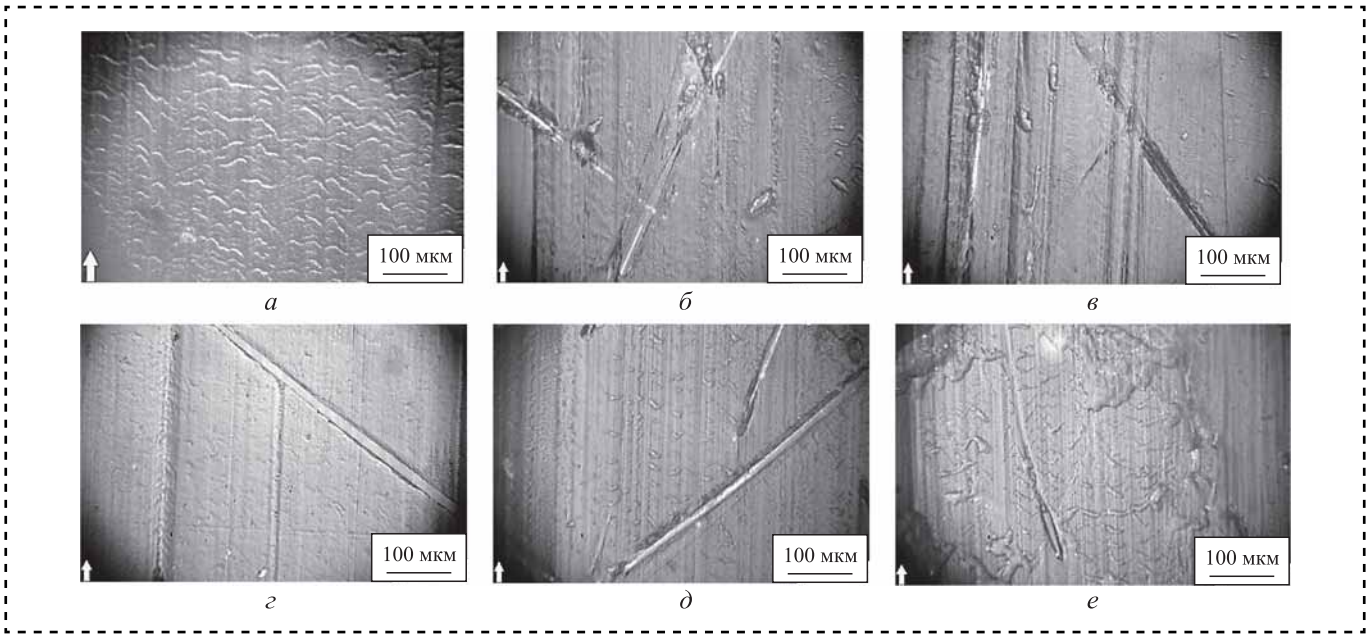


Рис. 9. Топография дорожек трения для схемы "вал—колодка", *P* = 140 Н; v = 0,5 м/с:
а — СВМПЭ; *б* — СВМПЭ + РСВ (исходный); *в* — СВМПЭ + РСВ (отожженный); *г* — СВМПЭ + РСВ (КН550); *д* — СВМПЭ + РСВ ("Пента-1006"); *е* — СВМПЭ + РСВ (ONS); массовая доля РСВ — 10 %

Заключение

Исследованы трибомеханические свойства композитов на основе матрицы сверхвысокомолекулярного полиэтилена с рублеными стекловолокнами, функционализированными тремя типами силансодержащих модификаторов в целях повышения адгезии между наполнителем и неполярной полимерной матрицей. Проведено сравнение трех промышленно выпускаемых промоутеров адгезии ("Пента-1006", ONS и КН550) и показана их эффективность в повышении износостойкости композитов (более 2 раз) в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения.

В "мягких" условиях трибонагружения (P = 60 Н и v = 0,3 м/с) более эффективен промоутер "Пента-1006", в "жестких" условиях (P = 140 Н и v = 0,5 м/с) — КН550, что позволяет рекомендовать к использованию промышленно выпускаемые аппреты для стеклокомпозитов на основе СВМПЭ, работающих в широком интервале нагрузок и скоростей скольжения в узлах трения машин и механизмов.

Библиографический список

1. **Chukov D.I., Stepashkin A.A., Gorshenkov M.V., Tcherdyntsev V.V., Kaloshkin S.D.** Surface modification of carbon fibers and its effect on the fiber—matrix interaction of UHMW-PE based composites // Journal of Alloys & Compounds. 2014. No. 586. P. 459.

2. **Brian J. Briscoe, Sujeet K. Sinha.** Tribological applications of polymers and composites: Past, present and future prospects. Elsevier. 2008. P. 1—14.

3. **Kurtz S.** High Pressure Crystallized UHMW-PEs. / UHMW-PE Biomaterials Handbook // edited by Steven M. Kurtz. William Andrew Publishing, Norwich, NY. 2016. P. 434—448.

4. **Ramli M.S., Wahab M.S., Ahmad M., Bala A.S.** FDM Preparation of Bio-Compatible UHMW-PE Polymer for Artificial Implant // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2016. No. 8. P. 5473—5480.

5. **Mimaroglu A., Unal H., Arda T.** Friction and wear performance of pure and glass fibre reinforced polyether-imide on polymer and steel counterface materials // Wear. 2007. 262 (11—12). P. 1407—1413.

6. **Rowcna C., Marcella R., Marco N. et al.** Friction, lubrication, and polymer transfer between UHMW-PE and CoCrMo hip-implant materials: A fluorescence microscopy study // Journal of Biomedical Materials Research. Part A. 2009. 89A (4): P. 1011—1018.

7. **Park S.J., Jin J.S.** Effect of silane coupling agent on interphase and performance of glass filers/unsaturated polyester composites // Journal of Colloid and Interface Science. 2001. 242 (1). P. 174—179.

8. **Panin S.V., Kornienko L.A., Alexenko V.O., Huang Qitao, Ivanova L.R.** Comparison of mechanical and tribotechnical properties of UHMW-PE reinforced with basalt fibers and particles // Materials Science and Engineering. 2016. V. 156. No. 1. P. 170—176.

9. **Mc G. Loughlin T.M., Kavanagh A.G.** Wear of ultra-high molecular weight polyethylene (UHMW-PE) in total knee prostheses: a review of key influences // Proc. Inst. Mech. Eng. 2000. H 214. P. 349—359.

10. **Tian Liu, Bin Li, Brooks Lively, Allen Eyler, Wei-Hong Zhong**. Enhanced wear resistance of high-density polyethylene composites reinforced by organosilane-graphitic nanoplatelets // Wear. Vol. 309. Issues 1—2. 2014. P. 43—51.

11. **Torry S.A., Campbell A., Cunliffe A.V., Tod D.A.** Kinetic analysis of organosilane hydrolysis and condensation // International Journal of Adhesion and Adhesives. Vol. 26. Issues 1—2. 2006. P. 40—49.

12. **Mohammad Shateri-Khalilabad, Mohammad E. Yazdanshenas.** One-pot sonochemical synthesis of superhydrophobic organic—inorganic hybrid coatings on cotton cellulose. Cellulose. 2013.

УДК 621.73.079

А.Н. Петров, *д-р техн. наук (Московский политехнический университет),*
Д.С. Таусенев *(ООО "Симпатек", г. Екатеринбург),*
С.В. Мизера, М.А. Петров, *канд. техн. наук (Московский политехнический университет)*
E-mail: m.a.petrov@mospolytech.ru

Гранулометрический анализ коллоидного графита, применяемого для смазочных материалов в процессах горячей обработки металлов давлением

Проведены исследования коллоидного графита, применяемого в процессах горячего деформирования в сухом виде или в виде смазочных суспензий на анализаторах размеров и формы частиц немецкой компании Sympatec GmbH — HELOS и QICPIC. Получены результаты распределений по размерам и форме частиц порошка графита марки С1 и S12. Исследованы технологические свойства смазочных материалов на основе порошка коллоидного графита С1.

This article deals with researching of colloidal graphite to be used for hot deformation as powders or as lubricants. We have done these investigations by analyzers HELOS and QICPIC, Co. Sympatec GmbH, Germany. We have got results concerning sizes and shapes of graphite powders C1 and S12. We have researched technological properties of colloidal graphite C1 as ingredient for hot deformation lubricant.

Ключевые слова: порошок, дисперсность, обработка металлов давлением, суспензия, лазерный гранулометр, анализ изображений, коллоидный графит, гранулометрический анализ, дисперсия, коэффициент трения, горячее деформирование, осадка кольца.

Keywords: powder, dispersion, metal forming, suspension, laser granulator, image analyzing, colloidal graphite, granule analyzing, dispersion, friction, forging, ring upsetting.

Введение

Размеры частиц — главный критерий, определяющий физико-химические и технологические свойства изделий и продуктов на основе порошков, в частности из графита: электропроводность, смачиваемость, трибологические и другие свойства [2]. Анализ частиц по размерам, гранулометрический анализ в производственных условиях выполняют методами ситового анализа или лазерной дифракции.

Метод лазерной дифракции на сегодняшний день самый распространенный для анализа частиц в лабораторных и производственных условиях [1]. В основе дифракции лазерного луча заложена теория Фраунгофера или Ми. Измерения основаны на регистрации рассеивания лазерного луча на частицах материала. Вычисления размеров частиц проводят по параметро-независимой теории дифракции (по Фраунгоферу). Для интерпретации данных в методе лазерной дифракции применяют модель эквивалентной сферы, в которой каждая частица заменяется эквивалентной сферой, равной объему исходной частицы. За размер частицы принимают диаметр эквивалентной сферы. Для гранулометрического анализа используют следующие статистические величины: $d_м$ — модальный диаметр, наиболее вероятный размер частиц (положение максимума функции распределения); D — средний размер частиц; d_n — номинальный диаметр (определяется таким образом, что число частиц с размерами меньше d_n составляет n процентов всех частиц).

Цель работы — получить результаты распределения размеров и формы частиц коллоидного графита, применяемого для изготовления смазочных материалов (СМ); оценить влияние размеров частиц графита на технологические свойства СМ для процесса горячего деформирования.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Распределение размеров частиц порошков коллоидного графита исследовали на модульном приборе HELOS & RODOS, состоящем из лазерного дифракционного анализатора HELOS/KR с диапазоном измерений 0,1...8750 мкм, модуля воздушного диспергирования порошков RODOS, а также модуля точного вибрационного дозирования порошков VIBRI (рис. 1 на стр. 2 обложки). Выбрали прецизионный оптический диапазон измерений R2 (0,25/0,45...87,5 мкм). Время измерения проб 2,18...6,3 с. Диспергирование — воздушное, сухим способом. Давление сжатого воздуха в стальной линии диспергирования — 3 атм. Высота щели воронки — 2 мм. Внутренний диаметр инжектора линии диспергирования — 4 мм.

Отличительная особенность данного прибора — надежное и эффективное диспергирование порошков графита в их исходном сыпучем состоянии. Порошок без какой-либо пробоподготовки подается в приемную воронку вибрационного дозирующего модуля VIBRI, который равномерным потоком переводит продукт в линию диспергирования. В стальной линии RODOS под давлением сжатого воздуха происходит полное разделение агломератов и слипшихся частиц до отдельных индивидуальных частиц. На выходе инжектора линии создается направленный аэрозольный поток частиц, впрыскивающийся сквозь лазерный луч для измерения. В конструкции данного прибора не используются шланги или кюветы для подачи порошка при диспергировании воздушным способом, а значит, отсутствует проблема загрязнения тракта и потеря частиц графита.

Распределение размеров частиц в смазочных материалах на основе коллоидного графита исследовали на приборе HELOS & QUIXEL. Диапазон измерений — R2 (0,25/0,45...87,5 мкм). Диспергирование жидкостное в ПАВ. Время измерения 10 с.

Результаты исследований приведены в табл. 1.

На рис. 2 и 3 представлены дифференциальные и интегральные кривые распределе-

Таблица 1

Статистические результаты исследований порошков и смазочных материалов

Образец	$d_м$, мкм	D, мкм	d_{10}, мкм	d_{50}, мкм	d_{90}, мкм	Размах $(d_{90} - d_{10})/d_{50}$	Удельная поверхность, см^2/см^3
Порошки							
C1	3,9	7,1	1,9	5,7	14,0	2,0	15 000
S12	3,2	4,7	1,7	4,3	8,5	1,6	19 000
Смазочные материалы							
CM1	1,87	3,59	0,88	2,78	7,62	2,4	32 000
CM2	2,13	4,13	1,02	3,23	8,78	2,4	28 000

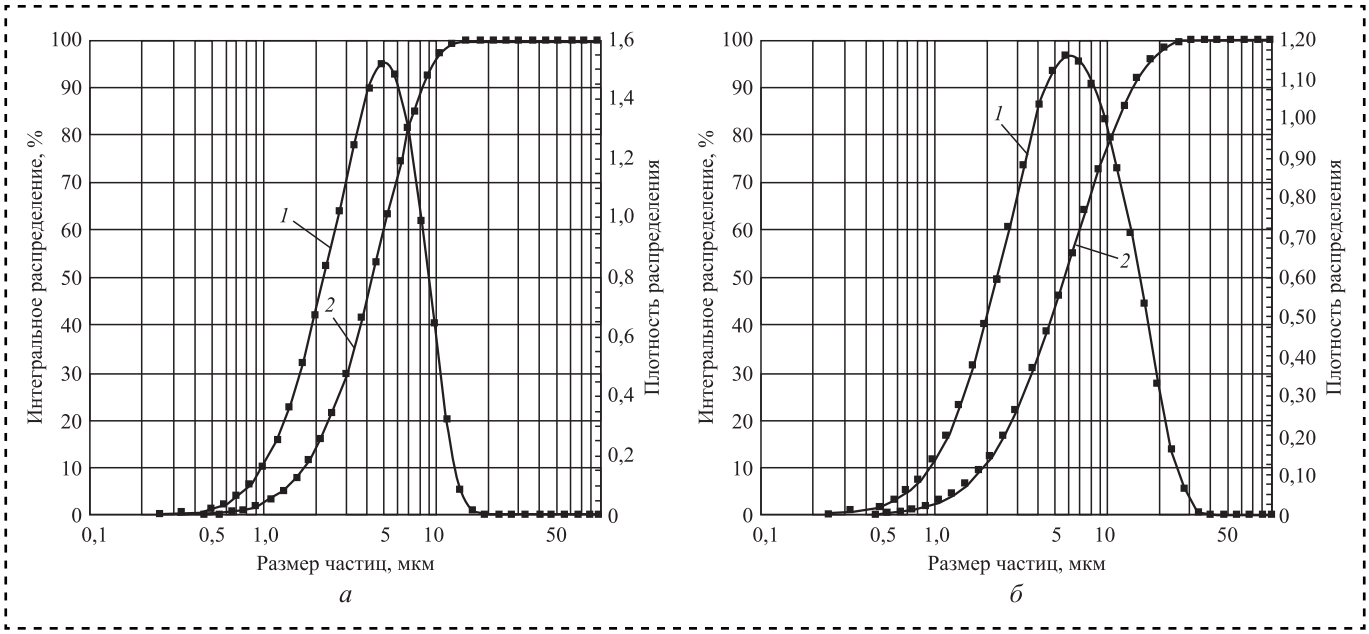


Рис. 2. Кривые распределения частиц графита S12 (*а*) и C1 (*б*):
1 — дифференциальная кривая (плотность распределения); *2* — интегральная кривая

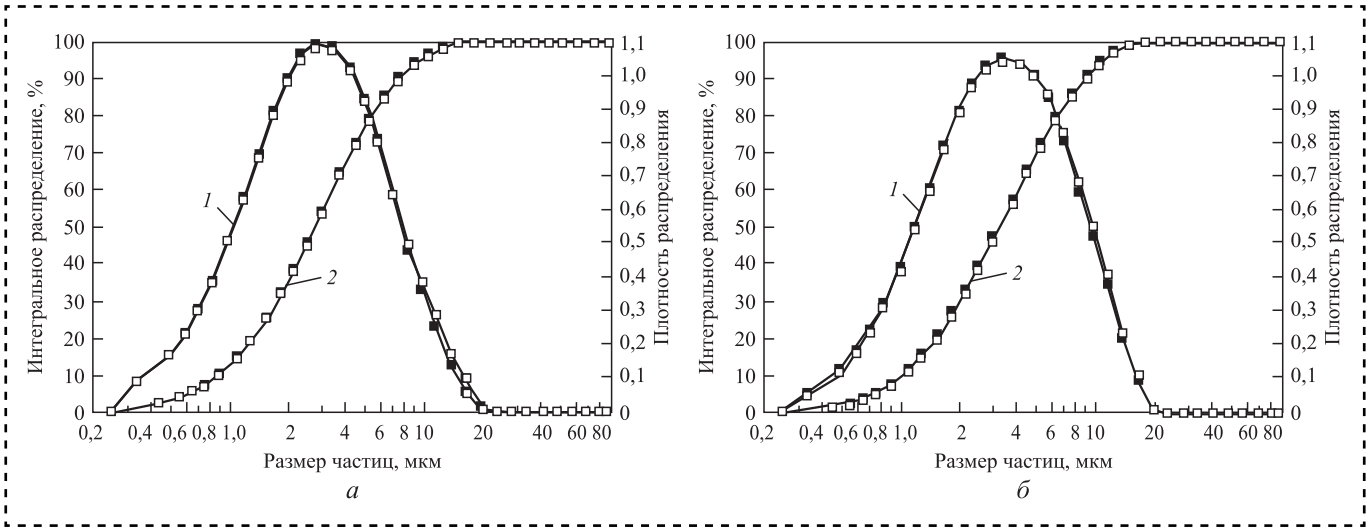


Рис. 3. Кривые распределения частиц СМ1 (*а*) и СМ2 (*б*):
1 — дифференциальная кривая; *2* — интегральная кривая

ний частиц графита S12 и C1 и частиц графита в смазочных материалах СМ1и СМ2.

Метод лазерной дифракции не позволяет определить форму частиц. Для исследования формы частиц порошков C1 и S12 применяли динамический анализатор изображений QICPIC с модулем жидкостного диспергирования LIXELL (рис. 4 на стр. 2 обложки). Полный диапазон измерений 0,55/1,65...1126 мкм. Выбранный диапазон измерений M3 (1...375/1126 мкм). Пределы диапазона измерений по стандарту ISO 13322 — 1,2—4,95...375 мкм.

В жидкостной системе LIXELL проточного типа порошки диспергировали в дистиллированной воде с добавлением поверхностно-активного вещества Tween 80. Измерения выполняли три раза для каждого образца порошка. Для расчета фактора формы определяли:

— EQPC — эквивалентную проекцию окружности, равную проекционной площади реальной частицы (табл. 2, рис. 5 на стр. 2 обложки);

— диаметры Ферета (Feret) — расстояние между минимальным и максимальным размерами частицы, измеренными в перпендикулярном направлении к частице.

Фактор формы вычисляли по формулам:

$$f_{ar} = \frac{\text{Feret}_{\min}}{\text{Feret}_{\max}}, \qquad (1)$$

где f_{ar} — соотношение сторон (aspect ratio) — отношение минимального диаметра Ферета к максимальному диаметру Ферета;

$$f_{sph} = \frac{2\sqrt{\pi A}}{P_{real}}, \qquad (2)$$

где f_{sph} — сферичность (sphericity) — отношение периметра эквивалентной окружности P_{EQPC} к реальному периметру частицы P_{real};

A — площадь частицы.

В табл. 3 приведены численные значения фактора формы для порошков коллоидного графита C1 и S12.

Анализ результатов показывает, что порошок S12 имеет большее число сферических частиц правильной формы (рис. 6 на стр. 2 обложки). На рис. 7 представлена галерея форм

Таблица 2

Средние значения диаметров частиц порошков, мкм

Образец	d_{10}	d_{50}	d_{90}
C1	4,55	9,13	21,29
S12	3,52	6,39	10,30

Таблица 3

Фактор формы частиц порошков коллоидного графита, мкм

Образец	Фактор формы	s_{10}	s_{50}	s_{90}
C1	Соотношение сторон	0,41	0,66	0,83
	Сферичность	0,65	0,83	0,91
S12	Соотношение сторон	0,50	0,69	0,83
	Сферичность	0,73	0,87	0,93

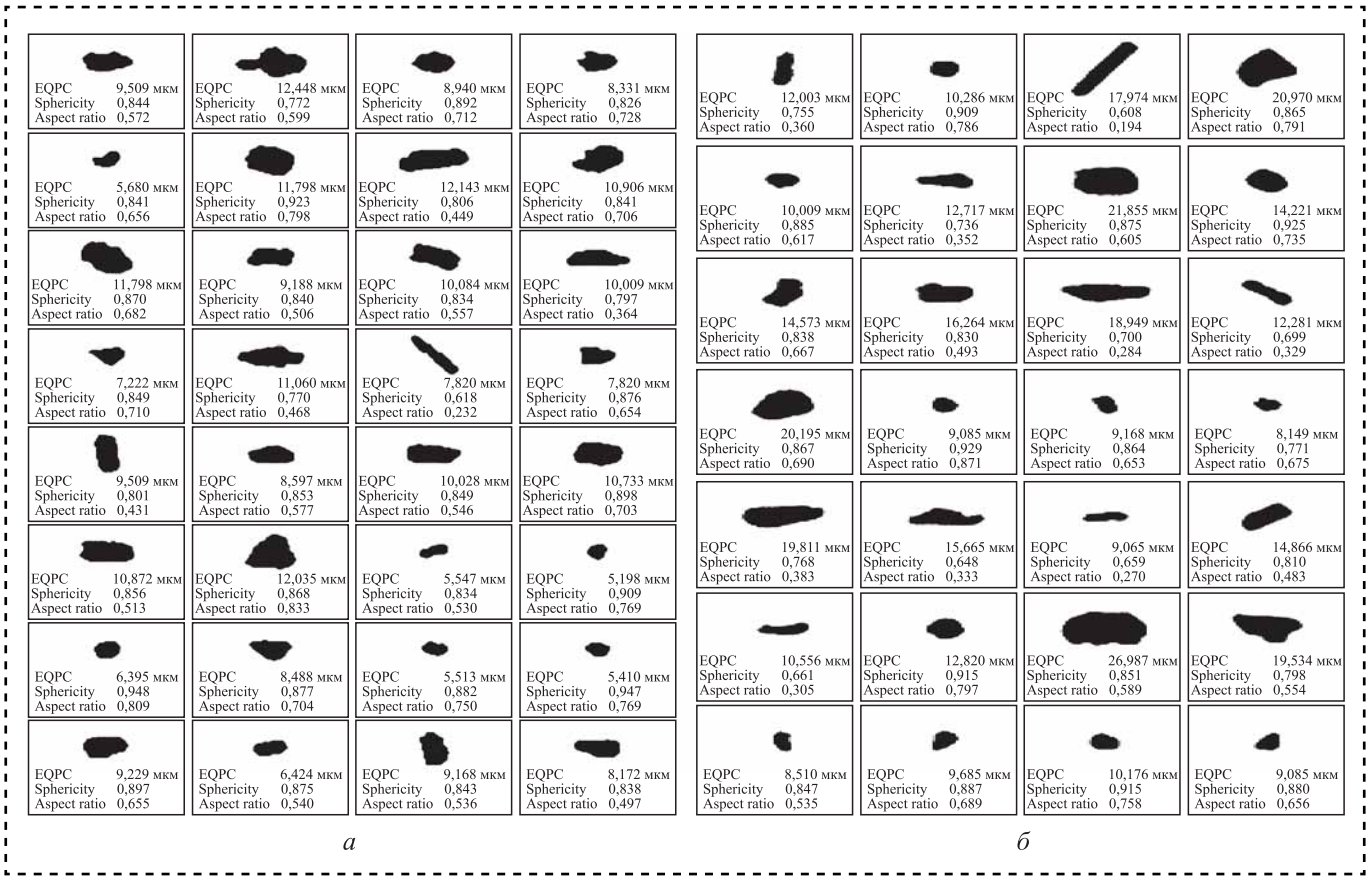


Рис. 7. Галерея форм частиц, мкм:
а — порошок S12 (показано 32 из 67 897 частиц); *б* — порошок C1 (показано 28 из 67 897 частиц)

Таблица 4

Расчетные значения μ для исследуемых СМ

Смазочный материал	Сухой остаток, %	Среднее значение				
		h, мм	r, мм	$T_{ср}$, °C	Значение μ при T, °C	
					$T_{ср}$	100...200
СМ1	32,6	7,0	7,97	149	0,14	0,13...0,15
СМ2	30,5					
Фирма Henkel	31,1	7,0	7,78	161	0,16	0,15...0,17
Фирма Fuchs	32,1					

частиц, полученных по результатам исследования на приборе QICPIC и расчета.

Для оценки технологических свойств СМ на основе коллоидного графита C1 применили метод осадки кольцевого образца [3]. СМ1 и СМ2 — водные на основе коллоидного графита C1. Значения коэффициента трения приведены в табл. 4 [3].

Выводы

1. Порошок коллоидного графита S12 имеет мономодальное распределение размеров частиц сферической формы по сравнению с порошком коллоидного графита C1.

2. Удельная поверхность частиц в СМ на основе порошка коллоидного графита увеличивается более чем в 2 раза.

3. Температура поверхности инструмента (штампа) и заготовки в процессе горячего деформирования влияет на контактное трение пары заготовка—штамп.

Заключение

Качество производства графита и коллоидного графита, в частности, зависит от управления производством и контроля качества. Размеры и форма частиц порошков коллоидного графита зависят от технологии производства.

На последнем этапе приготовления СМ происходит помол графита с соответствующими ингредиентами, что увеличивает более чем в 2 раза удельную поверхность частиц. Мелкие частицы структурируют пленки на поверхности штампа, но при температуре более 500 °С на контакте заготовка—штамп в процессах горячего деформирования не обеспечивают смазочных свойств. В СМ необходимо создавать оптимальное сочетание мелких, средних и крупных частиц графита.

Библиографический список

1. **Merkus H.G.** Particle Size Measurements: Fundamentals, Practice, Quality. Springer Science + Business Media. 2009. 533 p.

2. **Петров А.Н., Логинов Б.А., Петров М.А.** Разработка универсальной методики гранулометрического анализа металлических и неметаллических порошковых материалов, а также тонкой структуры зерен и процессов их агломерации // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 12. С. 36—43.

3. **Петров А.Н.** Коллоидно-графитовые смазочные материалы в процессах горячего деформирования сталей и сплавов. М.: МГМУ "МАМИ", 2012. 212 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 621.735.016.2

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

Повышение износостойкости "дуплексных" покрытий для режущего инструмента путем ионного смешивания

Исследованы пути повышения износостойкости "дуплексных" покрытий, наносимых на режущие инструменты, за счет предварительного диффузионного насыщения поверхности инструмента азотом с последующим физическим осаждением твердого покрытия (Ti, Cr)N. Предложено покрытие, содержащее дополнительный слой с примесью ионов, нанесенный на предварительно азотированную поверхность быстрорежущей стали до осаждения твердого покрытия. Такие многослойные покрытия повышают в 3—4 раза износостойкость режущих инструментов по сравнению с "дуплексными" покрытиями.

The results of the study of the ways of increasing the wear resistance of "duplex" coatings applied to the cutting tools, which, due to the preliminary diffusion of the tool surface saturation with nitrogen (known as ion nitrogen) followed by physical deposition of the hard coating (Ti, Cr), the proposed coating contains an additional layer with an admixture of ions applied to the pre-nitrided surface of the high-speed coating before the deposition of the hard coating. Such multi-layer coatings significantly increase (3—4 times) the wear resistance of cutting tools compared to "duplex" coatings.

Ключевые слова: износ, трение, наноиндентация, микротвердость, упругая и пластическая деформация.

Keywords: wear, friction, nanoindentation, microhardness, elastic and plastic deformation

Режущие инструменты из быстрорежущей стали обычно работают в условиях интенсивного абразивного износа, где схватывание, связанное с наростом, происходит при взаимодействии инструмента с заготовкой. Неизбежный износ покрытия ведет к интенсификации процесса истирания (схватывания), который сопровождается возрастанием интенсивности износа режущего инструмента, и как следствие переходом износа в катастрофическую стадию [1, 2]. Продление стадии нормального трения и износа можно достичь применением дополнительного подслоя в многослойном "дуплексном" покрытии на поверхности подложки инструмента. Этот "триплексный" слой сочетает желаемые защитные и антифрикционные свойства при взаимодействии с обрабатываемым материалом.

Цель работы — исследование износостойкости режущих инструментов с "дуплексным" покрытием, которое дополнительно улучшено ионным смешиванием.

Изучены коэффициент трения и механические свойства модифицированного слоя, а также изменения химического состава и микроструктуры поверхности контакта "режущий инструмент — заготовка".

Рассмотрено новое "триплексное" покрытие, выполненное в три стадии. Подложка из быстрорежущей стали Р6М5 с массовой долей элементов, %: 0,8...0,88 C; 5,0...5,5 W; 5,0...5,5 Mo; 3,8...4,2 Cr; 1,7...2,1 V; остальное — железо, первоначально азотирована методом тлеющего разряда. Перед нанесением твердого покрытия поверхность инструмента модифицирована ионной смесью. На модифицированный слой нанесен слой (Ti, Cr) N методом физического осаждения покрытия (ФОП).

Ионное азотирование подложки из быстрорежущей стали проводили в устройстве NSV 6/10-11 с механической накачивающей системой и источником нагрева в виде тлеющего разряда и постоянных нагревательных элементов. Диаметр камеры 1000 мм, высота 2000 мм. Технологические параметры: плотность тока тлеющего разряда 3 А/м^2, напряжение смещения — 600 В, время азотирования 0,5 ч, давление газа 266 Па.

Твердое покрытие наносили с помощью стандартной катодной дуги в процессе ФОП в устройстве ННВ 6.6-I1 с механической и диффузионной накачивающей системой при вращении образца в камере. Диаметр камеры 800 мм, высота 700 мм. Использовали два титановых катода и один хромовый. Параметры нанесения покрытия: давление реактивного газа (азота) — 3×10^{-1} Па, ток дугового разряда — 100 А, напряжение смещения подложки — 200 В, плотность тока подложки около 15 А/м^2, температура осаждения 500 °С.

Перед осаждением покрытия образцы после ионного азотирования модифицировали ионной смесью из пяти комбинаций различных элементов на высокоэнергетической ионной установке (ионный имплантор) с энергией 40 кэВ при комнатной температуре. Размеры камеры, оборудованной турбомолекулярной накачивающей системой: 50×350×1000 мм. Расстояние между образцами и используемыми пластинами — около 10 мм. Комбинации металлов и неметаллов: Zr + N, W + C, W + N, Ti + N и Al + O. Такие комбинации для ионной смеси выбирали в целях создания слоев с высокой износостойкостью. Типичные используемые дозы — 8×10^{17} ионов/см^2. Плотность тока — 50 мА/см^2. Перед ионным смешиванием изучаемых элементов выполняли травление поверхности элементов ионами аргона. Для уменьшения загрязнения поверхности при осаждении использовали низкотемпературную ловушку для обеспечения низкого фонового давления около $2\cdot10^{-6}$ мм рт. ст.

Характеристики исследуемых многослойных покрытий приведены в табл. 1. Износ покрытий исследовали при точении углеродистой стали 40Х (скорость резания — 70 м/мин, глубина резания — 0,5 мм, подача — 0,28 мм/об, с применением 5%-ной эмульсии СОЖ и без нее). Когда износ по задней грани режущей кромки четырехгранных быстросменных пластинок из быстрорежущей стали с многослойными покрытиями превышал 0,3 мм, считали режущий инструмент непригодным для дальнейшего использования [2—4]. Эффективность ионной модификации (относительный период стойкости инструмента) определена при сравнении времени резания, необходимого для достижения определенного износа, на инструментах с "триплексными" и "дуплексными" покрытиями (табл. 2). Провели восемь испытаний в условиях резания для каждого вида поверхностной модификации.

Фрикционные свойства анализируемой трибопары определяли с помощью адгезиомера [3]. Между двумя полированными образцами из стали 40Х с твердостью 180 НВ устанавливали вращающийся индентор из материала режущего инструмента. Для моделирования идентичных условий механической обработки поверхность образцов нагревали электроконтактным способом в диапазоне температур 150 до 500 °С при приложенной стандартной нагрузке 2400 Н, приводящей к большому пластическому деформированию в области контакта. В качестве адгезионной составляющей коэффициента трения, соответствующей износу при низких и средних скоростях резания, типичных для инструмента из быстрорежущей стали, использовали параметр μ (отношение сопротивления сдвига адгезионных связей, которые образовались между образцом, сделанным из инструментального материала, и обрабатываемой деталью, к кратковременно-

Таблица 1

Характеристики многослойных покрытий

Слой	Параметры "триплексных" покрытий		
	Состав и структура слоя (РФЭС, ЭОС-данные)	Микротвердость $H_{0,5}$, ГПа	Толщина, мкм
Твердое (Ti,Cr)N покрытие (ФОП)	(Ti, Cr)N	26...28	6...8
Модифицированный подслой с ионным смешением (Ti + N)	Твердый раствор N в Ti	9,8	1
Ионно-азотированный подслой в быстрорежущей стали	Однофазный с высоким содержанием нитрида в мартенсите (α-Fe)	11	30...32

Таблица 2

Относительный период стойкости режущего инструмента с "триплексным" покрытием

Элементы смешивания	Без охлаждения	С охлаждением
Al + O	3,0	—
Ti + N	4,0	2,5
Zr + N	0,53	—
W + N	0,4	—
W + C	1,33	—

му пределу текучести более мягкой области контакта при заданной температуре). Значение μ — мера сопротивления разрушению связей [1, 3—7].

Микротвердость и работу упругопластической деформации поверхности модифицированного слоя, азотированного ионами образца из быстрорежущей стали и образца с дополнительной ионной смесью, оценивали по зависимости между нагрузкой и перемещением. На каждом образце выполняли тридцать измерений. Для определения средних кривых индентации использовали стандартные статистические методы. Рассеяние измерений микротвердости составило около 2 %. Экспериментальные кривые индентации близки к расчетным средним кривым, которые использовали для анализа. Полную работу упругой и пластической деформаций при испытании нановдавливанием модифицированных поверхностных слоев рассчитывали с помощью кривых индентации, построенных при приложении нагрузки и ее снятии. Для определения пластической и полной работы деформации для каждого эксперимента кривые индентации, построенные при приложении нагрузки и ее снятии, аппроксимировали полиномом третьего порядка.

Фазовый состав слоя покрытия, полученного методом ФОП, и азотированной подложки исследовали с помощью XRD. Химический и фазовый составы поверхности модифицированных слоев, а также области контакта режущего инструмента и заготовки изучали посредством оже-электронной спектроскопии (ОЭС). Анализ расширенной тонкой структуры электронных спектров потери энергии (EELFAS) и вторично-ионная масс-спектрометрия (ВИМС) выполнены с помощью спектрометра VG ESCALAB MK2. Сканирующую спектроскопию (ОЭС) использовали для анализа состава поверхности фаски износа на косом срезе поверхности режущего инструмента на различных стадиях износа. В каждом из этих случаев для анализа выбирали несколько секторов размером 15×15 мкм.

Лучшая износостойкость после "триплексной" поверхностной обработки достигнута в ионно-модифицированном слое, содержащем Ti и N (см. табл. 2). Зависимость износа по задней поверхности от времени резания для режущего инструмента с "триплексным" покрытием представлена на рис. 1.

Атомную структуру ионно-модифицированного слоя до ФОП-обработки исследовали методом EELFAS. На рис. 2 представлено преобразование Фурье для данных, полученных в результате анализа методом EELFAS поверхности, ионно-модифицированной титаном и азотом. Преобразование Фурье содержит

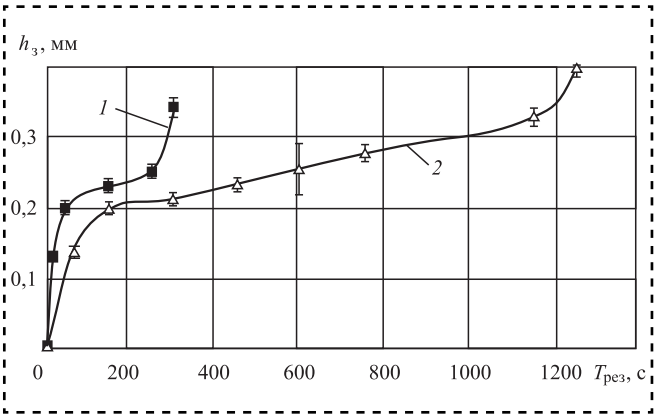


Рис. 1. Влияние времени обработки на износ инструмента по задней поверхности:
1 — ионное азотирование + TiCrN; *2* — ионное азотирование + ионное смешивание + TiCrN

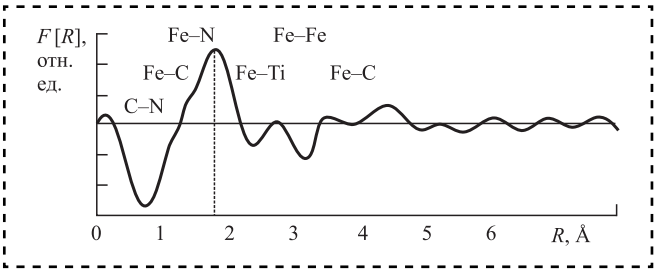


Рис. 2. Преобразования Фурье данных EELFAS пиков обратно рассеянных электронов с поверхности ионно-смешанного слоя

усредненную информацию о структуре ионно-модифицированного слоя после математической обработки электронного спектра [5—7]. Для больших межатомных расстояний степень упорядоченности в кристаллической решетке мала, что доказывает наличие аморфных переходов в слое.

Микротвердость, а также работу, связанную с упругой и пластической деформацией слоя, образованного при ионном смешивании, измеряли нановдавливанием. На рис. 3 показаны кривые зависимости смещения от нагрузки для образцов из быстрорежущей стали после ионного азотирования (*1*) и в случае ионного азотирования с ионно-смешанным слоем (*2*).

По результатам экспериментальных исследований коэффициента трения от температуры обнаружено улучшение условий трения благодаря ионному смешиванию (рис. 4). Различие было более высоким для низких температур, но осталось значительным и для реальных температур резания.

Установлено, что лучший эффект увеличения периода стойкости инструмента достигнут при образовании ионно-модифицированным слоем аморфно-подобной структуры, имеющей более низкий коэффициент трения, улучшенную способность накопления энергии упругой деформации, которые предотвращают глубокое повреждение поверхности. Это реализуется, когда применяется слой, модифицированный смесью Ti + N с помощью ионного смешивания. При резании трибопленки, содержащие кислород, интенсивно развиваются на поверхности ионно-модифицированного слоя, защищая режущий инструмент от износа. Это позволяет продлить устойчивую нормальную стадию износа и значительно увеличить период стойкости инструмента.

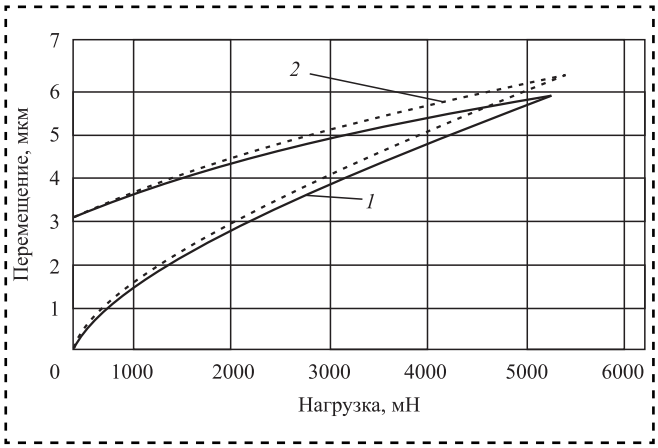


Рис. 3. Влияние нагрузки на перемещение образцов из быстрорежущей стали:
1 — после ионного азотирования; *2* — после ионного азотирования + ионное смешивание

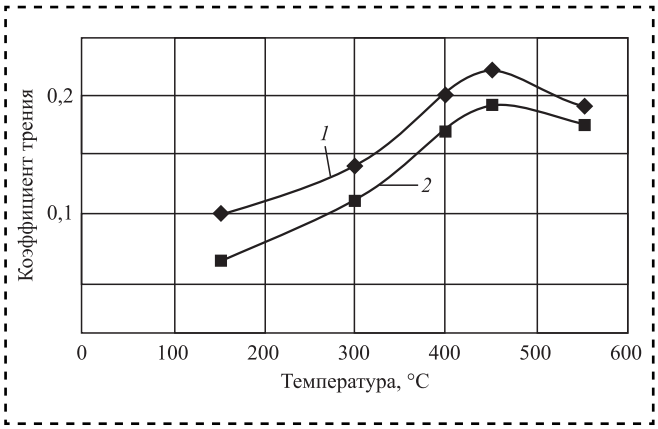


Рис. 4. Влияние температуры на коэффициент трения для образцов из быстрорежущей стали с ионным азотированием (*1*) и ионным азотированием + ионное смешивание (*2*)

Библиографический список

1. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
2. **Шустер Л.Ш., Криони Н.К., Шолом В.Ю., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки в высокотемпературных подвижных сопряжениях и металлообработке. М.: Машиностроение, 2008. 318 с.
3. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 199 с.
4. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение, 2016. 327 с.
5. **Migranov M., Migranova R.** Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 496. P. 75—79.
6. **Vereschaka A.A., Migranov M.S.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials. // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 871. P. 159—163.
7. **Vereschaka A., Migranov M., Vereschaka A., Sharipov O.** Study of wear of tools made of pressed and sintered heterogeneous composite powder materials based on HSS with high melting point compounds // ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences. 2015. Vol. 10. N 20. P. 9282—9286.

УДК 539.3

Н.С. Рапилбекова, *канд. физ.-мат. наук*
(Таразский Государственный Университет, Республика Казахстан)
E-mail: seisennag@list.ru

О распространении тепла при несовершенном теплообмене в сечении двухмерной среды

Исследованы особенности распространения тепла в двухмерной среде, в отдельных сечениях которой могут быть нарушены естественные условия теплопередачи. Рассмотрены две формы теплопередачи — условия идеального и неидеального теплообмена, характерные для многослойных тел с теплофизическими характеристиками, изменяющимися скачкообразно при переходе от слоя к слою.

The researches of heat propagation singularity in two-dimensional medium are carried out in case when natural condition of heat transfer is disturbed. Two condition of heat transfer are considered in this crossection: ideal and non ideal conditions of heat exchange distinctive for many layer body.

Ключевые слова: теплопроводность, теплообмен, термография, тепло, матрица, вектор, нестационарная теплопроводность.

Keywords: heat not fixed thermal conductivity, heat exchange, thermography, heat, matrix, vector, non-stationary heat conductivity.

Введение

Один из эффективных методов неразрушающего контроля технологических несовершенств и эксплуатационных повреждений в слоистых конструкциях — термография, позволяющая по характеру распределения температуры обнаружить дефекты. Однако имеются определенные трудности, связанные с установлением реальных размеров, фактического места расположения обнаруженного методом термографии дефекта. В связи с этим актуально аналитическое изучение влияния на температурное состояние слоистой оболочки отдельных особенностей дефектов. Моделью несовершенства является неидеальный теплообмен между слоями. В отличие от идеального теплообмена, когда на границе раздела слоев выполняются условия равенства температур и тепловых потоков, при неидеальном теплообмене на контактной границе слоев предполагаются выполненными условия конвективного теплообмена, приводящие к разрыву как тепловых потоков, так и температур [1].

Математическая формулировка задачи

Для исследования температуры T^k рассмотрим состоящую из M слоев ($k = 1, 2, ..., M$) слоистую оболочку в цилиндрической системе координат $r^k \leqslant r \leqslant R^k$, $l \leqslant z \leqslant L$. Слои оболочки выполнены из материала с анизотропной теплопроводностью. Осесимметричное температурное состояние изучали с использованием системы уравнений, каждое из которых является уравнением двумерной нестационарной теплопроводности [2, 3]:

$$\rho^k c_\varepsilon^k \partial T^k / \partial t = \lambda_{rr}^k T_{,rr}^k + \lambda_{rz}^k T_{,rz}^k + \lambda_{zz}^k T_{,zz}^k + \left(\lambda_r^k / r\right) T_{,r}^k + \left(\lambda_z^k / r\right) T_{,z}^k + Q^k, \quad (1)$$

где $\lambda_r = \lambda_{\varphi\varphi} + r(\lambda_{rr,r} + 0{,}5\lambda_{rz,z})$; $\lambda_z = r(0{,}5\lambda_{rz,r} + \lambda_{zz,z})$; λ_{rr}^k, $\lambda_{\varphi\varphi}^k$, λ_{zz}^k и λ_{rz}^k — независимые анизотропные коэффициенты теплопроводности в соответствующих направлениях [3];

ρ^k, c_ε^k — удельный вес и удельная теплоемкость материала k-го слоя;

Q^k — внутренние источники тепла.

Индексы после запятой соответствуют операции дифференцирования по соответствующей пространственной координате.

Начальные условия. Предположим, что в начальный момент времени $t = 0$ распределение температуры T^k во всей многослойной среде известно:

$$T^k(r, z; 0) = T_0 = \text{const},$$

где T_0 — температура окружающей среды.

Граничные условия. Предположим, что слои ортогональны оси r. На наружных торцевых поверхностях оболочки сформулирована третья краевая задача теплопроводности — условия конвективного теплообмена. Для произвольного k-го слоя должны быть выполнены условия

$$\begin{aligned} \lambda_{zz}^k T_{,z}^k &= \alpha_1^k \left(T^k - T_0\right) \text{ при } z = 1; \\ \lambda_{zz}^{kk} T_{,z}^k &= \alpha_L^k \left(T^k - T_0\right) \text{ при } z = L, \end{aligned} \tag{2}$$

где α_1^k и α_L^k — коэффициенты теплообмена с окружающей средой на торцевых поверхностях $z = l$ и $z = L$ соответственно, на которых температура окружающей среды составляет T_0, Вт/(м^2·°С).

Так же как и коэффициенты теплопроводности λ_{zz}^k, коэффициенты теплообмена α_l^k и α_L^k изменяются скачкообразно при переходе от слоя к слою и зависят от уровня температуры.

На наружных поверхностях первого и последнего M слоя примем условия конвективного теплообмена:

$$\begin{aligned} \lambda_{rr}^1 T_{,r}^1 &= \alpha_r^1 \left(T^1 - T_0\right) \text{ при } r = r^1; \\ \lambda_{rr}^M T_{,r}^M &= \alpha_R^M \left(T^M - T_0\right) \text{ при } r = R^M. \end{aligned} \tag{3}$$

На внутренней и наружной поверхности оболочки температура окружающей среды равна T_0.

На контактных поверхностях соседних слоев рассмотрим случай, соответствующий условиям идеального теплового контакта, когда на поверхности ($r = R^k = r^{k+1}$), разделяющей k-й и $(k + 1)$-й слои одинаковы тепловые потоки и температуры:

$$\begin{aligned} &\lambda_{rr}^k T_{,r}^k = \lambda_{rr}^{k+1} T_{,r}^{k+1} \text{ и } T^k = T^{k+1} \\ &\text{при } r = R^k = r^{k+1} \ \left(k = 1, 2, \ldots, M - 1\right). \end{aligned} \tag{4}$$

Разберем случай, когда на одной ($k = kk$) из контактных границ условия идеального теплообмена (4) нарушаются. При неидеальном тепловом контакте соседних слоев на поверхностях $r = R^{kk} = r^{kk+1}$, разделяющих слои, заданы два различных условия, соответствующие условиям конвективного теплообмена одного слоя с соседним:

$$\begin{aligned} \lambda_{rr}^{kk+1} T_{,r}^{kk+1} &= \alpha_r^{kk+1} \left(T^{kk+1} - T^{kk}\right) \text{ при } r = r^{kk+1}; \\ \lambda_{rr}^{kk} T_{,r}^{kk} &= \alpha_R^{kk} \left(T^{kk} - T^{kk+1}\right) \text{ при } r = R^{kk}. \end{aligned} \tag{5}$$

Тогда можно записать, что

$$T_{,r}^{k+1} \big/ T_{,r}^k = \left(\lambda_{rr}^k \alpha_r^{k+1}\right) \big/ \left(\lambda_{rr}^{k+1} \alpha_R^k\right); \tag{6}$$

$$\begin{aligned} T^k &= T^{k+1} - \left(\lambda_{rr}^{k+1} \big/ \alpha_r^{k+1}\right) T_{,r}^{k+1}; \\ T^{k+1} &= T^k + \left(\lambda_{rr}^k \big/ \alpha_R^k\right) T_{,r}^k. \end{aligned} \tag{7}$$

Из формулы (6) видно отличие отношений температурных градиентов в соседних слоях от идеального теплообмена. Это отношение становится одинаковым в случае идеального теплообмена (см. формулу (4)) при равенстве во всех точках коэффициентов теплообмена, а отличие прямо пропорционально отношению $\alpha_r^{k+1} \big/ \alpha_R^k$.

Из выражения (7) видно, что при неидеальном теплообмене отличия температур зависят от искомого градиента температуры и величины, обратной температуропроводности материала. При малых коэффициентах теплопроводности и градиенте температуры отличия температур незначительны. Степень отличия температур снижается по мере увеличения коэффициентов теплообмена.

Таким образом, исследование температурного состояния слоистой оболочки осуществляется решением уравнений (1) при сформулированных начальных и граничных условиях.

Задача теплопроводности относительно безразмерных параметров и переменных

Нестационарную задачу теплопроводности решаем в безразмерном виде относительно безразмерных координат. Для этого вводим безразмерные координаты ξ, η, время τ и температуру θ с помощью равенств:

$$\xi^k = \left(r - r^k\right)/L^*;\ \eta = (z-1)/L^*;\ \tau = t/t^*;$$
$$\theta^k(\xi;\eta) = \left[T^k(r,\ z;\ t) - T_0\right]/T^*, \tag{8}$$

где L^*, t^* и T^* — характерная длина, время и температура;

T_0 — температура окружающей среды;

k — номер текущего слоя.

Реальные значения характерной длины, времени и температуры выбирают при решении конкретной задачи.

Уравнения анизотропной теплопроводности относительно безразмерных параметров запишем в виде

$$\partial\theta^k/\partial\tau = \mu^k_{\xi\xi}\theta^k_{,\xi\xi} + \mu^k_{\xi\eta}\theta^k_{,\xi\eta} + \mu^k_{\eta\eta}\theta^k_{,\eta\eta} + \\ + \mu^k_{\xi}\theta^k_{,\xi} + \mu^k_{\eta}\theta^k_{,\eta} + \omega^k, \tag{9}$$

где

$$\mu^k_{\xi\xi} = \mathrm{Fo}^k\,\lambda_{\xi\xi}/\lambda^*;$$

$$\mu^k_{\xi\eta} = \mathrm{Fo}^k\,\lambda_{\xi\eta}/\lambda^*;$$

$$\mu^k_{\eta\eta} = \mathrm{Fo}^k\,\lambda_{\eta\eta}/\lambda^*;$$

$$\mu^k_{\xi} = \mathrm{Fo}^k\,\lambda_{\xi}L^*/\lambda^*;$$

$$\mu^k_{\eta} = \mathrm{Fo}^k\,\lambda_{\eta}L^*/\lambda^*;$$

$$\omega^k = \mathrm{Fo}^k Q^k t^*/T^*\rho^k c^k_{\varepsilon};$$

$$\mathrm{Fo}^k = \lambda^* t^*/(L^*)^2\,\rho^k c^k_{\varepsilon};$$

λ^* — характерная теплопроводность;

ω^k — внутренние источники тепла в k-м слое;

Fo^k — параметр Фурье.

Уравнения теплопроводности (9) должны быть решены при начальном условии $\theta^k(\xi,\ \eta;\ 0) = 0$ и граничных условиях, заданных как на наружных поверхностях, так и на границе контакта соседних слоев.

Граничные условия (2) на наружных поверхностях, ортогональных оси η, принимаем в виде конвективного теплообмена:

$$\theta^k_{,\eta} = \mathrm{Bi}^k_{0\eta}\theta^k \ \text{ при } \eta = 0;$$
$$\theta^k_{,\eta} = -\mathrm{Bi}^k_{L\eta}\theta^k \ \text{ при } \eta = (L-1)/L^*, \tag{10}$$

где

$$\mathrm{Bi}^k_{0\eta} = \alpha^k_{0\eta}\,L^*/\lambda^k_{\eta\eta};$$

$$\mathrm{Bi}^k_{L\eta} = \alpha^k_{L\eta}\,L^*/\lambda^k_{\eta\eta}.$$

Граничные условия на наружных поверхностях, ортогональных оси ξ, принимаются также в виде конвективного теплообмена:

$$\theta^1_{,\xi} = \mathrm{Bi}^1_{0\xi}\left[\theta^1 - \varphi^1_{0\xi}(\eta;\ \tau)\right],\ \ \xi^1 = 0;$$
$$\theta^M_{,\xi} = -\mathrm{Bi}^M_{R\xi}\,\theta^M, \qquad \xi^M = \left(R^M - r^M\right)/L^*, \tag{11}$$

где

$$\mathrm{Bi}^1_{0\xi} = \alpha^1_{0\xi}L^*/\lambda^1_{\xi\xi};$$

$$\varphi^1_{0\xi}(\eta;\ \tau) = \left(T^* - T_0\right)/T^*;$$

$$\mathrm{Bi}^M_{R\xi} = \alpha^M_{R\xi}\,L^*/\lambda^M_{\xi\xi}.$$

Условия на контактных поверхностях могут быть записаны в зависимости от принятой модели теплообмена:

а) идеальный теплообмен —

$$\theta^k_{,\xi} = \left(\lambda^{k+1}_{\xi\xi}/\lambda^k_{\xi\xi}\right)\theta^{k+1}_{,\xi};\ \theta^k = \theta^{k+1}$$
$$\text{при } \xi = \left(R^k - r^k\right)/L^* \text{ и } \xi = 0\ (k = 1, \ldots, M-1); \tag{12}$$

б) неидеальный теплообмен —

$$\theta^{k+1}_{,\xi} = \mathrm{Bi}^{k+1}_{0\xi}\left(\theta^{k+1} - \theta^k\right) \text{ при } \xi^k = 0;$$
$$\theta^k_{,\xi} = -\mathrm{Bi}^k_{R\xi}\left(\theta^k - \theta^{k+1}\right) \text{ при } \xi^k = \left(R^k - r^k\right)/L^*, \tag{13}$$

где

$$\mathrm{Bi}^{k+1}_{0\xi} = \alpha^{k+1}_{0\xi}\,L^*/\lambda^{k+1}_{\xi\xi};$$

$$\mathrm{Bi}^k_{R\xi} = \alpha^k_{R\xi}\,L^*/\lambda^k_{\xi\xi}.$$

Тогда получим:

$$\theta^{k+1} = \theta^k + \theta^{k+1}_{,\xi}/\mathrm{Bi}^{k+1}_{0\xi};$$

$$\theta^k = \theta^{k+1} - \theta^k_{,\xi}/\mathrm{Bi}^k_{R\xi};$$

$$\theta^k_{,\xi} = \left(\mathrm{Bi}^k_{R\xi}/\mathrm{Bi}^{k+1}_{0\xi}\right)\theta^{k+1}_{,\xi}.$$

Уравнения нестационарной теплопроводности (8) должны быть решены при сформулированных граничных и начальных условиях.

Аппроксимация уравнений теплопроводности конечными разностями

Уравнения теплопроводности (8) решим численным методом, модифицированным к двумерным задачам, прямой и обратной прогонки [4].

Конечно-разностная аппроксимация уравнений теплопроводности по времени. Весь промежуток интегрирования по времени делим на N частей точками $\tau_n = n\Delta\tau$, где $\Delta\tau$ — шаг интегрирования. В результате интегрирования уравнения теплопроводности (8) на одном шаге $\Delta\tau$ по времени от момента времени $\tau_n = n\Delta\tau$ до момента времени $\tau_{n+1} = (n+1)\Delta\tau$ получим:

$$\left(\theta^k\right)^{n+1} - z\Delta\tau\left(\mu^k_{\xi\xi}\theta^k_{,\xi\xi} + \mu^k_{\xi\eta}\theta^k_{,\xi\eta} + \mu^k_{\eta\eta}\theta^k_{,\eta\eta} + \mu^k_{\xi}\theta^k_{,\xi} + \mu^k_{\eta}\theta^k_{,\eta} + \omega^k\right)^{n+1} = \Omega^n, \quad (14)$$

где

$$\Omega^n = \left(\theta^k\right)^n + (1-z)\Delta\tau\times$$
$$\times\left(\mu^k_{\xi\xi}\theta^k_{,\xi\xi} + \mu^k_{\xi\eta}\theta,{}^k_{\xi\eta} + \mu^k_{\eta\eta}\theta^k_{,\eta\eta} + \mu^k_{\xi}\theta^k_{,\xi} + \mu^k_{\eta}\theta^k_{,\eta} + \omega^k\right)^n +$$
$$+ z\Delta\tau\left(\omega^k\right)^{n+1} + (1-z)\Delta\tau\left(\omega^k\right)^n.$$

Использованная схема решения является неявной с коэффициентом неопределенности z [5]. При $z = 0$ схема решения преобразуется в явную. Правая часть уравнения считается определенной на основании предшествующих расчетов и интегрирования внутренних источников тепла ω^k на текущем шаге по времени. При $n = 0$ правая часть уравнения (11) определяется внутренним источником тепла ω^k, а также начальными условиями (9).

Конечно-разностная аппроксимация уравнений теплопроводности по пространственным координатам. Для получения дискретных уравнений теплопроводности каждый слой протяженностью $(R^k - r^k)/L^*$ в направлении оси ξ делим на N^k_ξ частей длиной Δ^k_ξ, одновременно длину $(L-1)/L^*$ — на N_η отрезков длиной Δ_η. Точки M^k_{pq} с координатами $\xi^k = p^k\Delta^k_1$ и $\eta = q\Delta_\eta$ — узловые. Узлы $2 \leqslant p^k \leqslant N^k_\xi$ и $2 \leqslant q \leqslant N_\eta$ расположены внутри исследуемой области. Точки с $p^k = 1$ или $p^k = N^k_\xi + 1$ при любом q лежат на поверхности, ограничивающей k-й слой в направлении, ортогональном оси ξ. Точки $q = 1$ или $q = N_\eta + 1$ при любом p^k — граничные узловые точки для текущего слоя k на поверхностях, ортогональных оси η. В любой внутренней узловой точке M^k_{pq} должно быть удовлетворено уравнение теплопроводности:

$$\left(\theta^k\right)^{n+1}_{pq} - z\Delta\tau\times$$
$$\times\left(\mu^k_{\xi\xi}\theta^k_{,\xi\xi} + \mu^k_{\xi\eta}\theta^k_{,\xi\eta} + \mu^k_{\eta\eta}\theta^k_{,\eta\eta} + \mu^k_{\xi}\theta^k_{,\xi} + \mu^k_{\eta}\theta^k_{,\eta}\right)^{n+1}_{pq} = \quad (15)$$
$$= \Omega^{kn}_{pq}.$$

В уравнение (15) входят производные по пространственным координатам до второго порядка, которые заменены их конечно-разностными соотношениями. При аппроксимации производных их точность выбрана одинаковой [6]. В этом случае удобно ввести в рассмотрение векторы-столбцы с компонентами

$$\mathbf{V}^k_p = \left\{\theta^k_{p1},\ \theta^k_{p2},\ \theta^k_{p3},\ \ldots,\ \theta^k_{pN2},\ \theta^k_{p(N\eta+1)}\right\};$$
$$\mathbf{\Omega}^k_p = \left\{\Omega^k_{p1},\ \Omega^k_{p2},\ \Omega^k_{p3},\ \ldots,\ \Omega^k_{pN2},\ \Omega^k_{p(N\eta+1)}\right\} \quad (16)$$

и три диагональные матрицы $A^k_p\left(\left(a_p\right)_{qr}\right)$, $B^k_p\left(\left(b_p\right)_{qr}\right)$, $C^k_p\left(\left(c_p\right)_{qr}\right)$ размерности $(N_\eta - 1, N_\eta + 1)$ с элементами

$$\left(a_p\right)_{q(q-1)} = -z\Delta\tau\left(\mu^k_{\xi\eta}\right)_{pq}\Big/\left(4D^k_\xi\Delta_\eta\right);$$
$$\left(a_p\right)_{qq} = -z\Delta\tau\left[\left(\mu^k_{\xi\xi}\right)_{pq}\Big/\left(\Delta^k_\xi\right)^2 - \left(\mu^k_{\xi}\right)_{pq}\Big/2\Delta^k_\xi\right];$$
$$\left(a_p\right)_{q(q+1)} = z\Delta\tau\left(\mu^k_{\xi\eta}\right)_{pq}\Big/\left(4\Delta^k_\xi\Delta_\eta\right);$$
$$\left(b_p\right)_{q(q-1)} =$$
$$= -z\Delta\tau\left[\left(\mu^k_{\eta\eta}\right)_{p(q-1)}\Big/\left(\Delta_\eta\right)^2 - \left(\mu^k_{\eta}\right)_{p(q-1)}\Big/2\Delta_\eta\right];$$
$$\left(b_p\right)_{qq} =$$
$$= 1 + 2z\Delta\tau\left[\left(\mu^k_{\xi\xi}\right)_{pq}\Big/\left(\Delta^k_\xi\right)^2 + \left(\mu^k_{\eta\eta}\right)_{pq}\Big/\left(\Delta_\eta\right)^2\right];$$
$$\left(b_p\right)_{q(q+1)} =$$
$$= -z\Delta\tau\left[\left(\mu^k_{\eta\eta}\right)_{p(pq-1)}\Big/\left(\Delta_\eta\right)^2 + \left(\mu^k_{\eta}\right)_{p(q-1)}\Big/2\Delta_\eta\right];$$
$$\left(c_p\right)_{q(q-1)} = z\Delta\tau\left(\mu^k_{\xi\eta}\right)_{pq}\Big/\left(4D^k_\xi\Delta_\eta\right);$$
$$\left(c_p\right)_{qq} = -z\Delta\tau\left[\left(\mu^k_{\xi\xi}\right)_{pq}\Big/\left(\Delta^k_\xi\right)^2 + \left(\mu^k_{\xi}\right)_{pq}\Big/2\Delta^k_1\right];$$
$$\left(c_p\right)_{q(q+1)} = -z\Delta\tau\left(\mu^k_{\xi\eta}\right)_{pq}\Big/\left(4\Delta^k_\xi\Delta_\eta\right).$$

Неприведенные элементы матриц A_p^k, B_p^k, C_p^k равны нулю.

Уравнения теплопроводности (15) в произвольной внутренней точке M_{pq}^k произвольного k-го слоя запишем в виде векторного уравнения:

$$A_p^k \mathbf{V}_{p-1}^k + \mathbf{B}_p^k \mathbf{V}_p^k + \mathbf{C}_p^k \mathbf{V}_{p+1}^k = \\ = \mathbf{\Omega}_p^k \left(p = 2,\ 3,\ \ldots,\ N_\xi^k\right). \quad (17)$$

Матрицы A_p^k, B_p^k и C_p^k при $q = 2$ и $q = N_\eta$ содержат элементы, которые находятся в контурных точках ($q = 1$ и $q = N_\eta + 1$) и не принадлежат внутренним точкам исследуемой области. Эти элементы могут быть исключены из рассмотрения, если использовать граничные условия (10) конвективного теплообмена, содержащие в своем составе производные первого порядка. Производные в граничных точках представим их конечно-разностным аналогом через узловые значения искомых переменных с той же степенью точности аппроксимации [6], с какой получен конечно-разностный аналог уравнений теплопроводности (17). Если подставить аппроксимации производных в граничные условия (10), то полученные выражения разрешим относительно температуры в граничных точках. При этом значения температуры в граничной точке M_{p1} выразим через значения в двух соседних внутренних точках исследуемой области:

$$\theta_{p1}^k = \left(D_{10}\right)_p \left(4\theta_{p2}^k - \theta_{p3}^k\right); \\ \left(D_{10}\right)_p = 1\Big/\left[3 + 2\Delta_2 \left(\mathrm{Bi}_{02}^k\right)_{p1}\right]. \quad (18)$$

Аналогично на правом краю в точке $\mathrm{M}_{p(N2+1)}$ температура выражается через значения температуры в двух предыдущих точках:

$$\theta_{p(N\eta+1)}^k = \left(D_{1L}\right)_p \left(4\theta_{pN\eta}^k - \theta_{p(N\eta-1)}^k\right);$$

$$\left(D_{1L}\right)_p = 1\Big/\left[3 + 2\Delta_2 \left(\mathrm{Bi}_{02}^k\right)_{p(N\eta+1)}\right].$$

Если полученные выражения температуры в граничных точках $q = 1$ и $q = N_\eta + 1$ (18) подставить в уравнения теплопроводности (17), то элементы первой и последней строки матриц A_p^k, B_p^k и C_p^k преобразуются:

$$\left(a_p\right)_{22}^* = (a_p)_{22} + 4(D_{10})_p (a_p)_{21};$$

$$\left(a_p\right)_{23}^* = (a_p)_{23} - (D_{10})_p (a_p)_{21};$$

$$\left(a_p\right)_{N\eta(N\eta-1)}^* = (a_p)_{N\eta(N\eta-1)} - (D_{1L})_p (a_p)_{N\eta(N\eta+1)};$$

$$\left(a_p\right)_{N\eta N\eta}^* = (a_p)_{N\eta N\eta} + 4(D_{1L})_p (a_p)_{N\eta(N\eta+2)};$$

$$\left(b_p\right)_{22}^* = (b_p)_{22} + 4(D_{10})_p (b_p)_{21};$$

$$\left(b_p\right)_{23}^* = (b_p)_{23} - (D_{10})_p (b_p)_{21}; \quad (19)$$

$$\left(b_p\right)_{N\eta(N\eta-1)}^* = (b_p)_{N\eta(N\eta-1)} - (D_{1L})_p (b_p)_{N\eta(N\eta+1)};$$

$$\left(b_p\right)_{N\eta N\eta}^* = (b_p)_{N\eta N\eta} + 4(D_{1L})_p (b_p)_{N\eta(N\eta+2)};$$

$$\left(c_p\right)_{22}^* = (c_p)_{22} + 4(D_{10})_p (c_p)_{21};$$

$$\left(c_p\right)_{23}^* = (c_p)_{23} - (D_{10})_p (c_p)_{21};$$

$$\left(c_p\right)_{N\eta(N\eta-1)}^* = (c_p)_{N\eta(N\eta-1)} - (D_{1L})_p (c_p)_{N\eta(N\eta+1)};$$

$$\left(c_p\right)_{N\eta N\eta}^* = (c_p)_{N\eta N\eta} + 4(D_{1L})_p (c_p)_{N\eta(N\eta+1)}.$$

После этих преобразований матрицы A_p^k, B_p^k и C_p^k становятся квадратными с размерностью ($N_\eta - 1$, $N_\eta - 1$). Векторы (16) преобразуются в новые векторы столбцы с ($N_\eta - 1$)-компонентами:

$$\mathbf{V}_p^{*k} = \left\{\theta_{p2}^k,\ \theta_{p3}^k,\ \ldots,\ \theta_{pN\eta}^k\right\}; \\ \mathbf{\Omega}_p^{*k} = \left\{\omega_{p2}^k,\ \Omega_{p3}^k,\ \ldots,\ \omega_{pN\eta}^k\right\}, \quad (20)$$

в которых элементы θ_{p1}^k и $\theta_{p(N\eta+1)}^k$, Ω_{p1}^k и $\Omega_{p(N\eta+1)}^k$ исключены.

Уравнения теплопроводности (17) должны быть решены при начальном условии $\mathbf{V}_p^k = 0$; $\mathbf{\Omega}_p^k = 0$ $\left(p = 2,\ 3,\ \ldots,\ N_\xi^k\right)$.

Граничные условия на наружных поверхностях $\xi^1 = 0$ и $\xi^M = (R^M - r^M)/L^*$:

$$\mathbf{V}_{1,\xi}^k = \mathrm{Bi}_0^1 \left(\mathbf{V}_1^1 - \mathbf{Y}_0\right);$$

$$\mathbf{V}_{N\xi M+1,\xi}^K = \mathrm{Bi}_R^K \left(\mathbf{V}_{N\xi M+1}^K - \mathbf{Y}_R\right).$$

На границе раздела слоев
а) идеальный теплообмен:

$$\mathbf{V}_1^k = \mathbf{V}_{N\xi k+1}^{k-1};$$

$$\mathbf{V}_{N\xi k+1,\,\xi}^{k-1} = G^k \mathbf{V}_{1,\xi}^k;$$

б) неидеальный теплообмен:

$$\mathbf{V}_{1,\xi}^k = \mathrm{Bi}_0^k \left(\mathbf{V}_1^k - \mathbf{V}_{N\xi k+1}^{k-1}\right);$$

$$\mathbf{V}_{N\xi k+1,\xi}^{k-1} = \mathrm{Bi}_R^k \left(\mathbf{V}_{N\xi k+1,\xi}^{k-1} - \mathbf{V}_1^k\right).$$

Алгоритм решения уравнений теплопроводности

Решение векторных уравнений теплопроводности (17) с матрицами (19) относительно векторов $\mathbf{V}_p^{*k}$ строится модифицированным на двухмерный случай методом прямой и обратной прогонки [4]. Метод предполагает, что распределение температуры во внутренних сечениях $\xi = p^k \Delta_\xi^k$ в любом произвольном слое k (k = 1, 2, ..., K) линейно зависит от распределения температуры в следующем сечении $\xi = \left(p^k + 1\right)\Delta_\xi^k$ этого слоя:

$$\mathbf{V}_p^{*k} = X_{p+1}^k \mathbf{V}_{p+1}^{*k} + Y_{p+1}^k \quad \left(p = 2,\ 3,\ \ldots,\ N_\xi^k\right).$$

Если принятые зависимости подставить в уравнения теплопроводности (17), то после несложных преобразований получим:

$$X_{p+1}^k = -\left(B_p^k + A_p^k X_p^k\right)^{-1} C_p^k;$$

$$Y_{p+1}^k = \left(B_p^k + A_p^k X_p^k\right)^{-1}\left(\Omega_p^k - A_p^k Y_p^k\right) \quad \left(p = 2,\ 3,\ \ldots,\ N_\xi^k\right), \tag{21}$$

где $\left(B_p^k + A_p^k X_p^k\right)^{-1}$ — обращенная матрица.

Матрицу X_{p+1}^k и вектор Y_{p+1}^k определяют через их значения в предыдущем сечении $\xi = p^k \Delta_\xi^k$, расположенном внутри исследуемого k-го слоя. Соотношения (21) являются рекуррентными.

Начальные значения матрицы X_2^k и начальный вектор Y_2^k могут быть установлены, если использовать граничные условия (11), (12) и (13) в начальной точке каждого слоя. Относительно введенных равенством (20) векторов $\mathbf{V}_p^{*k}$ граничные условия запишем в виде:

$$\partial \mathbf{V}_1^{*k} \big/ \partial\xi = \mathbf{V}_{1,\xi}^{*k} = X_0^k \left(\mathbf{V}_1^{*k} - Y_{01}^k\right), \tag{22}$$

где $X^k{}_0$ — диагональная матрица с элементами на главной диагонали $\left(\mathrm{Bi}_{01}^1\right)_{1q}$ (q = 2, 3, ..., N_η).

Вектор Y_{01}^k имеет следующие компоненты:

$$Y_{01}^k = \left\{\left(\varphi_{01}^k(\tau)\right)_{12},\ \left(\varphi_{01}^k(\tau)\right)_{13},\ \ldots,\ \left(\varphi_{01}^k(\tau)\right)_{1N\eta-1},\ \left(\varphi_{01}^k(\tau)\right)_{1N\eta}\right\}.$$

В граничных точках производные вектора $\mathbf{V}_{1,\xi}^{*k}$ по пространственной координате ξ представляются их конечно-разностным аналогом через узловые значения искомых переменных с той же степенью точности [6], с какой был получен конечно-разностный аналог (17) уравнений теплопроводности. Если таким образом определенные производные подставить в граничные условия (20), то получим:

$$\mathbf{V}_1^{*k} = X_0^{*k}\left(4\mathbf{V}_2^{*k} - \mathbf{V}_3^{*k}\right) + Y_{01}^{*k}. \tag{23}$$

Если определенное для каждого промежуточного слоя равенство (23) подставить в уравнения теплопроводности (17) при p = 2 рассматриваемого слоя k (k = 1, 2, ..., M − 1), тогда:

$$\mathbf{V}_2^{*k} = X_3^k \mathbf{V}_3^{*k} + Y_3^k, \tag{24}$$

где

$$X_3^k = -\left(B_2^k + 4A_2^k X_0^{*k}\right)^{-1}\left(C_2^k - A_2^k X_0^{*k}\right);$$

$$Y_3^k = \left(B_2^k + 4A_2^k X_0^{*k}\right)^{-1}\left(\Omega_2^k - A_2^k Y_0^{*k}\right).$$

Матрица X_0^{*k} и вектор Y_0^{*k} принимают различные значения в первом (k = 1) слое, который является наружной поверхностью, и промежуточных (k = 2, 3, ..., M) слоях, которые являются поверхностями раздела соседних слоев.

Поверхность ξ = 0 при k = 1. В первом слое (k = 1) в соответствии с условиями (11), (22) и (23) матрица $X^{*k}{}_0$ диагональная со следующими элементами на главной диагонали:

$$X_0^{*k} = \left\{1 \Big/ \left[3 + 2\Delta_\xi^1\left(\mathrm{Bi}_{01}^1\right)_{1q}\right]\right\}, \tag{25}$$

а вектор Y_{01}^{*k} имеет компоненты

$$Y_{01}^{*k} = \left\{2\Delta_\xi^1\left(\mathrm{Bi}_{01}^1\right)_{1q}\left(\varphi_{01}^1(\tau)\right)_{1q} \Big/ \left[3 + 2\Delta_\xi^1\left(\mathrm{Bi}_{01}^1\right)_{1q}\right]\right\}.$$

На первой поверхности в точках M_{1q} первого слоя зависимости (23) и (24) становятся вполне определенными.

Установленные матрица X_3^1 и вектор Y_3^1 позволяют с помощью рекуррентных соотношений (21) определить последовательно вплоть до последней узловой $\left(N_\xi^1+1\right)$ точки $M_{N1\xi+1\,q}$ первого слоя все матрицы X_{p+1}^k и векторы Y_{p+1}^k. Полученный результат дает возможность перейти к рассмотрению следующего слоя.

Внутренние контактные поверхности. По сравнению с соотношениями (25) на промежуточных слоях ($k > 1$) зависимости получаются сложнее. Для формирования условий в начале промежуточного слоя необходимо рассмотреть условия в конце предыдущего слоя. В конце первого слоя уже есть возможность использовать конкретные выражения. Аналогичные выражения в конце предыдущего слоя предполагают известными.

На промежуточных слоях рассмотрим два типа граничных условий, которые соответствуют условиям идеального (12) и неидеального (13) теплообменов. Принятые условия, как при идеальном, так и неидеальном теплообмене, содержат значения производных в конце предыдущего k-слоя. Поэтому, прежде всего, найдем производные в конце предыдущего слоя.

С точностью до малых величин второго порядка [6] производные в последней точке $\left(N_\xi^1+1\right)$ k-го слоя выразим через температуру в соседних предыдущих узловых точках:

$$\left(\partial\mathbf{V}^k/\partial\xi\right)_{N\xi k+1} = -\left(4\mathbf{V}_{N\xi k}^k - \mathbf{V}_{N\xi k-1}^k - 3\mathbf{V}_{N\xi k+1}^k\right)\Big/2\Delta_\xi^k,$$

где

$$\mathbf{V}_{N\xi k}^k = X_{N\xi k+1}^k\mathbf{V}_{N\xi k+1}^k + Y_{N\xi k+1}^k;$$

$$\mathbf{V}_{N\xi k-1}^k = X_{N\xi k}\mathbf{V}_{N\xi k}^k + Y_{N\xi k}^k.$$

Элементы матриц $X_{N\xi k+1}^k$, $X_{N\xi k}^k$, а также составляющие векторов $Y_{N\xi k+1}^k$, $Y_{N\xi k}^k$ определяют при прямой прогонке, тогда:

$$\begin{gathered}\left(\partial\mathbf{V}^k/\partial\xi\right)_{N\xi k+1} = \\ = \left\{\left[3E + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)X_{N\xi k+1}^k\right]\Big/2\Delta_\xi^k\right\}\mathbf{V}_{N\xi k+1}^k + \\ + \left[Y_{N\xi k}^k + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)Y_{N\xi k+1}^k\right]\Big/2\Delta_\xi^k,\end{gathered} \tag{26}$$

где E — единичная матрица соответствующей размерности.

Идеальный теплообмен. При идеальном теплообмене наряду с равенством тепловых потоков имеет место равенство температур на поверхности контакта слоев:

$$\mathbf{V}_{N\xi k+1}^{*k} = \mathbf{V}_1^{*k+1}. \tag{27}$$

Равенство (27) и соотношение (26) позволяют определить матрицу X_0^{*k+1} и вектор Y_{01}^{*k+1} в зависимости (23):

$$\begin{gathered}X_0^{*k+1} = \\ = \left[3\left(E + X_0^{k+1}\right) + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)X_{N\xi k+1}^k\right]^{-1}X_0^{k+1}; \\ Y_0^{*k+1} = \\ = \left[3\left(E + X_0^{k+1}\right) + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)X_{N\xi k+1}^k\right]^{-1}\times \\ \times\left[\left(4E - X_{N\xi k}^k\right)Y_{N\xi k+1}^k - Y_{N\xi k}^k\right],\end{gathered} \tag{28}$$

где X_0^{k+1} — диагональная матрица с элементами на главной диагонали

$$X_0^{k+1} = \left\{\Delta_\xi^k\left(\mu_{\xi\xi}^{k+1}\right)_{1q}\Big/\Delta_\xi^{k+1}\left(\mu_{\xi\xi}^k\right)_{N\xi k+1q}\right\},$$

представляющей собой отношение теплопроводностей двух слоев.

Матрицы $X_{N\xi k}^k$ и $X_{N\xi k+1}^k$ и векторы $Y_{N\xi k}^k$, $Y_{N\xi k+1}^k$ определяются равенствами (21) для узлов N_ξ^k и N_ξ^k+1 предыдущего k-го слоя.

Неидеальный теплообмен. В случае неидеального теплообмена имеет место связь

$$\mathbf{V}_{N\xi k+1}^{*k} = X_1^{k+1}\mathbf{V}_1^{*k+1} + Y_1^{k+1}, \tag{29}$$

где

$$X_1^{k+1} = \left[3E + X_L^k + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)X_{N\xi k+1}^k\right]^{-1}X_L^k;$$

$$\begin{gathered}Y_1^{k+1} = \left[3E + X_L^k + \left(X_{N\xi k}^k - 4E\right)X_{N\xi k+1}^k\right]^{-1}\times \\ \times\left[\left(4E - X_{N\xi k}^k\right)Y_{N\xi k+1}^k - Y_{N\xi k}^k\right].\end{gathered}$$

Матрица X_L^k диагональная с элементами на главной диагонали

$$X_L^k = \left\{2\Delta_\xi^k\left(\mathrm{Bi}_{R\xi}^k\right)_{N\xi k+1q}\right\}.$$

С учетом связи (29) из условия (13) получим:

$$X_0^{*k+1} = \left[3E + X_0^{k+1}\left(E - X_1^{k+1}\right)\right]^{-1}; \quad Y_0^{*k+1} = X_0^{*k+1} X_0^{k+1} Y_1^{k+1}, \tag{30}$$

где X_0^{k+1} — диагональная матрица с элементами на главной диагонали

$$X_0^{k+1} = \left\{2\Delta_{\xi 1}^{k+1}\left(\mathrm{Bi}_{0\xi}^{k+1}\right)_{1q}\right\}.$$

Таким образом, соотношениями (25), (28) и (30) для всех возможных краевых условий, в том числе на промежуточных контактных поверхностях, определены матрица X_0^{*k} и вектор Y_0^{*k}, входящие в равенство (23).

Равенством (24) определены первые значения рекуррентных формул (21) для произвольного слоя. Последовательное их использование (прямая прогонка) устанавливает матрицы X_{p+1}^k и векторы Y_{p+1}^k для всех внутренних точек (p = = 3, 4, ..., N_ξ^k) вплоть до последнего. На правом конце слоя заданы граничные условия (12) и (13). Все они содержат производные, вычисленные в последней точке $N_1^k + 1$, которые находятся из соотношений (26).

Поверхность $\xi = N_\xi^K + 1$. Используем соотношения (26) в граничных условиях (11) на правом конце $\xi = (R^M - r^M)/L^*$ последнего M-го слоя. В соответствии с равенствами (26) и (11) получим:

$$\mathbf{V}_{N\xi M+1}^M = \left[3E + X_L^M + \left(X_{N\xi M}^M - 4E\right)X_{N\xi M+1}^M\right]^{-1} \times \left[\left(4E - X_{N\xi M}^M\right)Y_{N\xi M+1}^M - Y_{N\xi M}^M\right], \tag{31}$$

где X_L^M — диагональная матрица с элементами на главной диагонали

$$X_L^M = \left\{2\Delta_\xi^M\left(\mathrm{Bi}_{R\xi}^M\right)_{(N\xi M+1)q}\right\}.$$

Выражение (31) определяет значение искомого вектора в последней точке последнего слоя. Определив значения искомых переменных во всех внутренних точках последнего M-го слоя, с помощью соотношений (23) найдем значение искомого вектора $\mathbf{V}_1^{*M}$ в первой точке (p = 1) последнего слоя M. Выражения (27) в случае идеального и (29) неидеального теплообмена позволяют найти искомые векторы $\mathbf{V}_{N\xi(k+1)}^{*k-1}$ в последней точке $p = N_\xi^{k-1} + 1$ предыдущего (M − 1)-го слоя. Далее весь расчет последовательно повторяют вплоть до первой точки 1-го слоя текущего и, в последнюю очередь, первого слоя. Когда значения векторов $\mathbf{V}_p^{*k}$ определены полностью во внутренних точках, с помощью (18) устанавливают значения неизвестных температур θ_{p1}^k и $\theta_{p(N\eta+1)}^k$ в крайних точках q = 1 и $q = N_\eta + 1$ на поперечной оси η. Эта операция позволяет завершить решение на одном произвольном шаге по времени.

На основе разработанной методики исследования нестационарной двухмерной краевой задачи теплопроводности составлена программа расчета на языке Фортран, с применением которой выполнены расчеты.

Решим уравнение (1) для прямоугольной пластины из алюминия толщиной (ось x_1) 12 мм и шириной (ось x_2) 100 мм. Теплофизические характеристики алюминия приведены в табл. 1.

Начальная температура пластины постоянна и равна 293 К.

На боковых сторонах пластины приняты условия свободного теплообмена, когда коэффициенты теплообмена равны нулю:

$$\varphi_{02}^k(\xi_1;\ \tau) = 0 \text{ при } \xi_2 = 0;$$
$$\varphi_{L2}^k(\xi_1;\ \tau) \text{ при } \xi_2 = L_2/L^*.$$

Коэффициенты теплообмена α_L на стороне $\xi_1 = L_1/L^*$ пластины приняты равными 5 Вт/(м^2·К), а безразмерная температура окружающей среды на этой поверхности принята равной нулю, т.е. $\varphi_L(\tau,\ \xi_2) = 0$.

Коэффициенты теплообмена α_{01}^1 на стороне $\xi_1 = 0$ пластины приняты равными 1000 Вт/(м^2·К), а безразмерная температура окружающей среды в проведенных вычислениях принята в виде:

$$\varphi_{01}^1(\xi_2;\ \tau) = \begin{cases} A\tau & \text{при } 0 \leqslant \tau \leqslant \tau_1; \\ A\tau_1 & \text{при } \tau_1 \leqslant \tau \leqslant \tau_2; \\ A\tau_1(\tau_3 - \tau)/(\tau_3 - \tau_2) & \text{при } \tau_2 \leqslant \tau \leqslant \tau_3; \\ 0 & \text{при } \tau_3 \geqslant \tau. \end{cases}$$

Таблица 1

Теплофизические характеристики алюминия

Материал	Свойства при 293 К		Теплопроводность, Вт/м·К, при температурах, К				
	γ, г/см^3	c_ε, Дж/кг·К	273	373	473	573	673
Алюминий	2,7	896	202	206	215	228	249

Таблица 2

Относительные значения температуры

Сечение x_1, мм	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5
Температура	0,823	0,761	0,690	0,631	0,582	0,540	0,506	0,477

До момента времени τ_1 температура на границе растет линейно до максимальной $T_{мах}$ = = 653 К (безразмерная максимальная температура A = 1). В промежутке времени от τ_1 до τ_2 температура постоянна, и затем она снижается, достигая нулевого значения в момент времени τ_3.

На рис. 1 и 2 на стр. 3 обложки синие линии соответствуют этапу, когда пластина прогревается через каждые 1,5 мин. Красные линии — на границе сохраняется постоянная повышенная температура. Розовыми линиями обозначен этап остывания при снижении температуры на границе x_1 = 0.

При неидеальном теплообмене наблюдается скачкообразное изменение как градиента температуры, так и температуры. С уменьшением градиента температуры снижается и отличие в значениях температур в соответствии с соотношениями (6).

Уровни температуры на стороне пластины x_1 = 12 мм снижаются по мере приближения к ней сечения с неидеальным теплообменом. В табл. 2 приведены относительные значения температуры в сечении x_1 = 12 мм в зависимости от места расположения сечения с неидеальным теплообменом. Таким образом, измеренная в сечении x_1 = 12 мм температура может дать информацию не только о наличии сечения с несовершенным теплообменом, но и некоторую информацию о месте его расположения. Это обстоятельство важно при применении методов термографии для неразрушающего контроля качества изделия.

Заключение

Нарушенное естественное условие теплопередачи в сечении двухмерной среды смоделировано условиями идеального и неидеального теплообмена. При идеальном теплообмене температуры совпадают, а градиенты температур изменяются скачкообразно на величины, пропорциональные отношению коэффициентов теплопроводности по различную сторону сечения. При неидеальном теплообмене в сечении терпят разрыв как градиенты температур, так и температуры пропорционально теплопроводности.

Библиографический список

1. **Karimbaev T.D., Rapilbekova N.S., Salina N.V.** The Heat Propagation in a Laminate Medium with Ideal and Non-Ideal Heat Exchange between Layers // 2-nd International Conference Advanced Computational Methods in Heat Transfer. Milan, Inaly. 1992.

2. **Юдаев Б.Н.** Теплопередача. М.: Высшая школа, 1973. 359 с.

3. **Рапилбекова Н.С.** Термонапряженное состояние слоистых тел: дис. ... канд. физ.-мат. наук. Алма-Ата, 1993. 290 с.

4. **Гельфанд И.М., Локуциевский О.В.** Метод прогонки для решения разностных уравнений // Введение в теорию разностных схем. М.: Физматгиз, 1962. 340 с.

5. **Марчук Г.И.** Методы вычислительной математики. М.: Наука, 1977. 454 с.

6. **Каримбаев Т.Д., Рапилбекова Н.С.** Численная оценка точности пространственной дискретизации уравнений теплопроводности. Самара: Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11. № 5. С. 138—143.

УДК 621.891

И.А. Буяновский, *д-р техн. наук,* **В.Д. Самусенко**, *канд. техн. наук*
(Институт машиноведения им. А.А. Благонравова РАН)
E-mail: buyan37@mail.ru

Граничная смазка как защита трибосопряжения от износа и заедания при жестком режиме работы

Рассмотрены современные представления о наиболее жестком режиме смазки узлов трения, при котором трущиеся поверхности не разделены сплошным слоем смазочного материала, а защита от заедания и повышенного износа осуществляется граничными слоями, представляющими собой продукты взаимодействия активных компонентов смазочной среды с материалом поверхностей трения. Учтены феноменология процесса граничной смазки, механизма образования и разрушения граничных слоев и их влияние на трение и износ контактирующих тел при различных условиях реализации граничной смазки.

The modern understanding of the most hard mode of lubrication of frictional units at which the rubbing surfaces are not separated by a continuous layer of lubricant, and protection against scuffing and the increased wear is carried out by the boundary layers representing products of interaction of active components of the lubricant environment with material of friction surfaces are considered. The phenomenology of process of boundary lubricantion, to mechanisms of formation and destruction of boundary layers and their influence on friction and wear of the contacting bodies under various conditions of realization of boundary lubricantion are taken into account.

Ключевые слова: граничная смазка, граничные слои адсорбционного происхождения, химически модифицированные слои, анизотропия механических свойств, трибохимические реакции, концепция доли металлического контакта, коэффициент трения, интенсивность изнашивания, переходные температуры, заедание.

Keywords: boundary lubricant, boundary layers of adsorptive origin, chemically modified layers, anisotropy of mechanical properties, tribochemical reactions, share of metal contact, friction coefficient, intensity of wear, transitional temperatures, scuffing.

Граничная смазка (ГС) — это смазка, при которой защита от повышенного трения и высокой интенсивности изнашивания сопряженных поверхностей контактирующих тел, находящихся в нагруженном фрикционном контакте, осуществляется образующимися на поверхностях продуктами их взаимодействия с активными компонентами смазочной среды (граничными слоями). Эти слои по своему происхождению могут быть *адсорбционными*, т.е. образованными вследствие адсорбции (физической или химической) поверхностно-активных компонентов смазочного материала (СМ), либо *химически модифицированными*, т.е. образованными в результате химической (или трибохимической) реакции. В построении граничного слоя могут принимать участие различные надмолекулярные образования.

Этот вид смазки впервые описан английским ученым У.Б. Харди (1864—1934). Значительный вклад в разработку современных представлений о ГС внесли А.С. Ахматов, Ф.Ф. Боуден, Г.В. Виноградов, Б.В. Дерягин, Дж. Израелашвили, Р.М. Матвеевский, Д. Тейбор и др. [1].

В режиме ГС в определенные моменты (при пуске-останове, в "мертвых точках" механизмов возвратно-поступательного движения и т.д.) или постоянно (при малых скоростях перемещения, высоких удельных нагрузках и температурах или при наличии геометрии, затрудняющей реализацию режима жидкостной

смазки) работают практически все тяжелонагруженные узлы трения современных машин и механизмов, смазанные жидкими или пластичными СМ.

Обеспечение эффективной ГС в разы снижает коэффициент трения, *интенсивность изнашивания* и на несколько порядков уменьшает *фрикционный перенос* контактирующих материалов [2]. Трение при ГС — наиболее жесткий режим, реализуемый в смазанных трибосопряжениях, сопровождается изнашиванием контактирующих тел с коэффициентом трения порядка 0,1 ± 0,05. Его величина зависит от состава СМ, материалов трущихся тел, соотношения между контактным давлением и твердостью более мягкого тела, макро- и микрогеометрии фрикционного контакта, скорости относительного перемещения трущихся тел, температуры в зоне фрикционного контакта.

Влияние состава смазочной жидкости на коэффициенты трения в режиме ГС иллюстрирует диаграмма Герси—Штрибека (рис. 1). В зоне реализации ГС (зона I) коэффициенты трения существенно выше, чем при смешанной (зона II) и гидродинамической смазке (зона III).

Введение в смазочное масло *1* антифрикционной присадки приводит к заметному снижению коэффициента трения. При этом снижается число Герси от $А_1$ для масла без присадки

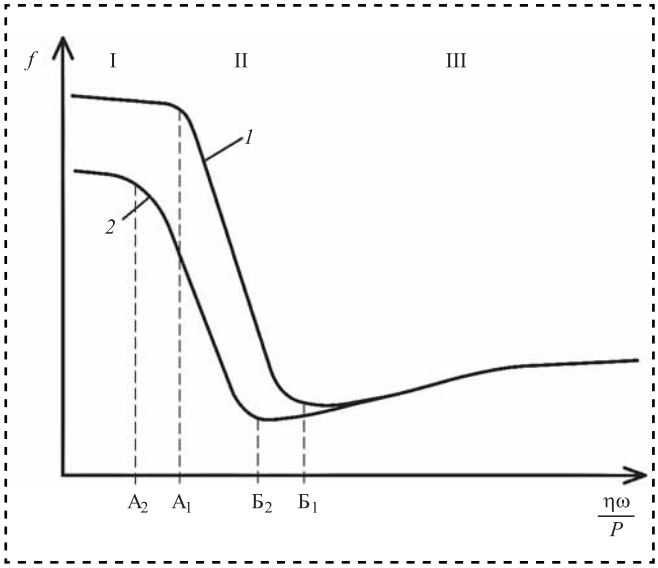


Рис. 1. Диаграмма Герси—Штрибека для минерального масла *1* и того же масла с антифрикционной присадкой *2*: I, II и III — зоны реализации граничной, смешанной и гидродинамической смазки

до $А_2$ для масла с присадкой, т.е. переход от граничной к смешанной смазке осуществляется при меньшем критерии Герси; переход от смешанной смазки к гидродинамической также происходит для смазки с антифрикционной присадкой (точка $Б_2$) при меньшем критерии Герси, чем для масла без присадки ($Б_1$). При больших значениях числа Герси антифрикционная присадка не оказывает заметного влияния на коэффициент трения, который в дальнейшем определяется вязкостью среды.

Граничные слои и их смазочное действие

Граничные слои по своим свойствам (механическим, электрическим, оптическим) сильно отличаются от смазочной среды в объеме. Времена молекулярной диффузии и релаксации на порядки превышают значения соответствующих времен для жидкости в объеме. Граничные слои отличает аномальная *вязкость*: при достаточно малых их толщинах (3...10 молекулярных слоев) вязкость жидкости скачкообразно увеличивается, заметно превышая вязкость среды в объеме, причем наблюдается четко выраженная граница между граничным слоем и объемом жидкости [3]. О строении граничных смазочных слоев, образующихся на контактирующих поверхностях, находящихся в относительном движении, в настоящее время нет установившегося представления.

Согласно традиционным представлениям граничные слои представляют собой высокоупорядоченные пленки, имеющие слоистое строение, причем образующие эти слои молекулы в каждом слое гомеотропно или планарно ориентированы. На индивидуальных пластинах слоистое строение граничных слоев и высокий уровень упорядоченности образующих их молекул смазочной среды многократно подтверждены экспериментально при использовании рентгеновских методов и метода электронной дифракции [2], но в какой мере эта ориентация сохраняется при фрикционном контакте поверхностей, находящихся в относительном движении и сближенных на весьма малые расстояния, в результате чего молекулы среды находятся под воздействием силовых полей обеих контактирующих поверхностей, традиционные представления ответа не дают. Применение атомно-силовой микроскопии и компьютерного моделирования позволило по-

строить модель процесса применительно к трению атомарно гладких поверхностей для ряда модельных смазочных сред, согласно которым в процессе трения граничный слой — в зависимости от нагрузки на фрикционный контакт, температуры и скорости относительного перемещения трущихся тел — может приобрести упорядоченные, частично упорядоченные или полностью разупорядоченные состояния (квазитвердое, квазижидкое, частично аморфизированное), что влечет за собой изменение характера коэффициента трения и его величины [4, 5].

Согласно альтернативной модели анализируемого процесса, фрикционный контакт при ГС представляет собой микропору с подвижной стенкой, а условием существования граничного слоя, разделяющего трущиеся поверхности, является механическое равновесие нормального давления в контакте и противодавления в смазочном слое, которое получают интегрированием уравнения Пойнтинга из условий равновесия смазочного слоя и газовой среды [6].

Смазочное действие граничных слоев адсорбционного происхождения объясняется тем, что:

— граничные слои разделяют трущиеся поверхности на расстояния, превышающие радиус действия адгезионных сил, или обеспечивают значительное снижение адгезионного взаимодействия между контактирующими телами;

— граничные слои обладают значительной анизотропией механических свойств: тончайшие граничные слои способны, не разрушаясь, выдерживать значительные нормальные нагрузки, в то время как при относительно невысоких тангенциальных силах в граничных слоях происходит сдвиг по плоскостям наилучшего скольжения, что обеспечивает незначительные энергетические затраты при сохранении этими слоями высокой несущей способности;

— активные компоненты СМ, взаимодействуя с поверхностями трущихся тел, вызывают их *адсорбционное пластифицирование* (*эффект Ребиндера*), что обеспечивает снижение их сдвиговой прочности в трибологическом контакте.

Смазочное действие *химически модифицированных слоев* объясняется существенно более низким сопротивлением сдвигу этих слоев по сравнению с сопротивлением сдвигу материала подложки, а также повышенной (по сравнению с адсорбцией на стали) прочностью адсорбционных слоев, образовавшихся на химически модифицированных поверхностях.

Благодаря этим явлениям при ГС сдвиговые деформации локализуются в граничном слое или в тончайшем поверхностном слое контактирующих тел, что предохраняет лежащие ниже слои материала трущихся деталей от разрушения, а низкая сдвиговая прочность граничных слоев обеспечивает трибосопряжению защиту от заедания и относительно малые потери на трение.

Трибохимия граничной смазки

Образование и разрушение граничных слоев в значительной степени связано с прохождением ряда взаимосвязанных *трибохимических процессов*. Эти слои образуются в результате активируемых трением взаимодействий между компонентами смазочной среды и материалами контактирующих тел. Химические реакции и адсорбционно-десорбционные процессы при трении существенно отличаются от аналогичных термически активируемых процессов. В зоне трения создаются высокие концентрации энергии и аномальные агрегатные состояния вещества, вследствие чего протекают химические реакции, которые в статических условиях характеризуются более высокими энергиями активации и требуют значительно более высоких температур. Во многих случаях в статических условиях такие реакции маловероятны и даже термодинамически невозможны.

Механическая активация, в частности, имеющая место в трибологическом процессе, непрерывное разрушение защитных пленок в трибологическом контакте, экзоэлектронная эмиссия с поверхностей трения — могут стимулировать химические реакции самого различного характера: разложения, синтеза, обменных реакций и т.д. Энергии активации ряда трибохимических реакций существенно ниже, чем термохимических, скорости трибохимических реакций многократно превышают скорости обычных термохимических реакций, а процесс деградации активных компонентов смазочной среды и превращение их в продук-

ты, не обладающие смазочной способностью, происходит более интенсивно в трибологическом процессе, чем при выдержке в этой среде при той же температуре. Состав и структура граничных слоев определяются не только составом СМ, но в значительной степени и режимом эксплуатации смазываемых узлов трения [7]. К процессам, активируемым трением, в определенной степени следует отнести и образование модифицированных слоев, которые обеспечивают работоспособность узлов трения при тяжелых условиях функционирования [8].

Образование и разрушение граничных слоев

Блок-схема процесса образования и разрушения граничных слоев приведена на рис. 2, который отображает причинно-следственные

Рис. 2. Структурная схема взаимодействия определяющих параметров трибологического процесса при граничной смазке:

О — начальные условия; А — мягкие режимы работы; Б — тяжелые режимы работы; В — катастрофические режимы работы; *1—6* — подсистемы [9]

связи между различными стадиями процесса граничной смазки при начальных условиях (О), мягких режимах работы (А), тяжелых режимах (Б) и катастрофических режимах (В), когда узел трения выходит из строя.

При легких и умеренных режимах трения поверхности трения от непосредственного контакта защищает в основном граничный слой адсорбционного происхождения. Малые потери на трение обеспечивает полимолекулярный граничный слой (толщиной несколько молекулярных размеров), обладающий достаточно высокой несущей способностью. При удельных нагрузках до 5...6 МПа для фрикционного контакта гладких поверхностей и небольших скоростей сдвига этот слой сохраняет толщину 0,02...0,04 мкм и обеспечивает коэффициент трения лишь немногим больший, чем при жидкостной смазке (0,005...0,01) и крайне низкую интенсивность изнашивания. При более высоких контактных давлениях и температурах адсорбированные молекулы выдавливаются из контакта, полимолекулярный слой становится тоньше, причем, чем ближе слой к поверхности, тем прочнее связь составляющих его молекул с этой поверхностью.

Наиболее прочно связан с поверхностью *мономолекулярный* слой (толщиной в одну молекулу) адсорбированных на ней молекул; он позволяет заметно снизить трение твердых тел, но не обеспечивает эффективной защиты от износа. Адсорбированные молекулы активного компонента СМ локализуют участки, на которых осуществляется металлический контакт. По вершинам микронеровностей коэффициент трения f определяется энергетическими потерями на участках поверхностей, покрытых смазочным слоем, и на участках непосредственного металлического контакта. Согласно модели Боудена [2], суммарный коэффициент трения f при таком режиме:

$$f = \alpha f_м + (1 - \alpha) f_с,$$

где α — доля металлического контакта;

$f_м$ и $f_с$ — коэффициенты трения для сопряжений металл—металл без смазочной среды и для той же пары, но полностью смазанной, соответственно.

На участках металлического контакта наблюдали умеренное адгезионное изнашивание по вершинам отдельных микронеровностей. Ужесточение режима трения приводит к росту

температур, дезориентации и десорбции молекул СМ, увеличению α и отсюда — росту коэффициента трения и интенсивности изнашивания. В этих условиях адсорбционный слой уже не обеспечивает эффективное антифрикционное и противоизносное действие, и происходит переход к условиям реализации тяжелого режима ГС. Определенный эффект может быть достигнут в результате реализации *избирательного переноса* или образования *трибополимерных* граничных слоев, что обеспечивает низкие коэффициенты трения и малую интенсивность изнашивания, но в достаточно узком интервале нагрузок и температур [1, 10].

Другой путь расширить зону эффективности действия граничных слоев адсорбционного происхождения — применение углеродных покрытий-ориентантов [11]. При дальнейшем ужесточении режима трения необходим переход на защиту трущихся поверхностей химически модифицированными граничными слоями, имеющими более высокую *температурную стойкость,* чем адсорбционные граничные слои.

Современные СМ, предназначенные для смазывания узлов трения, работающих в жестких условиях, содержат химически активные присадки, т.е. продукты, содержащие в связанном виде серу, хлор, фосфор и т.д. Первая стадия взаимодействия этих присадок с рабочими поверхностями узлов трения — адсорбция. Поскольку эти продукты обладают некоторой поверхностной активностью, они при невысоких нагрузках и температурах образуют адсорбционные слои, которые обеспечивают защиту от износа и заедания в условиях группы А. При ужесточении режима работы узла трения и переходе в группу Б (повышение нагрузок и температур) присадка разлагается, выделяя химически активный элемент (или фрагмент молекулы, его содержащий), который вступает во взаимодействие с металлом рабочих поверхностей трущихся деталей, образуя модифицированный слой, обладающий пониженным сопротивлением сдвигу, вследствие чего коэффициент трения снижается, а достаточно жесткий адгезионный износ сменяется существенно менее интенсивным коррозионно-механическим изнашиванием. Переход от смазывания адсорбционным слоем к смазыванию химически модифицированным слоем при достижении определенной, постоянной для данного сочетания смазочной среды и материалов контактирующих тел доле площади трибологического контакта, реализуется при температуре $T_{хм}$:

$$T_{хм} = \frac{E_p}{R \ln\left(B_3 C^n \mathrm{v}^{-y} \left(\frac{H}{p}\right)^y\right)},$$

где E_p — энергия активации процесса образования модифицированного слоя;

C — концентрация химически активного агента, содержащегося в смазочной среде;

n — порядок процесса;

v — скорость относительного перемещения трущихся тел;

H — твердость более мягкого из контактирующих тел;

p — удельная нагрузка в трибологическом контакте;

B_3 и y — постоянные уравнения, зависящие от макро- и микрогеометрии контакта;

R — газовая постоянная.

По мере изнашивания химически модифицированный слой возобновляется до тех пор, пока не истощится запас реагента в СМ (см. рис. 2, подсистема *5*, группа Б блок-схемы). Вследствие этого доля непосредственного металлического контакта возрастает настолько, что начинается интенсивный адгезионный износ, заедание узла трения, необратимая порча рабочих поверхностей и выход из строя узла трения (см. рис. 2, подсистема *6*, группа В).

Разрушение граничных слоев, разделяющих трущиеся тела, приводит к резкому увеличению коэффициента трения, сопровождаемому скачкообразным его изменением, как при трении в отсутствии СМ, и переходом к интенсивному адгезионному изнашиванию.

Это разрушение реализуется при условиях:

— превышения температуры в зоне трибологического контакта свыше *температурной стойкости* данного СМ;

— пластической деформации подложки, приводящей к выносу из контакта ее смазанных участков поверхности, покрытых граничным слоем, и к вступлению в контакт участков ювенильного металла;

— срабатывания активных компонентов СМ вследствие трибохимических превращений, ведущих к потере СМ смазочной способности.

Условия, при которых это происходит, могут быть оценены из уравнения для расчета критической температуры $T_{кр}$, при которой происходит заедание трущихся тел вследствие повышения до критического числа фрикционных связей между контактирующими телами на участке металлического контакта;

$$T_{кр} = \frac{E_x}{R \ln\left[\alpha_м B v^{-m} \frac{p}{H}\right]},$$

где E_x — энергия активации образования фрикционных связей;

B и m — постоянные уравнения, зависящие от макро- и микрогеометрии контакта;

$\alpha_м$ — доля металлического контакта, зависящая при смазке адсорбционным слоем от соотношения между процессами адсорбции и десорбции активных компонентов смазочной среды, а при смазке химически модифицированным слоем — от соотношения между процессами образования и разрушения модифицированного слоя вследствие его изнашивания (функция концентрации).

В обоих случаях $\alpha_м$ зависит от концентрации активных компонентов (адсорбционно- или химически активных) в смазочной среде, и от энергий активации процессов образования/разрушения граничных слоев [9].

Заключение

1. Граничная смазка реализуется практически в любых смазанных узлах трения при пуске-останове, перегрузах, прекращении подачи СМ в трибологический контакт или по другим причинам, препятствующим разделению контактирующих элементов узла трения.

2. Граничную смазку осуществляют граничные слои, которые образуются как продукт взаимодействия (физического, физико-химического или химического) активных компонентов смазочной среды с элементами материала структуры, контактирующих тел.

3. Образование граничных слоев зависит как от химического состава активных компонентов среды, так и от уровня напряженности узла трения. При легких режимах трения достаточное смазывающее действие обеспечивает слой адсорбированных молекул среды. Образование модифицированного слоя при жестких режимах трения представляет собой многостадийный гетерогенный химический процесс, описание которого осложнено необходимостью учета поступления реагента в зону реакции путем диффузии как через смазочную среду, так и через уже образовавшуюся на поверхности твердую пленку продуктов этой реакции.

Библиографический список

1. **Буяновский И.А.** Граничная смазка. В кн.: Современная трибология: Итоги и перспективы / отв. ред. К.В. Фролов. М.: Изд-во ЛКИ, 2008. С. 226—278.
2. **Боуден Ф.Ф., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел. Ч. 2 / пер. с англ. М.: Машиностроение, 1968. 543 с.
3. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения. М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
4. **Справочник** Шпрингера по нанотехнологиям. В 3 т. Т. 2 / под ред. Б. Бхушана. М.: Техносфера, 2010. С. 438—456.
5. **Ляшенко Я.А., Хоменко А.В., Метлов Л.С.** // Трение и износ, 2011. Т. 32. № 2. С. 157—170.
6. **Васильев Ю.Н., Фуголь В.А.** Математическая модель трения и изнашивания поликристаллических твердых тел // Трение и износ. 2010. Т. 31. № 2. С. 127—143.
7. **Kajdas Cz.** Tribochemistry / ed. by G. Totten and Hong Liang // Surface Modification and Mechanisms. NY — Basel: Marchel Dekker, 2004. P. 99—164.
8. **Buyanovsky I.A., Ignatieva Z.V., Zaslavsky R.N.** Tribochemistry of boundary lubrication processes // Surface modification and mechanisms. 2004. P. 424—488.
9. **Буяновский И.А.** Температурно-кинетический метод оценки температурных пределов работоспособности смазочных материалов при тяжелых режимах граничной смазки // Трение и износ. 1993. Т. 14. № 1. С. 129—142.
10. **Гаркунов Д.Н.** Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. М.: Изд-во МСХА, 2004. 384 с.
11. **Твердые** углеродные покрытия и граничная смазка стальных деталей / Ю.Н. Дроздов и др. // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 4. С. 56—63.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 06.06.2019. Подписано в печать 25.07.2019. 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.