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: 01.02.00 – МЕХАНИКА, 05.02.00 – МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ, 05.04.00 – ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЕ, МЕТАЛЛУРГИЧЕСКОЕ И ХИМИЧЕСКОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ, 05.05.00 – ТРАНСПОРТНОЕ, ГОРНОЕ И СТРОИТЕЛЬНОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

2018 Том 19 **9 (218)**

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

Волков Г.Ю., Смирнов В.В. Повышение надежности и снижение пульсации расхода планетарных роторных гидромашин с последовательно соединенными секциями 387

Крыхтин Ю.И., Карлов В.И. К разработке математической модели нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора механических трансмиссий 391

Современные технологии сборки

Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В. Сборка соединений из разнородных материалов давлением импульсного магнитного поля 396

Питание сборочных линий. Комплектация. Складирование. Упаковка

Сорокин М.Н. Решение трехпараметрической задачи комплектования частного вида (часть 2) 402

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Афанасьева Ю.Д., Мигранов А.М. Многослойные покрытия системы Ti—TiN для режущего инструмента 409

Трение и смазка в машинах и механизмах

Дунаев А.В., Павлов О.Г., Пустовой И.Ф., Рыжов В.Г. Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании серпентиновых геомодификаторов трения 414

Емаев И.И., Криони Н.К., Минасов Б.Ш., Шустер Л.Ш., Якупов Р.Р. Зависимость износа эндопротезов тазобедренного сустава от показателей адгезионного взаимодействия пары трения "головка — вкладыш" 419

В помощь конструктору, технологу

Звягинцев В.А., Дергунов Р.И. Разработка методики ассоциативного проектирования каркасов приспособлений для узловой и агрегатной сборки элементов конструкции планера самолета с использованием Siemens NX Product Template Studio 423

Водолазская Н.В. Расчет параметров определенных технических систем на основе моделирования их сборочных процессов 425

Петров Н.В., Друзьянова В.П., Григорьев С.И., Старостин К.В. Верификация математической модели двигателя внутреннего сгорания, работающего на биогазовом топливе 430

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

БРЯНСК

О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

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

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

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", 2018

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION BY GROUPS OF SCIENTIFIC SPECIALTIES: 01.02.00 — MECHANIC, 05.02.00 — MECHANICAL ENGINEERING AND MACHINE SCIENCE, 05.04.00 — POWER, METALLURGICAL AND CHEMICAL MECHANICAL ENGINEERING, 05.05.00 — TRANSPORT, MINING AND CONSTRUCTION MECHANICAL ENGINEERING

2018 Vol. 19 **9 (218)**

CONTENTS

Manufacturability of a construction

Volkov G.Yu., Smirnov V.V. Increase in reliability and decrease in the pulsation of the expense of planetary rotor hydraulic machines with consistently connected to sections 387

Krykhtin Yu.I., Karlov V.I. To development of mathematical model of loading the friction plasma coating of the cone for inertial synchronizer of mechanical transmissions 391

Modern technologies in assembly

Samohvalov V.N., Samohvalova Zh.V. Assembly of connections from different materials by pressure of the pulse magnetic field 396

Feeding of assembly lines. Packaging arrangement. Stocking. Packing

Sorokin M.N. Solution of a three-parametrical problem of matching of a certain look (part 2) 402

Quality assurance. Testing. Monitoring

Migranov M.Sh., Shekhtman S.R., Afanasyeva Yu.D., Migranov A.M. Multi-coating system Ti—TiN for cutting tool 409

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Dunaev A.V., Pavlov O.G., Pustovoi I.F., Ryzhov V.G. Mechanisms of the formation of triborate when using geomodificators friction 414

Emaev I.I., Krioni N.K., Minasov B.Sh., Shuster L.Sh., Yakupov R.R. Dependence of deterioration of hip joint endoprostheses from parameters of coupling of pair friction "head — liner" 419

Industrial and design engineer's aid

Zvyagincev V.A., Dergunov R.I. Development of a technique for associative design of tool frameworks for nodal and aggregate assembly of airframe design components using Siemens NX Product Template Studio 423

Vodolazskaya N.V. Calculation of parameters of certain technical systems on the basis of modeling of their assembly processes 425

Petrov N.V., Druzyanova V.P., Grigoryev S.I., Starostin K.V. Verification of the mathematical model of an internal combustion engine using biogas fuel . . . 430

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

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N.KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

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", 2018

УДК 621.65.03

Г.Ю. Волков, *д-р техн. наук,* **В.В. Смирнов**
(Курганский государственный университет)
E-mail: vlkv48@mail.ru

Повышение надежности и снижение пульсации расхода планетарных роторных гидромашин с последовательно соединенными секциями*

Предложены новые конструкции планетарных роторных гидромашин (ПРГМ) с последовательно соединенными секциями. В них обеспечено теоретическое отсутствие колебаний расхода рабочей среды и улучшены условия взаимодействия сателлитов с торцовыми стенками. Новые гидромашины предназначены для работы в режимах насоса и двигателя.

New designs of planetary rotor hydraulic machines with consistently connected sections are offered. In them the theoretical lack of fluctuations of an expense of task environment is provided and conditions of interaction of satellites with face walls are improved. New hydraulic machines are intended for work in the modes of the pump and engine.

Ключевые слова: планетарный механизм, роторная гидромашина, расположение каналов, площадь сечения каналов, повышение надежности, снижение пульсации.

Keywords: planetary mechanism, rotor hydraulic machine, porting, cross-sectional area of channels, increase in reliability, decrease in a pulsation.

Развитие новых технологических направлений, в частности, 2D-технологий, позволяет изготавливать планетарные роторные гидромашины (ПРГМ) с некруглыми зубчатыми колесами при сравнительно небольших затратах. В связи с этим становится актуальным более глубокое изучение подобных гидромашин с различных точек зрения. Наименее исследованы схемы ПРГМ с одинаковыми числами волн ротора и статора (рис. 1).

Характерная особенность таких схем — малое число и малые размеры сателлитов. Достоинства данной конструкции — малые механические потери и большой полезный объем ПРГМ, недостаток — неравномерный расход рабочей среды. Малые размеры сателлитов не позволяют сделать достаточно широкими входные и выходные каналы в односекционных ПРГМ.

Обе проблемы решаются последовательным соединением двух однотипных секций ПРГМ 2×2 или 3×3 [1] (рис. 2). Такая машина состоит из двух последовательно соединенных секций I и II. Каждая секция содержит два некруглых центральных колеса, одно из которых (подвижное) *1* имеет внешние зубья, а другое (неподвижное) *2* — внутренние, взаимодействующие с центральными колесами плавающие сателлиты *3*, а также торцовые стенки *5* и систему каналов *4* подвода и отвода рабочей среды. Оба центральных колеса *1* и *2* имеют одинаковое число зубьев $Z_1 = Z_2$ и одинаковое число волн $M = N$ (в данном случае $M = N = 2$). Секции I и II отделены друг от друга плоской перегородкой *6*. Подвижные центральные колеса *1* секций I и II закреплены на общем центральном валу без относительного поворота, неподвижные центральные колеса *2* с внутренними зубьями развернуты друг относительно друга на угол 90°. В торцо-

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Курганской области в рамках научного проекта №17-48-450262.

sb918.indd 387 06.09.2018 8:22:34

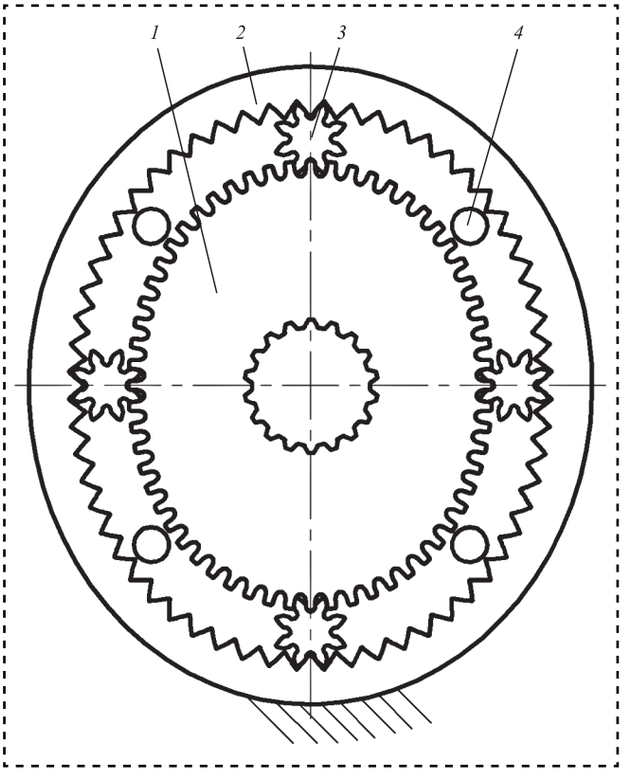


Рис. 1. Схема ПРГМ 2×2, состоящей из одной секции [1]:
1 — центральное колесо с внешними зубьями; *2* — центральное колесо с внутренними зубьями; *3* — сателлиты; *4* — каналы подвода и отвода рабочей среды

вой стенке секции I выполнены два канала *4* подвода рабочей среды, в торцовой стенке секции II выполнены два канала *4* отвода рабочей среды. В плоской перегородке *6*, разделяющей секции, выполнены два перепускных канала, смещенные относительно каналов подвода и отвода среды на угол 90°. Размер всех каналов в окружном направлении превышает внешний диаметр сателлитов.

Данная конструкция имеет следующие недостатки: торцовые стенки гидромашины ослаблены каналами, уменьшена их рабочая поверхность, что вызывает износ и опасность заедания; статическое давление и скоростной напор рабочей среды прижимают сателлиты к одной из стенок, что усугубляет первую опасность. В результате снижается надежность гидромашины.

Для устранения указанных недостатков двухсекционной ПРГМ предложено [2] каналы подвода и отвода рабочей среды выполнять в цилиндрической зубчатой поверхности неподвижного волнообразного центрального колеса с внутренними зубьями (рис. 3). При этом угловая протяженность δ каждого канала подвода и отвода рабочей среды составляет:

$$\delta = (90^\circ \pm 5^\circ)/M, \qquad (1)$$

где M — число волн каждого из волнообразных центральных колес.

В такой конструкции гидромашины торцовые стенки не ослаблены каналами, их рабочая поверхность не уменьшена. Статическое

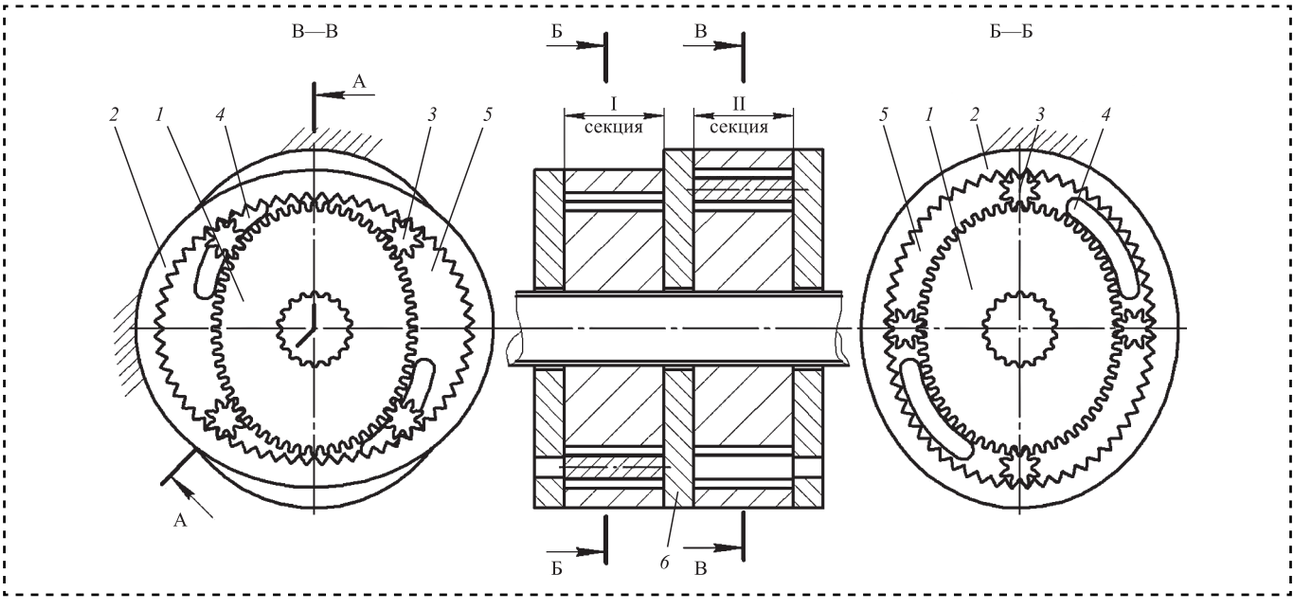


Рис. 2. Двухсекционная ПРГМ 2×2 [1]

sb918.indd 388 06.09.2018 8:22:34

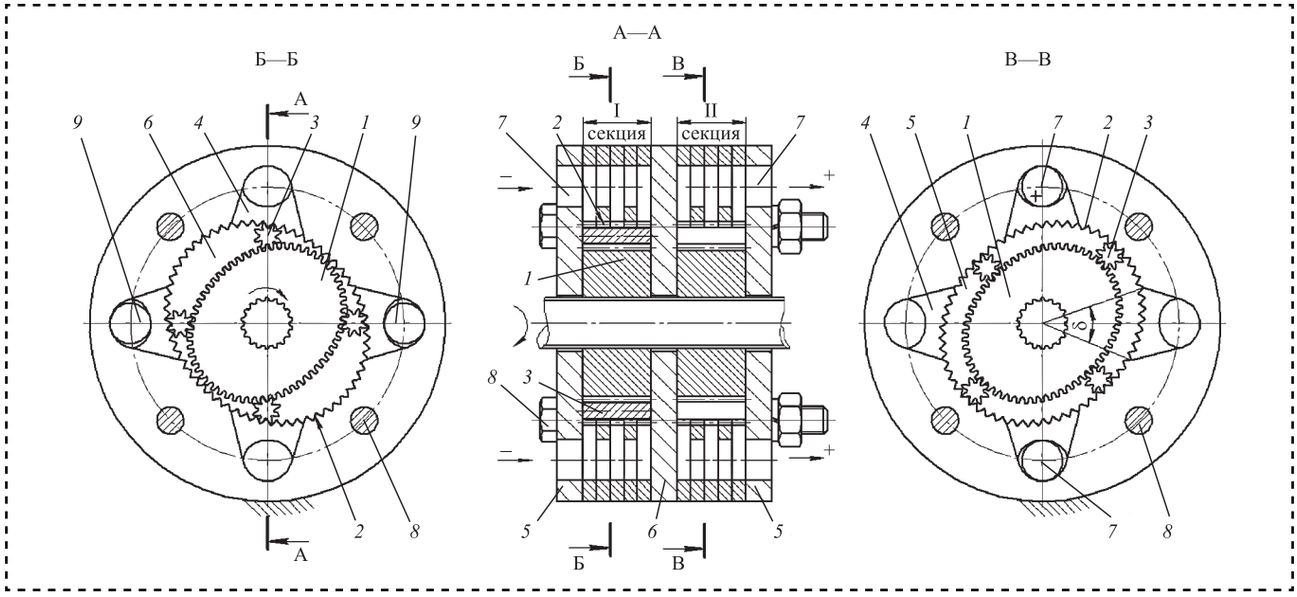


Рис. 3. Двухсекционная ПРГМ с каналами, выходящими на цилиндрическую рабочую поверхность центрального колеса, имеющего внутренние зубья [2]

давление и скоростной напор рабочей среды не прижимают сателлиты к одной из торцовых стенок. В результате снижается износ и опасность заедания деталей гидромашины.

Указанный технический результат может быть получен именно в гидромашине, которая состоит из двух последовательно соединенных секций. По сравнению с односекционной гидромашинной (см. рис. 1), две секции позволяют многократно увеличить площадь сечения каналов подвода и отвода рабочей среды, что дает возможность использовать гидромашину на достаточно вязких средах (жидкостях). При этом двух секций достаточно. Третья секция лишь усложнит конструкцию, увеличит ее габаритные размеры и приведет к протечкам рабочей среды.

С учетом существующих в настоящее время способов изготовления некруглых зубчатых колес, рациональна конструкция гидромашины (см. рис. 3), в которой волнообразные центральные колеса *2* с внутренними зубьями, выполнены из дисков, имеющих радиальные пазы *4*, выходящие на цилиндрическую зубчатую поверхность колеса *2*. При этом диски стянуты между собой (например, при помощи силовых шпилек *8*) торцовыми крышками *5*, содержащими осевые отверстия каналов *7*.

Кардинальное решение проблемы неравномерности расхода рабочей среды в двухсекционной ПРГМ достигается выбором особого контура центроид центральных зубчатых колес ПРГМ [3]. Предлагаемые центроиды волнообразных центральных колес *1* и *2* содержат по два ($M = N = 2$) участка, являющихся окружностями максимального радиуса (R_{max}), столько же участков, являющихся окружностями минимального радиуса (R_{min}), и расположенные между ними участки, обеспечивающие плавный переход от R_{max} к R_{min} (рис. 4). Угловая протяженность Δ_R каждого участка центроиды с максимальным радиусом R_{max} равна угловой протяженности участка центроиды с минимальным радиусом R_{min} и составляет:

$$\Delta_R = 180°/(Mn).$$

Число последовательно соединенных секций $n = 2$, число волн центральных колес *1* и *2*, $M = N = 2$, поэтому $\Delta_R = 180°/(2 \cdot 2) = 45°$. Угловая протяженность $\delta_п$ каждого переходного участка тоже 45°. Разность как максимальных R_{max} так и минимальных R_{min} радиусов центроид центральных колес с внутренними *2* и внешними *1* зубьями равна сумме соответствующих начальных радиусов сателлита *3*. Каналы *4* подвода и отвода рабочей среды открыты в периоды прохождения сателлитами *3* переходных участков. Угловая протяженность δ каждого канала *4* подвода и отвода соответствует угловой протяженности $\delta_{п2}$ переходного участка венца центрального колеса *2* с внутренними зубьями и составляет $\delta = 45°$.

sb918.indd 389 06.09.2018 8:22:35

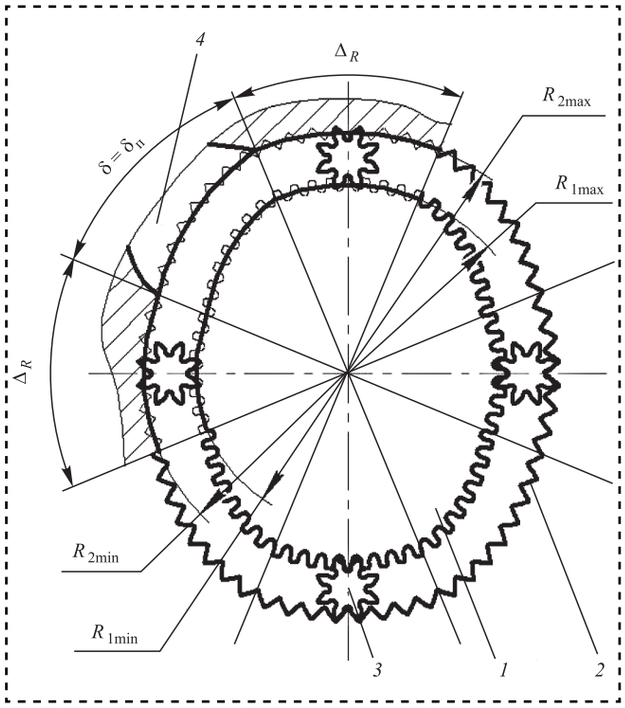


Рис. 4. Контуры центроид колес двухсекционной ПРГМ, обеспечивающие отсутствие пульсации потока [3]

Гидромашина работает следующим образом. При вращении центральных колес *1* с внешними зубьями, взаимодействующие с этими колесами плавающие сателлиты *3* обкатываются по внутренним зубчатым венцам неподвижных центральных колес *2* с внутренними зубьями. В результате движения звеньев объемы рабочих полостей, заключенных между торцовыми стенками и поверхностями всех зубчатых колес, циклически изменяются. Секции I и II гидромашины работают последовательно. В рассматриваемом примере в секции I (см. рис. 3, разрез Б—Б), две рабочие полости максимально расширены, а другие две — максимально сужены. При этом одновременно открыты каналы *7* подвода и отвода рабочей среды. Эта секция находится в пассивной фазе — перепускает среду без изменения давления. Секция II находится в активной фазе (см. рис. 3, разрез В—В). В две ее полости рабочая среда поступает через отверстия *7* в торцовой стенке *5*. Из других двух полостей среда вытесняется через отверстия *9*. В следующий момент времени секция I станет активной, а секция II — пассивной. Форма центроид волнообразных центральных колес *1* и *2* обеспечивает подачу рабочей среды в активной фазе с постоянной производительностью. Поскольку активные фазы I и II секций чередуются без паузы, гидромашина в целом работает с постоянной мгновенной производительностью Q:

$$Q = \frac{(M+N)b}{2}\frac{\omega_1}{2\left(1+\frac{N}{M}\right)}\times \times\left(\left(R_{2\max}^2 - R_{2\min}^2\right) + \frac{N}{M}\left(R_{1\max}^2 - R_{1\min}^2\right)\right), \quad (2)$$

где ω_1 — угловая скорость центрального колеса *1*.

Все ПРГМ с последовательным соединением секций имеют общий недостаток — дополнительные утечки в пассивной секции, находящейся под высоким давлением. Условия эксплуатации, при которых данный недостаток не является критичным, предстоит тщательно исследовать. Предварительно — это насосы и гидродвигатели, в которых рабочее давление не достигает критических значений, т.е. существенно ниже 20 МПа.

Заключение

Предложены конструктивные усовершенствования двухсекционных ПРГМ, которые повышают их надежность и устраняют пульсацию потока. Надежность повышается за счет переноса каналов подвода и отвода среды с торцовых стенок на цилиндрическую рабочую поверхность центрального колеса с внутренними зубьями. Отсутствие пульсации обеспечивается формой центроид центральных зубчатых колес. Усовершенствованные двухсекционные ПРГМ с числами волн центроид 2×2 и 3×3 по основным показателям качества не уступают или даже превосходят уже применяющиеся в настоящее время односекционные ПРГМ 4×6 и 6×8.

Библиографический список

1. **Полезная модель 144306 РФ,** МПК F04C2/14, F04C2/18 Роторная гидромашина / Волков Г.Ю., Курасов Д.А.; опубл. 20.08.2014. Бюл. № 23.

2. **Заявка на изобретение № 2017143717 РФ.** Роторная гидромашина / Волков Г.Ю.; от 13.12.2017.

3. **Заявка на изобретение № 2018104151 РФ.** Роторная гидромашина / Волков Г.Ю.; от 02.02.2018.

sb918.indd 390 06.09.2018 8:22:35

УДК 629.114.2-235

Ю.И. Крыхтин, В.И. Карлов, *канд-ты техн. наук*
(Волгоградский государственный технический университет)
E-mail: au@vstu.ru

К разработке математической модели нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора механических трансмиссий

Разработана конструкция конуса инерционного синхронизатора с фрикционным плазменным покрытием для работы в масле во фрикционных устройствах механических трансмиссий (МТ) транспортных гусеничных машин. Представлена математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства и проведена проверка модели испытанием синхронизаторов на изделиях.

OThe design to the creation of a cone inertial synchronizer with a friction plasma coating to work in oil in friction devices of mechanical transmissions (MT) transport tracked vehicles is developed. The mathematical model of loading the MT inertial synchronizer cone friction plasma coating taking into account the geometric characteristics of the frictional device are developed and the model is checked by testing synchronizers on products.

Ключевые слова: механическая трансмиссия, фрикционные устройства, конус инерционного синхронизатора, контртело, трение в масле, напыление, плазменное фрикционное покрытие, сцепление с основой.

Keywords: mechanical transmission, friction devices, cone of inertial synchronizer, counterbody, friction in oil, spraying, plasma friction coating, adhesion to the base.

Предлагаемое техническое решение предназначено для использования в механических коробках передач (КП) с зубчатыми муфтами и постоянно зацепленными шестернями трансмиссий гусеничных машин (ГМ) или колесных машин (КМ), например, гусеничных тягачей, колесных тракторов, автомобилей и т.д., в которых применяются инерционные конусные синхронизаторы для безударного включения передач.

Известны конструкции монолитных стальных блокирующих обойм (конусов синхронизатора) инерционных синхронизаторов для трансмиссий ГМ и КМ с коническими рабочими поверхностями [1, 2]. Блокирующая обойма имеет фигурные пазы под пальцы синхронизатора на цилиндрической поверхности, внутреннюю кольцевую трапециевидную канавку под фиксаторы, конические рабочие поверхности. Такая блокирующая обойма работает в паре со стальным контртелом — коническими поверхностями, выполненными на шестернях, соединяемых через зубчатую муфту с помощью синхронизатора с промежуточным валом КП.

На рис. 1 показан серийный инерционный конусный синхронизатор КП. Монолитная

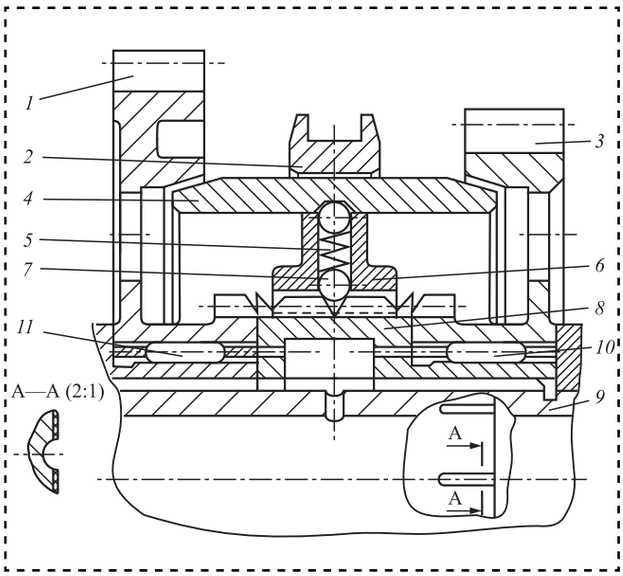


Рис. 1. Серийный инерционный конусный синхронизатор коробки передач:
1 — ведущая шестерня IV передачи; *2* — кольцо; *3* — ведущая шестерня III передачи; *4* — блокирующая обойма; *5* — пружина фиксатора; *6* — зубчатка; *7* — шарик; *8* — зубчатая муфта; *9* — промежуточный вал коробки передач; *10*, *11* — ролики. Пара трения сталь 12ХН3А (конус синхронизатора) — сталь 20Х2Н4А (контртело)

sb918.indd 391 06.09.2018 8:22:35

стальная блокирующая обойма серийного инерционного синхронизатора обладает недостатками. При значительных нагрузках она не обеспечивает надежности и долговечности работы узла. При работе стальной обоймы (сталь 12ХН3А, HRC ⩾ 52) синхронизатора со стальным контртелом (сталь 20Х2Н4А, HRC ⩾ 58) в зоне трения происходит следующее.

Скольжение двух сопряженных однородных стальных поверхностей приводит к возникновению процессов, присущих граничному трению, т.е. имеет место периодический разрыв масляной пленки и происходит металлическое контактирование двух тел на локальных участках поверхностей трения, на которых в результате высоких контактных нагрузок возникает пластическая деформация металла, достигающая критических значений, приводящих к деформированию поверхностных слоев металла и его износу. Наряду с этим на локальных участках поверхностей трения имеет место процесс локального схватывания, который при повышении нагрузок может распространиться на всю поверхность трения, т.е. привести к выходу блокирующей обоймы синхронизатора из строя [3].

Цель предлагаемого технического решения — повышение надежности и долговечности работы конуса (блокирующей обоймы) инерционного синхронизатора.

Новизной предлагаемого технического решения является то, что на конических поверхностях блокирующей обоймы инерционного синхронизатора выполнено покрытие из материала триботехнического назначения с пористостью 10...25 % и равномерно расположенные по образующим конуса продольные радиусные (полуцилиндрические) канавки глубиной 1...1,2 мм, а также разработана математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства для вычисления напряжения при кручении фрикционного сопряжения плазменное покрытие — стальная основа, результаты которого сравниваются с результатами экспериментальных испытаний.

Для достижения высоких эксплуатационных свойств деталей трения наиболее целесообразно с экономической и технической точек зрения нанесение покрытий. Один из наиболее перспективных методов формирования покрытий — метод плазменного напыления, который позволяет получить различные по составу покрытия, прочно связанные с основным металлом [1, 3, 4].

Плазменные фрикционные покрытия с коэффициентом трения f = 0,12...0,18 при работе со стальным контртелом в масле используются для повышения служебных характеристик дисков фрикционных устройств и конусов инерционных синхронизаторов трансмиссий ГМ и КМ. Разработка составов и технологий нанесения фрикционных плазменных покрытий на диски трения и конуса синхронизаторов КП сулит большие перспективы в создании компактных, обладающих небольшой материалоемкостью фрикционных пар с точки зрения уменьшения их массы и обеспечения высокой эффективности работы узлов трения [5—7].

Работу проводили на Волгоградском тракторном заводе совместно со специалистами Института проблем материаловедения АН Украины. Подбор составов фрикционного материала и напыление его на основу проводили в ГНУ "Институт порошковой металлургии" (Беларусь).

На рис. 2 изображена перспективная блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием, с фигурными пазами под пальцы синхронизатора на цилиндрической поверхности, с внутренней кольцевой трапециевидной канавкой под фиксаторы, с коническими рабочими поверхностями для трансмиссии ГМ и КМ. Обойма состоит из стальной основы *1* и покрытия *2* на конических рабочих поверхностях обоймы. На наружные конические поверхности стальной основы обоймы синхронизатора нанесено покрытие из материала триботехнического назначения толщиной 0,5 мм [4].

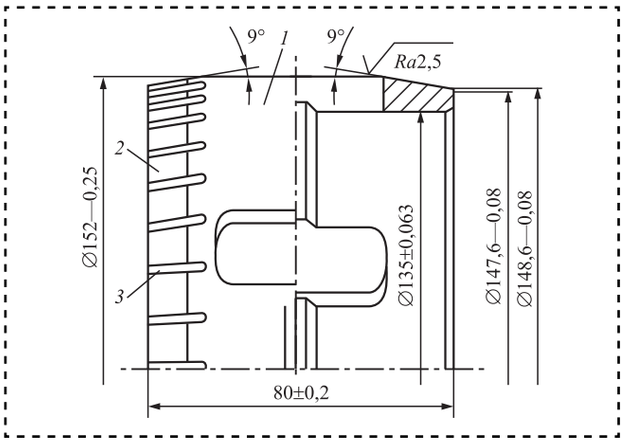


Рис. 2. Блокирующая обойма инерционного синхронизатора с фрикционным газотермическим покрытием:
1 — основа (сталь 12ХН3А); *2* — покрытие на основе стали У10А, стали 40Х13, Mo, БрАЖ9-4(SiC); *3* — канавка

sb918.indd 392 06.09.2018 8:22:35

Нижний предел по пористости 10 % устанавливают исходя из условий деформирования пористого тела и накопления масла в порах. Верхний предел по пористости 25 % — из условий обеспечения прочностных свойств покрытия, так как дальнейшее увеличение пористости приводит к значительному уменьшению прочности покрытия.

На конических поверхностях выполнены равномерно расположенные по образующим конуса продольные радиусные (полуцилиндрические) канавки глубиной 1...1,2 мм для удаления смазки и продуктов износа с рабочих поверхностей.

Предлагаемая блокирующая обойма (конус синхронизатора) обеспечивает переключение передач так же, как известные монолитные стальные блокирующие обоймы. При скольжении конических поверхностей блокирующей обоймы и контртел пористое покрытие на блокирующей обойме способно деформироваться и уплотняться в локальных объемах, что в значительной степени уменьшает возможность схватывания на локальных участках поверхностей трения и, следовательно, предотвращает распространение процесса схватывания на всю поверхность трения. При этом уменьшается вероятность выхода рабочей поверхности из строя и обеспечивается высокая надежность работы предлагаемой блокирующей обоймы синхронизатора. Уменьшение вероятности процессов локального схватывания и наличие дополнительной смазки в порах покрытия обеспечивают также снижение темпа износа сопряженных поверхностей, что значительно увеличивает долговечность предлагаемой блокирующей обоймы синхронизатора.

На рис. 3 изображена кинематическая схема механической трансмиссии с четырехскоростной КП, в которой на промежуточном валу установлены конические инерционные синхронизаторы III и IV передач, для легкой транспортной ГМ массой 7...8 т.

Разработана математическая модель нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора КП механической трансмиссии транспортной ГМ с учетом геометрических характеристик фрикционного устройства.

Математическая модель процесса нагружения фрикционного плазменного покрытия конуса инерционного синхронизатора МТ при выключенном главном фрикционе (ГФ) представлена следующими выражениями:

$$I_1\left(\frac{\omega_1-\omega_2}{T_c}+\frac{M_2}{I_2}\right)=\frac{fPR_{ср}}{\sin\alpha}<\left[\tau_{кр}\right]\frac{\pi R_{вн}^3 t}{\sin\left(90^\circ-\alpha\right)};$$

$$M_2=\frac{f_c G R_{вк}}{i_т \eta_т};\quad I_2=\frac{\delta_2 G R_{вк}^2}{g(i'_т)^2},$$

где I_1 — момент инерции ведомых частей ГФ, ведущего вала, промежуточного вала и жестко связанных с ним деталей, приведенных к оси промежуточного вала;

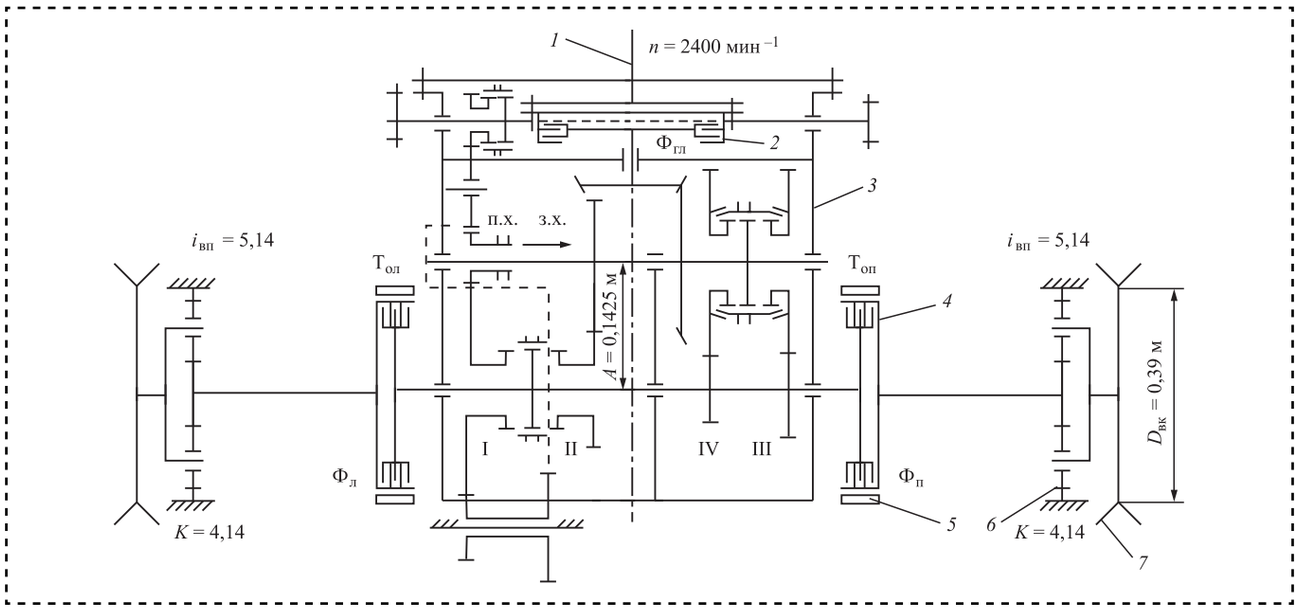


Рис. 3. Кинематическая схема механической трансмиссии ГМ массой 7...8 т:

1 — двигатель внутреннего сгорания; *2* — главный фрикцион; *3* — коробка перемены передач, двухвальная, с синхронизаторами III—IV передач; *4* — механизм поворота (бортовой фрикцион); *5* — остановочный тормоз, ленточный; *6* — бортовая передача планетарная; *7* — ведущее колесо; пх, зх — передний и задний ход соответственно

sb918.indd 393 06.09.2018 8:22:36

ω_1, ω_2 — выравниваемые угловые скорости соответственно ведущих и ведомых элементов КП;

T_c — время синхронизации (задается 0,5...0,7 с);

M_2 — момент сопротивления движению, приведенный к ведомым дискам ГФ;

I_2 — момент инерции ведомых частей ГФ, приведенные к ним моменты инерции вращающихся деталей трансмиссии и момент инерции поступательного движения ГМ в целом на II передаче;

f — коэффициент трения;

P — осевая сила, действующая на конус синхронизатора;

$R_{ср}$ — средний радиус трения;

α — угол образующей конуса;

$[\tau_{кр}]$ — допускаемые напряжения на кручение сопряжения плазменное фрикционное покрытие — стальная основа;

$R_{вн}$ — средний внутренний радиус покрытия на конусе синхронизатора;

t — толщина покрытия;

f_c — коэффициент суммарного сопротивления движению ГМ;

G — вес ГМ;

$R_{вк}$ — радиус ведущего колеса ГМ;

$i_т$ — передаточное число трансмиссии от вала, на котором установлен синхронизатор, до ведущего колеса;

$\eta_т$ — КПД трансмиссии и ходовой части;

δ_2 — коэффициент учета вращающихся масс трансмиссии и ходовой части, приведенных к оси промежуточного вала КП, $\delta_2 = 1{,}21$;

g — ускорение свободного падения;

$i'_т$ — передаточное число от ведущего колеса к промежуточному валу КП на IV передаче.

С помощью математической модели вычислили напряжения $\tau_{кр}$ при кручении фрикционного сопряжения плазменное покрытие—стальная основа. Результаты вычисления сравниваются с результатами экспериментальных испытаний.

Для экспериментальных испытаний изготовлены опытные образцы заготовок конусов синхронизатора с плазменным фрикционным покрытием со следующими параметрами и характеристиками:

1. Поверхность трения: покрытие на основе бронзы БрАЖ(SiC): 96,0...96,2 % БрАЖ 9-4 (ТУ 48-21-642—79); 3,8...4,0 % SiC (ГОСТ 26327—84).

2. Физико-механические свойства покрытия БрАЖ(SiC): твердость — 1200...1500 МПа по Виккерсу; пористость — 15...20 % (плотность 5,4...5,7 г/см^3); адгезионная прочность через подслой из Мо — не менее 22 МПа.

3. Толщина покрытия — 1,0 + 0,1 мм.

4. Режим напыления подслоя из Мо: сила тока — 500 А; напряжение — 40 В; дистанция — 105 мм; плазмообразующий газ — аргон; расход газа — 30 л/мин.

5. Режим основного напыления: сила тока — 470...500 А; напряжение — 37...40 В; дистанция — 105 мм; плазмообразующий газ — аргон; расход газа — 25...27 л/мин.

Изготовленные заготовки конусов синхронизатора подвергали механической обработке. Режим механической обработки (шлифовки): шлифовальный круг — белый корунд; зерно — 40 мкм, смазка — керамическая; глубина резания — 0,08...0,1 мм; скорость резания — 30...35 м/с; поперечная подача — 0,9...1,1 мм на проход; охлаждающая жидкость — СОЖ.

ГМ массой 7,2 т с удельной мощностью $N_{уд}$ = = 33,3 л.с./т с опытными конусами синхронизатора III и IV передач испытывали по грунтовым проселочным дорогам в различных погодных и дорожных условиях.

В процессе полевых испытаний опытный синхронизатор с бронзовым плазменным покрытием на конических поверхностях обеспечил нормальную работу ГМ с общим пробегом: 5770 км. Отклонений в работе синхронизатора при переключении передач не обнаружено, обеспечивалось быстрое безударное включение передач, что свидетельствует о достаточной величине коэффициента трения.

После разборки КП обнаружена хорошая приработка поверхностей трения и равномерное прилегание поверхностей трения конического синхронизатора. После микрометража установлено, что конус синхронизатора пригоден к дальнейшей эксплуатации. Состояние стальных контртел, эксплуатируемых в паре с опытным конусом синхронизатора, хорошее. Схватываний, следов припекания рабочих конических поверхностей на фрикционном контакте после испытаний не обнаружено.

На рис. 4 показаны блокирующая обойма синхронизатора с фрикционным слоем из состава БрАЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20Х2Н4А после пробега изделия 5770 км. В результате измерения геометрических размеров опытного конуса синхронизатора с бронзовым покрытием после пробеговых испытаний определен износ поверхностей трения (таблица).

Блокирующая обойма (конус синхронизатора с газотермическим бронзовым покрытием), износостойкость которой выше в сравнении с серийной, изготовленной из стали 12ХН3А, по эксплуатационным свойствам значительно превосходит серийную блокирующую обойму син-

sb918.indd 394 06.09.2018 8:22:36

Результаты натурных испытаний опытных и серийного конусов синхронизаторов

Номер машины	Пробег, км	Фрикционное покрытие на конусе	Износ поверхности трения конуса синхронизатора, мм		Износ поверхности трения контртела, мм	
			III передача	IV передача	III передача	IV передача
1	5770	БрАЖ9-4 (SiC)	0,0375	0,036	0,0265	0,009
2	3790	Mo	0,124	0,059	0,07	0,065
3	10 000	40Х13	0,25	0,24	0,16	0,159
4	10 000*	12ХН3А	0,225	0,2	0,1	0,1
* Штатная эксплуатация ГМ.						

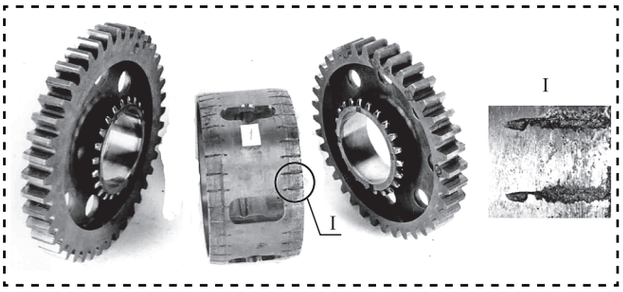


Рис. 4. Блокирующая обойма синхронизатора с фрикционным слоем из БрАЖ9-4 (SiC) и контртела из стали 20Х2Н4А после пробега изделия 5770 км

хронизатора, в первую очередь, по фрикционной эффективности и износостойкости.

На рис. 5 показаны экспериментально испытанные конусы синхронизаторов после работы по контртелу — стали 20Х2Н4А (ГОСТ 4543—71) с HRC ⩾ 58:

По результатам испытаний конусов синхронизаторов на ГМ на практике для фрикционных плазменных покрытий можно рекомендовать адгезионную прочность $\left[\tau_{кр}\right] \geqslant 220$ кгс/см^2 (22 Н/мм^2).

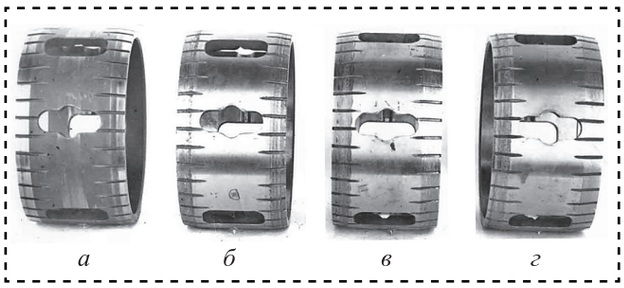


Рис. 5. Конусы синхронизаторов после работы по контртелу (сталь 20Х2Н4А по ГОСТ 4543—71 с HRC ⩾ 58):
а — серийный конус синхронизатора для ГМ массой 7,2 т из стали 12ХН3А, пробег изделия 5693 км; *б* — опытный конус синхронизатора с фрикционным слоем из 40Х13, пробег изделия 10 000 км; *в* — опытный конус синхронизатора с фрикционным слоем из У10А, пробег изделия 7642 км; *г* — опытный конус синхронизатора с фрикционным слоем из состава на основе хромистых сталей — III передача (правая сторона) и состава 11Х18МВД — IV передача (левая сторона), пробег изделия 9580 км. Для *а*, *б* и *в* III передача слева

Заключение

Предложена перспективная конструкция конуса инерционного синхронизатора с фрикционным плазменным напылением для КП механической трансмиссии, результаты исследования которой на изделиях подтвердили соответствие математической модели ее нагружения эксперименту. Испытания на изделиях подтвердили, что назначенные параметры и характеристики плазменного фрикционного покрытия на конусе синхронизатора обеспечивают прочность сцепления покрытия с основой. Результаты могут быть использованы при создании новых и модернизации существующих трансмиссий легких транспортных ГМ.

Материалы статьи подготовлены с использованием программного обеспечения КОМПАС 3D для геометрического моделирования фрикционных устройств и PTC Mathcad для расчетов по математической модели и обработки результатов экспериментов, приобретенного в рамках реализации инфраструктурного проекта по конкурсу Минобрнауки "Новые кадры ОПК" 2014 г.

Библиографический список

1. **Труханов В.М., Зубков В.Ф., Крыхтин Ю.И., Желтобрюхов В.Ф.** Трансмиссии гусеничных и колесных машин. М.: Машиностроение, 2001. 736 с.

2. **Красненьков В.И., Егоркин В.В.** Синхронизаторы в ступенчатых трансмиссиях. М.: Машиностроение, 1967. 274 с.

3. **Федорченко И.М., Крячек В.М., Панаиоти И.И.** Современные фрикционные материалы. Киев: Наукова думка, 1975. 334 с.

4. **Чайка Б.И., Федорченко И.М.** Плазменные покрытия для поршневых колец автотракторных двигателей // Порошковая металлургия. 1978. № 3. С. 86—91.

5. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Физические основы разработки заготовок дисков трения с молибденовым покрытием для повышения надежности работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 70—74.

6. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Разработка заготовок дисков трения с бронзовым на основе БрАЖ(SiC) покрытием для надежной работы в масле в узлах трансмиссий транспортных машин // Известия ВолгГТУ. 2017. № 12. С. 69—74.

7. **Крыхтин Ю.И., Карлов В.И.** Разработка новой блокирующей обоймы конического инерционного синхронизатора фрикционных устройств трансмиссий транспортных машин для повышения надежности и долговечности работы в масле // Известия ВолгГТУ. 2017. № 5. С. 85—91.

sb918.indd 395 06.09.2018 8:22:36

УДК 621.757:621.7.044.7

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

Сборка соединений из разнородных материалов давлением импульсного магнитного поля

Рассмотрено влияние акустической жесткости материалов на процесс образования прессового соединения из разнородных материалов при сборке давлением импульсного магнитного поля. В результате численного моделирования процесса магнитно-импульсной сборки установлены распределение и величина остаточных деформаций в контактном слое элементов соединения из материалов с разной акустической жесткостью при высокоскоростном соударении.

The effect of the acoustic rigidity of materials on the process of forming a press compound from dissimilar materials during the assembly of a pulsed magnetic field by pressure is considered. As a result of numerical simulation of the process of the magnetic pulse assembly, the distribution and magnitude of residual deformations in the contact layer of the joint elements from materials with different acoustic rigidity under high-velocity collision are described.

Ключевые слова: магнитно-импульсная сборка, разнородные материалы, деформация, контактный слой.

Keywords: magnetic-pulse assembly, heterogeneous materials, deformation, contact layer.

Для сборки разнородных трубчатых элементов между собой и труб с разнообразными наконечниками и ниппелями используют различные виды образования соединений: сборка деформирующим температурным воздействием на зону соединения (нагрев охватывающей или охлаждение охватываемой детали), сварка лазерным лучом, различные холодные виды соединений (трением, сдвигом или давлением). Образование соединений давлением обладает важными преимуществами по сравнению со сваркой, так как химический и фазовый состав материалов не претерпевают никаких изменений. Вследствие этого сборка трубчатых конструкций некоторых разнородных материалов возможна только соединением давлением. Особое место среди процессов сборки давлением занимают способы сборки при высокоскоростном соударении соединяемых элементов, для реализации которых может быть использована технология магнитно-импульсной сборки.

Достоинства и особенности магнитно-импульсной сборки:

— равномерность приложения нагрузки по периметру с заданным распределением по длине зоны обработки, обеспечивающим высокое качество соединения;

— импульсный характер приложения нагрузки и строгая дозировка подводимой энергии, позволяющие использовать обжимаемую деталь из хрупких материалов без следов разрушения;

— повышенная прочность соединения, его ресурс, герметичность, достигаемая за счет термических напряжений, возникающих в охватывающей детали как результат ее охлаждения после разогрева вихревыми токами в процессе магнитно-импульсного воздействия;

— отсутствие необходимости обеспечения жестких допусков между соединяемыми деталями и простота технологической оснастки.

Магнитно-импульсную сборку применяют для сборки трубчатых элементов с законцов-

sb918.indd 396 06.09.2018 8:22:36

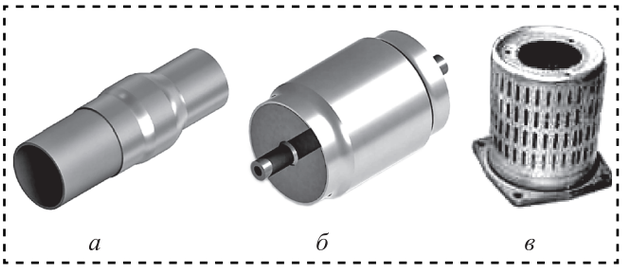


Рис. 1. Соединения из разнородных материалов:
а — трубчатый переходник; *б* — трубчатый элемент с заглушкой или штуцерами; *в* — тонкостенный корпус с фланцем

ками (наконечниками) и трубопроводов (типа труба—труба) как из однородных материалов, герметичное соединение которых другими способами затруднено или невозможно, так и для сборки соединений из разнородных материалов (металлов и неметаллов) (рис. 1).

Прочность соединения при магнитно-импульсной сборке обеспечивается радиальным натягом между соединяемыми деталями или геометрическим замыканием.

Первый вид сборочного соединения применяют вместо осевых и радиальных посадок, требующих обеспечения жестких расчетных допусков между соединяемыми с натягом деталями. При магнитно-импульсной сборке допуск между соединяемыми деталями свободный. В ряде случаев целесообразен начальный зазор между ними — 0,5...1,0 мм, за счет которого при воздействии давления импульсного магнитного поля обжимаемый элемент приобретает высокую скорость деформирования. Это обеспечивает высокую прочность получаемого соединения за счет возникновения в материалах деталей дополнительных остаточных напряжений. Кроме того, происходит не только тангенциальная пластическая деформация оболочек, но и объемная пластическая деформация по толщине, что приводит к заполнению материалом микронеровностей на деталях. Это обеспечивает герметичность соединения, повышенную силу его распрессовки.

Геометрическое замыкание обеспечивается за счет деформирования трубчатой оболочки давлением импульсного магнитного поля в канавки или пазы опорного элемента соединения и формообразования площадок или отбортовки кромок. Прочность соединений, осуществленных с помощью технологии магнитно-импульсной сборки, может превышать прочность соединяемых элементов.

Сборка соединений давлением импульсного магнитного поля характеризуется высокими скоростями деформации, когда имеет место волновой характер распространения как упругих, так и пластических деформаций от поверхности контакта соударяющихся элементов. При высокоскоростном соударении характер взаимодействия разнородных элементов соединения зависит от соотношения величин акустической жесткости материалов. Акустическая жесткость материалов (волновое сопротивление, характеристический импеданс среды) равна произведению плотности среды на скорость распространения упругой волны (скорости звука) в материале.

При прохождении упругих волн через границу соударяющихся тел происходит частичное отражение волны от границы раздела сред с различной акустической жесткостью. Величина проходящей и отраженной волны определяется соотношением акустических жесткостей взаимодействующих объектов, например наконечника и соединительной втулки.

При нормальном высокоскоростном соударении тел, которое реализуется при магнитно-импульсной сборке осесимметричных узлов, при переходе импульса давления через границу раздела сред (соединяемых элементов) начальное p_n, отраженное p_t и переданное p_r давления связаны соотношениями [1]:

$$p_t = \left[2\rho_о c_о / (\rho_о c_о + \rho_в c_в)\right] p_n;$$
$$p_r = \left[(\rho_о c_о - \rho_в c_в)/(\rho_о c_о + \rho_в c_в)\right] p_n, \qquad (1)$$

где $\rho_о$ и $\rho_в$ — плотность материала внутреннего (обжимаемого) и внешнего (обжимающего) элемента соответственно; $c_о$ и $c_в$ — скорости упругих волн в материале внутреннего (обжимаемого) и внешнего (обжимающего) элемента соответственно.

Величина дополнительной остаточной деформации, обусловленной высокоскоростным соударением соединяемых элементов, и ее глубина в контактном слое значительно зависят от акустической жесткости соударяющихся материалов.

sb918.indd 397 06.09.2018 8:22:36

Акустическая жесткость конструкционных материалов ρ_c, кг/(м^2·с)

Текстолит	$3{,}6 \cdot 10^6$
Алюминиевые сплавы	$(13{,}8...17{,}5) \cdot 10^6$
Титановые сплавы	$(23{,}7...26{,}2) \cdot 10^6$
Стали	$(39{,}9...46{,}7) \cdot 10^6$
Медь	$42{,}8 \cdot 10^6$

Для анализа влияния акустической жесткости материалов на последеформационное напряженно-деформированное состояние в соединении проведено численное моделирование процесса магнитно-импульсной сборки с использованием моментной схемы метода конечных элементов [2].

При создании математической модели деформационного процесса сборки деталей применена методика численного моделирования, основанная на вариационных принципах механики с использованием теории пластического течения, модифицированный метод конечных элементов (моментная схема конечных элементов) и метод дискретных торможений. Модель позволяет рассматривать процессы деформирования тонкостенных заготовок в осесимметричной и плоской постановке с учетом трехмерности напряженного состояния и влияния тепловых напряжений, которые возникают за счет диссипации энергии пластических деформаций и учитываются на основе постулата Дюамеля—Неймана.

Каждый конечный элемент имеет те же физические свойства, что и рассматриваемая среда в месте расположения элемента. Внутри каждого конечного элемента задаются функции формы, позволяющие определить перемещение внутри конечного элемента по перемещениям его узлов. За координатные функции принимают функции, тождественно равные нулю всюду, кроме одного конечного элемента, внутри которого они совпадают с функциями формы.

В качестве основных неизвестных приняты скорости узловых перемещений. Все внешние воздействия, а также инерционные силы распределяются соответствующим образом по узлам конечных элементов. Густоту сетки разбиения исследуемых объектов на конечные элементы определяли исходя из условия сходимости численной модели. Она зависела от концентрации напряжений и деформаций в отдельных участках. Физические соотношения для рассматриваемого материала записывали на основе теории пластического течения. Принято, что пластическое изменение объема отсутствует, и приращения пластических деформаций полностью определяются компонентами тензора активных напряжений.

Использование моментной схемы метода конечных элементов позволило учесть смещение конечного элемента как жесткое целое, что необходимо в связи с большими перемещениями заготовки при магнитно-импульсной сборке. Для рассматриваемого класса динамических задач характерно наличие резко выраженных физической и геометрической нелинейности. Реализацию подобного ряда задач наиболее рационально осуществлять по явной разностной схеме сквозного счета. В этом случае весь временной интервал деформационного процесса разбивается на достаточно малые конечные отрезки времени, в течение каждого из которых изменение скорости перемещений считается линейным. Метрические характеристики конечного элемента пересчитывают на каждом шаге, что в целом позволяет учесть геометрическую нелинейность задачи. Учет физической нелинейности проводится путем корректировки на каждом шаге девиаторной части полных напряжений согласно принятому закону состояния на основе постулата Друккера.

При решении задачи приняты следующие основные допущения:

1. Материал заготовки изотропный с упрочнением.

2. Влияние температуры нагрева от действия вихревых токов на механические свойства материала заготовки не учитывается. Как показали измерения, температура заготовки, выполненной из материалов с высокой электропроводностью (для которой целесообразно применение метода магнитно-импульсной сборки), изменяется не более чем на 30...50 °С. Механические свойства этих материалов при таком нагреве изменяются не более чем на 3...8 %.

3. Заготовки в процессе деформирования не теряют устойчивости.

4. Влияние воздушной среды на процесс сборки не учитывается, так как ее сопротивление составляет менее 1 % от величины электромагнитных сил.

Объемный характер электромагнитных сил, действующих на заготовку при магнитно-импульсной сборке, моделировали распреде-

sb918.indd 398 06.09.2018 8:22:37

лением силы по слоям конечных элементов заготовки путем ступенчатой аппроксимации кривой распределения суммарных электромагнитных сил по толщине заготовки, соответствующему моменту середины этапа разгона внешней оболочки давлением импульсного магнитного поля.

Моделировали процесс деформирования многослойной оболочки и процесс взаимодействия оболочки с податливой технологической оправки.

Рассмотрена схема сборки (напрессовки) тонкостенного трубчатого элемента (диаметр 55 мм, толщина стенки s = 1 мм) на наконечник (заглушку или фланец) (см. рис. 1). Материал трубчатого элемента алюминиевый сплав АМг3М; материалы наконечника: сталь 45, титановый сплав ОТ4.

Относительная глубина слоя дополнительных деформаций x/s (s — толщина стенки трубчатого элемента; x — расстояние от поверхности контакта) и остаточные деформации ε_i в стенке трубчатого элемента, обусловленные высокоскоростным соударением элементов при магнитно-импульсной сборке, растут с увеличением акустической жесткости материала наконечника (рис. 2).

Увеличение глубины распространения и величины остаточных деформаций в контактном слое приводит к уменьшению упругого отскока после высокоскоростного соударения элементов и уменьшению пружинения материала трубчатого элемента после снятия нагрузки. Все это обеспечивает высокую плотность и прочность соединения при магнитно-импульсной сборке.

Сборку тонкостенных трубчатых переходников из различных материалов вследствие малой жесткости конструкции проводят с использованием гладкой (или разъемной) технологической оправки. В этом случае конструкцию в момент сборки следует рассматривать как трехслойную систему "внутренняя оболочка — внешняя оболочка — оправка". Внешняя соединительная втулка (труба) выполняет функцию, аналогичную технологическому спутнику в процессах магнитно-импульсной штамповки материалов с низкой электропроводностью [3].

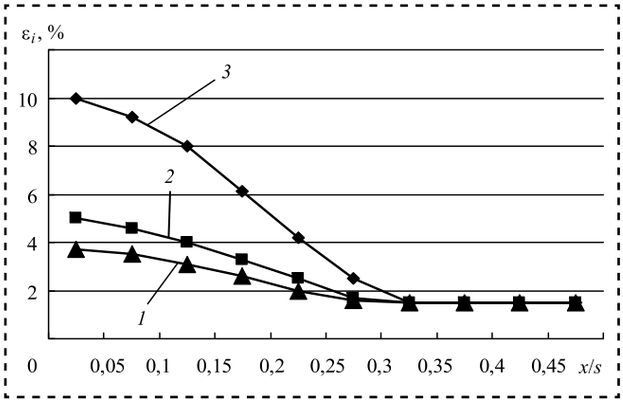


Рис. 2. Влияние акустической жесткости материала наконечника на остаточные деформации в контактном слое трубчатого элемента:
1 — титановый сплав ОТ; *2* — сталь 45; *3* — абсолютно жесткий материал

Возможно несколько вариантов сборки трубчатых переходников с использованием технологической оправки (рис. 3). При необходимости обеспечения не только плотности соединения, но и повышенной прочности эти схемы необходимо совмещать с образованием геометрического замыкания оболочек (формовке рифтов и т.п.) или предварительно нанести клей в зону последующего контакта при сборке оболочек [4].

Первая схема — сборка с минимальными начальными зазорами между соединяемыми оболочками и оправкой (см. рис. 3, *а*). Небольшая пластическая деформация оболочек происходит за счет упругой податливости оправки, выполненной из неметаллических материалов, и возникновения термических напряжений из-за нагрева внешней оболочки вихревыми токами в процессе магнитно-импульсного воздействия и деформации с последующим охлажденем.

Вторая схема — сборка с гарантированным начальным зазором z_1 между оболочками

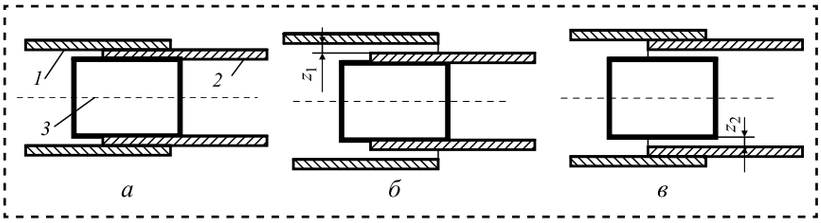


Рис. 3. Схемы сборки трубчатых переходников:
1 — внешняя оболочка; *2* — внутренняя оболочка; *3* — технологическая оправка

sb918.indd 399 06.09.2018 8:22:37

(см. рис. 3, *б*) и зазором z_2 между внутренней оболочкой и оправкой (см. рис. 3, *в*). Возможно также совмещение этих двух схем. В обоих случаях дополнительно возможно создание механического натяга в зоне соединения оболочек.

Сборку без предварительного пластического деформирования внутренней оболочки реализуют по двум схемам.

В первом случае (см. рис. 3, *а*), начальный зазор между оболочками минимален. Тогда в процессе магнитно-импульсной сборки давление, действующее на поверхность контакта оболочек, равно [5]:

$$p = p_{\text{м}} - 2K_{\sigma}\ln\left(D_{\text{н}}/D_{\text{в}}\right), \qquad (2)$$

где $p_{\text{м}}$ — давление импульсного магнитного поля на внешнюю оболочку;

K_{σ} — пластическая постоянная материала внешней оболочки;

$D_{\text{н}}$ и $D_{\text{в}}$ — наружный и внутренний диаметр внешней оболочки соответственно.

Поскольку прочность материалов внешней оболочки (алюминиевые и медные сплавы) значительно ниже прочности материалов внутренней оболочки (стали, титановые сплавы), то при сборке соединения тангенциальные напряжения в материале внешней оболочки превышают предел текучести. В этом случае пластическая постоянная примерно равна условному пределу текучести материала $K_{\sigma} \approx 0{,}5\sigma_{0,2}$ [5]. Если толщина стенки внешней оболочки мала ($D_{\text{н}} \approx D_{\text{в}}$), тогда $p \approx p_{\text{м}}$.

Если магнитно-импульсная сборка соединения из разнородных материалов проводится при заданном первоначальном зазоре z_1 между оболочками (см. рис. 3, *б*), то в момент соударения давление, действующее на поверхность контакта оболочек, равно

$$p = p_{\text{м}} + p_{\text{в}}, \qquad (3)$$

где $p_{\text{в}}$ — давление встречи в момент соударения оболочек:

$$p_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{н}}c_{\text{н}}\rho_{\text{в}}c_{\text{в}}}{\rho_{\text{н}}c_{\text{н}} + \rho_{\text{в}}c_{\text{в}}}\,\text{v}_1, \qquad (4)$$

где v_1 — скорость соударения оболочек.

При установке оболочек с начальным зазором z_2 относительно оправки (см. рис. 3, *в*), сборка соединения происходит в процессе их высокоскоростного соударения с оправкой. Давление, действующее на поверхность контакта внутренней оболочки с оправкой, равно

$$p_{\text{в}} = \frac{\rho_{\text{о}}c_{\text{о}}\rho_{\text{в}}c_{\text{в}}}{\rho_{\text{о}}c_{\text{о}} + \rho_{\text{в}}c_{\text{в}}}\,\text{v}_2, \qquad (5)$$

где v_2 — скорость соударения оболочки с оправкой.

Давление на внутреннюю оболочку со стороны внешней оболочки, как и в предыдущем случае, можно принять равным давлению импульсного магнитного поля.

На рис. 4 представлены результаты численного моделирования процесса сборки соединения трубчатой тяги из коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (∅55×0,6 мм) со стальным наконечником (сталь 45) с использованием алюминиевого (материал АД0, ∅58,8×1,0 мм) и медного спутников (материал М1, ∅58,8×1,0 мм).

Большее акустическое сопротивление меди обусловливает бóльшую длительность процесса распространения пластической деформации в контактном слое трубчатого элемента при его соударении с оправкой. Поэтому при равной скорости соударения медная оболочка обеспечивает бóльшую степень и глубину пластической деформации материала трубчатого элемента в контактном слое, чем алюминиевая оболочка. Это приводит к значительно меньшему упругому отскоку трубчатой тяги от наконечника, т.е. получению более плотного натяга в соединении.

При магнитно-импульсной сборке соединений тонкостенных трубчатых деталей с использованием технологической оправки

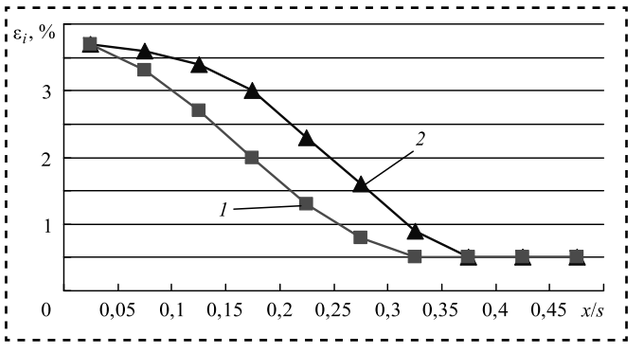


Рис. 4. Распределение и величина остаточных деформаций в контактном слое трубчатой тяги при сборке соединения с алюминиевой (*1*) и медной (*2*) оболочкой (скорость соударения оболочки с оправкой v_2 = 120 м/с)

sb918.indd 400 06.09.2018 8:22:37

в процессе взаимодействия внутренней оболочки с оправкой возникает продольная волна сжатия. Отраженная волна падает на границу раздела двух сред — внутренней и наружной оболочек. Напряжения в проходящей волне и волне, отраженной от поверхности контакта собираемых элементов, и их знак (растяжение или сжатие) будут зависеть от соотношения акустических жесткостей материалов соединяемых элементов.

Как следует из выражения (1), если акустические жесткости материалов наружной и внутренней оболочки равны $\rho_н c_н = \rho_в c_в$, то отраженная волна на границе не образуется. Это условие приблизительно реализуется при напрессовке медной (внешней) оболочки на стальную основу (внутреннюю оболочку).

Если $\rho_н c_н < \rho_в c_в$, что имеет место при напрессовке алюминиевой оболочки на стальную или титановую оболочку (основу), то отраженная волна во внутренней оболочке — волна растяжения. Это снижает, относительно предыдущего случая, зону пластической деформации в материале внутренней оболочки. Длина зоны пробега пластической волны во внутренней оболочке зависит от времени прохождения упругой волны во внешней оболочке, так как упругая волна разгрузки остановит пластическую волну. Прочность соединения в этом случае растет с увеличением толщины внешней оболочки — с увеличением времени пробега упругой волны в ее материале.

Если $\rho_н c_н > \rho_в c_в$, что имеет место при напрессовке внешней медной оболочки на основу из титанового сплава, то отраженная волна сжатия, встретившись с пластической волной в материале основы, увеличит зону пластической деформации в материале основы, что уменьшит упругий отскок внутренней оболочки от оправки и снизит последующую разгрузку в соединении оболочек.

Технологический процесс магнитно-импульсной сборки обладает высокой эффективностью, если деформируемый элемент выполнен из материалов с высокой электропроводностью — из медных и алюминиевых сплавов. При магнитно-импульсной сборке узлов из материалов с низкой электропроводностью (стали, титановые сплавы и др.) применяют схему обработки с использованием технологических спутников [3]. Технологический спутник — это прослойка из алюминиевого или медного сплава толщиной 0,5...1,0 мм, размещаемая между индуктором и деформируемым элементом. Она выполняется, как правило, намоткой из фольги, которая после сборки соединения удаляется. Такие спутники при сборке соединений с малой деформацией соединяемых элементов можно использовать многократно. Трубчатые спутники служат защитным элементом на собранной конструкции.

Выводы

При магнитно-импульсной сборке соединений многослойных трубчатых элементов из разнородных материалов для повышения прочности соединения предпочтителен вариант, когда акустическая жесткость материала внешней оболочки выше акустической жесткости материала внутренней оболочки. При магнитно-импульсной сборке тонкостенных элементов с применением технологической оправки, а также при соединении элементов из материалов с низкой электропроводностью (стали, титановые сплавы) для повышения прочности соединения можно использовать технологические спутники из материалов с высокой электропроводностью (медь, алюминий).

Библиографический список

1. **Кинслоу Р.** Высокоскоростные ударные явления. М.: Мир, 1973. 533 с.

2. **Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В.** Моделирование процесса магнитно-импульсного обжима втулки на податливую оправку // Технологическое обеспечение качества машин и приборов: сб. статей II Всероссийской НПК. Пенза: ПДЗ, 2005. С. 62—65.

3. **Самохвалов В.Н., Самохвалов В.П.** Исследование технологических возможностей управления процессами магнитно-импульсной штамповки тонкостенных деталей с использованием технологических спутников // Известия вузов. Авиационная техника. 1995. № 3. С. 107—112.

4. **Самохвалов В.Н., Самохвалова Ж.В.** Прочность металлокомпозитных узлов при магнитно-импульсной сборке // Сборка в машиностроении, приборостроении, 2017. № 7. С. 333—336.

5. **Безухов И.И.** Основы теории упругости, пластичности и ползучести. М.: Высшая школа, 1968. 512 с.

sb918.indd 401 06.09.2018 8:22:37

ПИТАНИЕ СБОРОЧНЫХ ЛИНИЙ. КОМПЛЕКТАЦИЯ. СКЛАДИРОВАНИЕ. УПАКОВКА

621.717

М.Н. Сорокин, *д-р техн. наук*
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: sorokin-mn@mail.ru

Решение трехпараметрической задачи комплектования частного вида (часть 2)

Представлен алгоритм решения трехпараметрической задачи комплектования частного вида, основанный на процедуре расширения потока. Алгоритм представляет последовательность выбора базовых путей комплектования.

The algorithm of the solution of a three-parametrical problem of matching of a certain look is provided. The algorithm is based on the procedure of expansion of a flow. The algorithm represents the sequence of the choice of basic ways of matching.

Ключевые слова: селективная сборка, комплектование, перераспределение сборочных комплектов.

Keywords: selective assembly, matching problem, redistribution of assembly sets.

В работе [1] предложен алгоритм решения трехпараметрической задачи комплектования для случая, когда сопрягаемые параметры деталей — случайные величины ξ_i, $i = \overline{1, 3}$. Функции распределения $f_i(x_i)$ случайных величин ξ_i были унимодальными, симметричными и принадлежали определенному классу функций. Функции распределения случайных величин ξ_1 и ξ_2 были равными, т.е. $f_1(x_1) = f_2(x_2)$.

В данной работе предложен алгоритм решения трехпараметрической задачи комплектования для случая, когда функции распределения $f_i(x_i)$ случайных величин ξ_i, $i = \overline{1, 3}$ унимодальные, симметричные и принадлежат классу функций, определенному в работе [1]. Равенство функций распределения случайных величин ξ_1 и ξ_2 в этом случае не требуется.

Воспользуемся определениями и обозначениями, введенными в работе [1].

Решение поставленной задачи рассмотрим на модельном примере с исходными данными по табл. 1. Уравнение сопряжения для модельного примера имеет вид:

$$j = j_1 - j_2 - j_3.$$

Алгоритм решения модельного примера представим в виде последовательности шагов [1].

Шаг 1

Решаем двухпараметрическую задачу комплектования со случайными величинами ξ_1 и ξ_2 методом полного целенаправленного суммирования [4]. В табл. 2 представлено решение данной задачи.

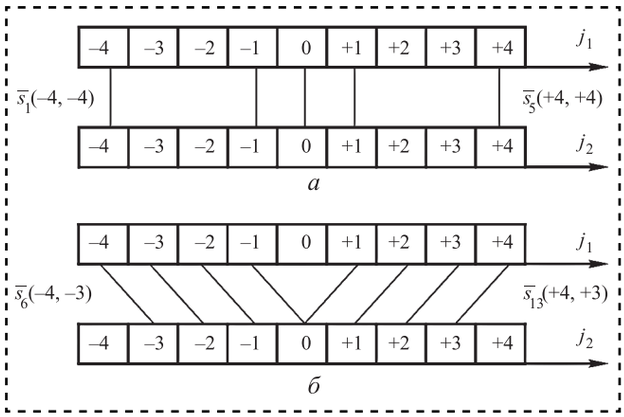
Пути комплектования, являющиеся решениями данной двухпараметрической задачи комплектования и удовлетворяющие условию $j_1 - j_2 = 0$, образуют множество $\overline{S}'_0$, а пути комплектования, являющиеся решениями данной

Таблица 1

Значения случайных величин ξ_i, выраженные в числовых индексах j_i, и число деталей p_{ij_i} в соответствующих селективных группах

j_i	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4
p_{1j_1}	6	10	14	20	30	20	14	10	6
p_{2j_2}	2	4	10	30	38	30	10	4	2
p_{3j_3}	4	8	14	22	34	22	14	8	4

sb918.indd 402 06.09.2018 8:22:37



Пути комплектования, определяющие решение двухпараметрической задачи комплектования при выполнении условия:
а — $j_1 - j_2 = 0$; *б* — $j_1 - j_2 = \pm 1$

двухпараметрической задачи комплектования и удовлетворяющие условию $j_1 - j_2 = 0, \pm 1$, образуют множество $\bar{S}_1'$ (рисунок).

Сборочные комплекты, полученные на путях комплектования, являющихся решениями модельного примера, состоят из деталей 1-го и 2-го видов и имеют сопрягаемый параметр $\bar{j}_3$.

Шаг 2

Для множеств $\bar{S}_0$ и $\bar{S}_1$ построим множества базовых путей $\bar{S}_0'$ и $\bar{S}_1'$, которые представлены в табл. 3 и 4 [1].

Переопределим понятие базовых путей, введенное в работе [1]. Два пути комплектования,

Таблица 2

Решение двухпараметрической задачи комплектования со случайными величинами ξ_i и ξ_2

Число путей	Базовые пути $\bar{s}_q(j_1, j_2)$	Новые пути $\bar{p}_q(j_1, j_2)$	$j_1 - j_2$	Общее число сборочных комплектов Σ
1	$\bar{s}_1(-4,-4)$	2	0	66
2	$\bar{s}_2(-1,-1)$	16		
3	$\bar{s}_3(0, 0)$	30		
4	$\bar{s}_4(+1,+1)$	16		
5	$\bar{s}_5(+4,+4)$	2		
6	$\bar{s}_6(+4,+3)$	4	+1	64
7	$\bar{s}_7(+3,+2)$	10		
8	$\bar{s}_8(+2,+1)$	14		
9	$\bar{s}_9(+1, 0)$	4		
10	$\bar{s}_{10}(-1, 0)$	4	−1	
11	$\bar{s}_{11}(-2,-1)$	14		
12	$\bar{s}_{12}(-3,-2)$	10		
13	$\bar{s}_{13}(-4,-3)$	4		

Таблица 3

Представление множества базовых путей $\bar{S}_0'$, новых путей комплектования и селективных групп $\bar{j}_3$, заполняемых сборочными комплектами из селективной группы с номером $\bar{j}_3 = 0$

Множество базовых путей	Базовые пути комплектования $\bar{s}_q(j_1, j_2)$	Новые пути комплектования $\hat{s}_q(j_1, j_2)$	Заполняемая селективная группа $\bar{j}_3$		Порядок применения
$\bar{S}_0'(-4,+4)$	$\bar{s}_1(-4, -4)$; $\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_1(-4, 0)$; $\hat{s}_2(0, -4)$	−4	+4	1
	$\bar{s}_5(+4, +4)$; $\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_3(+4, 0)$; $\hat{s}_4(0, +4)$	−4		
$\bar{S}_0'(-3, +3)$	$\bar{s}_1(-4, -4)$; $\bar{s}_2(-1, +1)$	$\hat{s}_5(-4, -1)$; $\hat{s}_6(-1, -4)$	−3	+3	2
	$\bar{s}_5(+4, +4)$; $\bar{s}_4(+1, +1)$	$\hat{s}_7(+4, +1)$; $\hat{s}_8(+1, +4)$	+3	−3	
$\bar{S}_0'(-2, +2)$	$\bar{s}_2(-1, -1)$; $\bar{s}_4(+1, +1)$	$\hat{s}_9(-1, +1)$; $\hat{s}_{10}(+1, -1)$	−2	+2	3
$\bar{S}_0'(-1, +1)$	$\bar{s}_2(-1, -1)$; $\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_{11}(-1, 0)$; $\hat{s}_{12}(0, -1)$	−1	+1	4
	$\bar{s}_4(+1, +1)$; $\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_{13}(+1, 0)$; $\hat{s}_{14}(0, +1)$	+1	−1	
$\bar{S}_0'(0, 0)$	$\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_{15}(0, 0)$	0	0	5

sb918.indd 403 06.09.2018 8:22:38

Таблица 4

Представление множества базовых путей $\bar{S}_1'$, новых путей комплектования и селективных групп $\bar{j}_3$, заполняемых сборочными комплектами из селективных групп с номерами $\bar{j}_3 = \pm 1$

Множество базовых путей	Число путей	Базовые пути $\bar{s}_q(j_1, j_2)$	Новые пути комплектования $\hat{s}_q(j_1, j_2)$	Заполняемая селективная группа $\bar{j}_3$		Порядок применения
$\bar{S}_1'$ (−4,+4)	1	$\bar{s}_6$ (−4, −3); $\bar{s}_{10}$ (+1, 0)	$\hat{s}_{16}$ (−4, 0); $\hat{s}_{17}$ (+1, −3)	+4	−4	1
		$\bar{s}_9$ (−1, 0); $\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\hat{s}_{18}$ (−1, +3); $\hat{s}_{19}$ (+4, 0)	−4	+4	
	2	$\bar{s}_7$ (−3, −2); $\bar{s}_{11}$ (+2, +1)	$\hat{s}_{20}$ (−3, +1); $\hat{s}_{21}$ (+2, −2)			2
		$\bar{s}_8$ (−2, −1); $\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{22}$ (−2, +2); $\hat{s}_{23}$ (+3, −1)			
	3	$\bar{s}_6$ (−4, −3); $\bar{s}_9$ (−1, 0)	$\hat{s}_{24}$ (−4, 0); $\hat{s}_{25}$ (−1, −3)		+2	3
		$\bar{s}_{10}$ (+1, 0); $\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\bar{s}_{26}$ (+1, +3); $\bar{s}_{27}$ (+4, 0)	−2	+4	
$\bar{S}_1'$ (−3, +3)	1	$\bar{s}_7$ (−3, −2); $\bar{s}_{10}$ (+1, 0)	$\hat{s}_{28}$ (−3, 0); $\hat{s}_{29}$ (+1, −2)	−3	+3	4
		$\bar{s}_9$ (−1, 0); $\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{30}$ (−1, +2); $\hat{s}_{31}$ (+3, 0)			
	2	$\bar{s}_8$ (−2, −1); $\bar{s}_{11}$ (+2 +1)	$\hat{s}_{32}$ (−2, +1); $\hat{s}_{33}$ (+2, −1)			5
	3	$\bar{s}_6$ (−4, −3); $\bar{s}_8$ (−2, −1)	$\hat{s}_{34}$ (−4, −1); $\hat{s}_{35}$ (−2, −3)		+1	6
		$\bar{s}_7$ (−3, −2); $\bar{s}_9$ (−1, 0)	$\hat{s}_{36}$ (−3, 0); $\hat{s}_{37}$ (−1, −2)			
	4	$\bar{s}_{11}$ (+2, +1); $\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\hat{s}_{38}$ (+2, +3); $\hat{s}_{39}$ (+4, +1)	−1	+3	7
		$\bar{s}_{10}$ (+1, 0); $\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{40}$ (+1, +2); $\hat{s}_{41}$ (+3, 0)			
$\bar{S}_1'$ (−2, +2)	1	$\bar{s}_8$ (−2, −1); $\bar{s}_{10}$ (+1, 0)	$\hat{s}_{42}$ (−2, 0); $\hat{s}_{43}$ (+1, −1)	−2	+2	8
		$\bar{s}_9$ (−1, 0); $\bar{s}_{11}$ (+2, +1)	$\hat{s}_{44}$ (−1, +1); $\hat{s}_{45}$ (+2, 0)			
	2	$\bar{s}_6$ (−4, −3); $\bar{s}_7$ (−3, −2)	$\hat{s}_{46}$ (−4, −2); $\hat{s}_{47}$ (−3, −3)			9
		$\bar{s}_{12}$ (+3, +2); $\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\hat{s}_{48}$ (+3, +3); $\hat{s}_{49}$ (+4, +2)			
	3	$\bar{s}_7$ (−3, −2); $\bar{s}_8$ (−2, −1)	$\hat{s}_{50}$ (−3, −1); $\hat{s}_{51}$ (−2, −2)			10
		$\bar{s}_{11}$ (+2, +1); $\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{52}$ (+2, +2); $\hat{s}_{53}$ (+3, +1)			
	4	$\bar{s}_8$ (−2, −1); $\bar{s}_9$ (−1, 0)	$\hat{s}_{54}$ (−2, 0); $\hat{s}_{55}$ (−1, −1)			11
		$\bar{s}_{10}$ (+1, 0); $\bar{s}_{11}$ (+2, +1)	$\hat{s}_{56}$ (+1, +1); $\hat{s}_{57}$ (+2, 0)			

являющиеся решениями двухпараметрической задачи комплектования со случайными величинами ξ_1 и ξ_2 и удовлетворяющие условиям, заданным работе [1], назовем базовыми путями. Число базовых путей равно двум, т.е. имеем пару базовых путей. На выбранных базовых путях проводим процедуру перераспределения сборочных комплектов. Так как функции распределения случайных величин ξ_1 и ξ_2 являются симметричными, то существует еще одна пара базовых путей, которую назовем симметричной к выбранной паре базовых путей. Процедура перераспределения сборочных комплектов применяется на текущем шаге и к выбранной паре базовых путей, и к симметричной паре базовых путей. Это приводит к заполнению симметричных селективных групп, определяемых числовым индексом $\bar{j}_3$. На текущем шаге алгоритма для перераспределения сборочных комплектов необходимо использовать четыре

sb918.indd 404 06.09.2018 8:22:39

или два базовых пути. Поэтому в табл. 3 и 4 отдельно выделены пары базовых путей и двойные пары базовых путей.

Шаг 3

Проведем процедуру перераспределения сборочных комплектов на множестве базовых путей $\bar{S}_1'$ (табл. 5).

Шаг 4

В табл. 6 представлено число деталей и сборочных комплектов в селективных группах, которые не были использованы при применении процедуры перераспределения сборочных комплектов на множестве базовых путей $\bar{S}_1'$.

Таблица 5

Перераспределение сборочных комплектов, находящихся в селективных группах с номерами $\bar{j}_3 = \pm 1$, в селективные группы с номерами $\bar{j}_3$

Множество базовых путей	Число путей	Базовые пути $\bar{s}_q(j_1, j_2)$	Новые пути комплектования $\hat{s}_q(j_1, j_2)$	Сборочный комплект $\hat{p}_q(j_1, j_2)$	Число сборочных комплектов на новом пути комплектования	$\bar{j}_3$	Накопленное число сборочных комплектов в $\bar{j}_3$-й селективной группе	Σ
$\bar{S}_1'$ (−4, +4)	1	$\bar{s}_6$ (+4, −3)	$\hat{s}_1$ (−4, 0)	$\hat{p}_1$ (−4, 0)	2	−4	2	2
		$\bar{s}_{10}$ (1, 0)	$\hat{s}_2$ (+1, −3)	$\hat{p}_2$ (+1, −3)		+4		4
		$\bar{s}_9$ (−1, 0)	$\hat{s}_3$ (−1, +3)	$\hat{p}_3$ (−1, +3)		−4	4	6
		$\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\hat{s}_4$ (+4, 0)	$\hat{p}_4$ (+4, 0)		+4		8
$\bar{S}_1'$ (−3, +3)	2	$\bar{s}_6$ (−4, −3)	$\hat{s}_5$ (−4, −1)	$\hat{p}_5$ (−4, −1)		−3	2	10
		$\bar{s}_8$ (−2, −1)	$\hat{s}_6$ (−2, −3)	$\hat{p}_6$ (−2, −3)		+1		12
		$\bar{s}_{11}$ (+2, +1)	$\hat{s}_7$ (+2, +3)	$\hat{p}_7$ (+2, +3)		−1		14
		$\bar{s}_{13}$ (+4, +3)	$\hat{s}_8$ (+4, +1)	$\hat{p}_8$ (+4, +1)		+3		16
	3	$\bar{s}_7$ (−3, −2)	$\hat{s}_9$ (−3, 0)	$\hat{p}_9$ (−3, 0)		−3	4	18
		$\bar{s}_{10}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{10}$ (+1, −2)	$\hat{p}_{10}$ (+1, −2)		+3	6	20
		$\bar{s}_9$ (−1, 0)	$\hat{s}_{11}$ (−1, +2)	$\hat{p}_{11}$ (−1, +2)		−3		22
		$\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{12}$ (+3, 0)	$\hat{p}_{12}$ (+3, 0)		+3	8	24
	4	$\bar{s}_8$ (−2, −1)	$\hat{s}_{13}$ (−2, +1)	$\hat{p}_{13}$ (−2, +1)		−3		26
		$\bar{s}_{11}$ (+2, +1)	$\hat{s}_{14}$ (+2, −1)	$\hat{p}_{14}$ (+2, −1)		+3		28
$\bar{S}_1'$ (−2, +2)	5	$\bar{s}_7$ (−3, −2)	$\hat{s}_{15}$ (−3, −1)	$\hat{p}_{15}$ (−3, −1)	8	−2		36
		$\bar{s}_8$ (−2, −1)	$\hat{s}_{16}$ (−2, −2)	$\hat{p}_{14}$ (−2, −2)		0		44
		$\bar{s}_{11}$ (+2,+1)	$\hat{s}_{17}$ (+2, +2)	$\hat{p}_{17}$ (+2, +2)				52
		$\bar{s}_{12}$ (+3, +2)	$\hat{s}_{18}$ (+3, +1)	$\hat{p}_{18}$ (+3, +1)		+2		60
$\bar{S}_1'$ (−1, +1)	6	—	$\hat{s}_{19}$ (−2, −1)	$\hat{p}_{19}$ (−2, −1)	2	−1	4	62
	7		$\hat{s}_{20}$ (+2, +1)	$\hat{p}_{20}$ (+2, +1)		+1		64

sb918.indd 405 06.09.2018 8:22:41

Таблица 6

Число деталей в селективных группах

j_i	−4	−3	−2	−1	0	+1	+2	+3	+4
p_{1j_1}	2	0	0	16	30	16	0	0	2
p_{2j_2}									
p_{3j_3}			6	18			6		

Шаг 5

Перераспределение сборочных комплектов на множестве базовых путей $\bar{S}_0'$ представлено в табл. 7.

Шаг 6

Для решения модельного примера процедура перераспределения сборочных комплектов сначала осуществлена на множестве $\bar{S}_1'$, а затем на множестве $\bar{S}_0'$ (табл. 8). Два множества $\bar{S}_0'$ и $\bar{S}_1'$ можно объединить в одно множество $\bar{S}_{01}$ и процедуру перераспределения сборочных комплектов можно провести на множестве $\bar{S}_{01}$, $\bar{S}_{01} = \bar{S}_0' \cup \bar{S}_1'$ с другим решением модельного примера.

При решении другого модельного примера может оказаться, что пути комплектования, являющиеся решениями двухпараметрической задачи комплектования со случайными величинами ξ_1 и ξ_2, удовлетворяют не только условиям $j_1 - j_2 = 0, \pm 1$, но и условиям $j_1 - j_2 = \pm 2, \pm 3$ и т.д. В этом случае принципиальный подход для решения рассматриваемой трехпараметрической задачи комплектования не меняется.

Алгоритмы, предложенные для решения трехпараметрической задачи комплектования в данной работе и работе [1], — реализация метода расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования [2]. Процедура перераспределения сборочных комплектов представлена в работе [3].

Таблица 7

Перераспределение сборочных комплектов, находящихся в селективной группе с номером $\bar{j}_3 = 0$, в селективные группы с номерами $\bar{j}_3$

Множество базовых путей	Число путей	Базовые пути $\bar{s}_q(j_1, j_2)$	Новые пути комплектования $\hat{s}_q(j_1, j_2)$	Сборочный комплект $\hat{p}_q(j_1, j_2)$	Число сборочных комплектов на новом пути комплектования	$\bar{j}_3$	Накопленное число сборочных комплектов в $\bar{j}_3$-й селективной группе	Σ
$\bar{S}_0'(-2, +2)$	1	$\bar{s}_2(-1, -1)$	$\hat{s}_{23}(-1, +1)$	$\hat{p}_{23}(-1, +1)$	6	−2	6	6
		$\bar{s}_4(+1, +1)$	$\hat{s}_{24}(+1, -1)$	$\hat{p}_{24}(+1, -1)$		+2		12
$\bar{S}_0'(-1, +1)$	2	$\bar{s}_2(-1, -1)$	$\hat{s}_{25}(-1, 0)$	$\hat{p}_{25}(-1, 0)$	9	−1	9	21
		$\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_{26}(0, -1)$	$\hat{p}_{26}(0, -1)$		+1		30
		$\bar{s}_3(0, 0)$	$\hat{s}_{27}(0,+1)$	$\hat{p}_{27}(0, +1)$		−1	18	48
		$\bar{s}_4(+1, +1)$	$\hat{s}_{28}(+1, 0)$	$\hat{p}_{28}(+1, 0)$		+1		66
$\bar{S}_0'(0, 0)$	3	—	$\hat{s}_{21}(-4, -4)$	$\hat{p}_{21}(-4, -4)$	2	0	2	114
	4		$\hat{s}_{22}(+4, +4)$	$\hat{p}_{22}(+4, +4)$			4	116
	5		$\hat{s}_{29}(-1, -1)$	$\hat{p}_{29}(-1, -1)$	1		5	117
	6		$\hat{s}_{30}(+1, +1)$	$\hat{p}_{30}(+1,+1)$			6	118
	7		$\hat{s}_{31}(0, 0)$	$\hat{p}_{31}(0, 0)$	12		18	130

sb918.indd 406 06.09.2018 8:22:43

Таблица 8

Пути комплектования и число сборочных комплектов на них, определяющие решение модельного примера

Число путей	Пути комплектования, определяющие решение $s_q(j_1, j_2, j_3)$	Сборочные комплекты на пути комплектования $p_q(j_1, j_2, j_3)$	Число сборочных комплектов на пути комплектования $s_q(j_1, j_2, j_3)$	Общее число сборочных комплектов
1	$s_1(-4, 0, -4)$	$p_1(-4, 0, -4)$	2	2
2	$s_2(+1, -3, +4)$	$p_2(+1, -3, +4)$		4
3	$s_3(-1, +3, -4)$	$p_3(-1, +3, -4)$		6
4	$s_4(0, +4, -4)$	$p_4(0, +4, -4)$		8
5	$s_5(-4, -1, -3)$	$p_5(-4, -1, -3)$		10
6	$s_6(-2, -3, +1)$	$p_6(-2, -3, +1)$		12
7	$s_7(+2, +3, -1)$	$p_7(+2, +3, -1)$		14
8	$s_8(+4, +1, +3)$	$p_8(+4, +1, +3)$		16
9	$s_9(-3, 0, -3)$	$p_9(-3, 0, -3)$		18
10	$s_{10}(+1, -2, +3)$	$p_{10}(+1, -2, +3)$		20
11	$s_{11}(-1, +2, -3)$	$p_{11}(-1, +2, -3)$		22
12	$s_{12}(+3, 0, +3)$	$p_{12}(+3, 0, +3)$		24
13	$s_{13}(-3, -1, -2)$	$p_{13}(-3, -1, -2)$		26
14	$s_{14}(-2, -2, 0)$	$p_{14}(-2, -2, 0)$		28
15	$s_{15}(+2, +2, 0)$	$p_{15}(+2, +2, 0)$	8	30
16	$s_{16}(+3, +1, +2)$	$p_{16}(+3, +1, +2)$		38
17	$s_{17}(-2, +1, -3)$	$p_{17}(-2, +1, -3)$		46
18	$s_{18}(+2, -1, +3)$	$p_{18}(+2, -1, +3)$		54
19	$s_{19}(-2, -1, -1)$	$p_{19}(-2, -1, -1)$	2	62
20	$s_{20}(+2, +1, +1)$	$p_{20}(+2, +1, +1)$		64
21	$s_{21}(-1, +1, -2)$	$p_{21}(-1, +1, -2)$	6	70
22	$s_{22}(+1, -1, +2)$	$p_{22}(+1, -1, +2)$		76
23	$s_{23}(-1, 0, -1)$	$p_{23}(-1, 0, -1)$	9	85
24	$s_{24}(0, -1, +1)$	$p_{24}(0, -1, +1)$		94
25	$s_{25}(0, +1, -1)$	$p_{25}(0, +1, -1)$		103
26	$s_{26}(+1, 0, +1)$	$p_{26}(+1, 0, +1)$		112
27	$s_{27}(-4, -4, 0)$	$p_{27}(-4, -4, 0)$	2	114
28	$s_{28}(+4, +4, 0)$	$p_{28}(+4, +4, 0)$		116
29	$s_{29}(-1, -1, 0)$	$p_{29}(-1, -1, 0)$	1	117
30	$s_{30}(+1, +1, 0)$	$p_{30}(+1, +1, 0)$		118
31	$s_{31}(0, 0, 0)$	$p_{31}(0, 0, 0)$	12	130

sb918.indd 407 06.09.2018 8:22:44

Выводы

1. Предложен алгоритм решения трехпараметрической задачи комплектования в случае, когда сопрягаемые параметры деталей — случайные величины с унимодальными, симметричными функциями распределения.

2. Алгоритм решения рассматриваемой трехпараметрической задачи комплектования дает точное решение, обеспечивает собираемость деталей в "ноль", т.е. $j = 0$.

3. Алгоритм служит основой для получения решения трехпараметрической задачи комплектования в случае, когда сопрягаемые параметры деталей — случайные величины с функциями распределения общего вида.

Библиографический список

1. **Сорокин М.Н.** Решение трехпараметрической задачи комплектования частного вида (часть 1) // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 5. С. 212—220.

2. **Сорокин М.Н.** Метод расширения потока для решения трехпараметрической задачи комплектования // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 12. С. 531—535.

3. **Сорокин М.Н., Колтунов И.И., Сазонов Д.А.** Метод перераспределения потока для решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "подшипник" // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 9. С. 7—13.

4. **Сорокин М.Н., Ануров Ю.Н.** Алгоритм решения задачи комплектования при селективной сборке изделий типа "вал—втулка" по методу межгрупповой взаимозаменяемости // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2012. № 9. С. 15—18.

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

sb918.indd 408 06.09.2018 8:22:44

УДК 621.793

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

Многослойные покрытия системы Ti—TiN для режущего инструмента

Рассмотрена технология нанесения наноструктурированного покрытия Ti—TiN на режущий инструмент. Изложены основные требования к защитным покрытиям, наносимым на режущий инструмент, и сформулированы условия, необходимые для выбора материала покрытия.

The technology of application of nanostructured coatings Ti—TiN on a cutting tool is considered. The basic requirements for protective coatings applied to the cutting tool are stated and the conditions necessary for choice of the coating material are formulated.

Ключевые слова: вакуумные ионно-плазменные методы, режущий инструмент, технология, защитные покрытия, работоспособность, наноструктурированные покрытия.

Keywords: vacuum ion-plasma methods, cutting tool, technology, protective coating, performance, nanostructured coatings.

В процессе обработки резанием заготовок на металлорежущих станках режущий инструмент — один из основных факторов, определяющих производительность процесса, точность размеров и качество поверхности. В настоящее время разрабатываются и внедряются различные методы повышения режущих свойств. К новым методам повышения режущих свойств инструментов из твердых сплавов и быстрорежущих сталей относят и методы образования на поверхности инструмента тонких (0,005 мм) пленок нитрида титана.

Метод конденсации при одновременной ионной бомбардировке за счет его высокой технологичности позволяет наносить композиционные и многослойные покрытия различных составов и свойств на основе нитридов металлов IV—VI групп Периодической системы Менделеева практически на любые экспериментальные материалы. При этом стойкость инструмента увеличивается от 2 до 5 раз.

Нанесение на рабочие поверхности инструмента покрытий из высокотвердых соединений уменьшает коэффициент трения, снимает адгезионное взаимодействие с обрабатываемым материалом, уменьшает абразивный износ, предотвращает диффузионный износ, снижает температурно-силовые нагрузки на режущей поверхности.

Поверхностные свойства режущего инструмента с покрытием должны превосходить свойства материала основы. При этом состав покрытия выбирается так, чтобы были выполнены следующие требования:

— способность сопротивляться разрушению и сохранять свойства в условиях высоких давлений и температур;

— схожесть температурных зависимостей таких характеристик, как коэффициент линейного расширения, коэффициент Пуассона, модуля упругости и других для покрытия и инструментального материала. Если изменение свойств матрицы и покрытия с ростом температуры происходит со значительным рассогласованием, то покрытие может разрушиться;

— материал покрытия должен уменьшать склонность инструментального материала

sb918.indd 409 06.09.2018 8:22:44

к схватыванию с материалом обрабатываемой детали, но в то же время адгезионное соединение покрытия с материалом основы должно быть достаточно прочным [1—3];

— при работе на высоких скоростях резания для снижения интенсивности диффузионного износа в основу химического состава покрытия необходимо включать элементы, обладающие пониженной диффузионной подвижностью;

— свойства поверхности инструмента должны соответствовать специфическим особенностям того процесса обработки, для которого служит данный инструмент. Например, при прерывистом резании, имеющем место при фрезеровании, необходим достаточный уровень ударной вязкости, в то время как при чистовом точении ударная вязкость не является решающим фактором, определяющим работоспособность инструмента, и на первый план выходят его износостойкость и химическая пассивность по отношению к обрабатываемому материалу.

Основные направления совершенствования режущего инструмента с покрытием определяются комплексом факторов, которые связаны с совершенствованием свойств покрытий и композиции "покрытие—инструментальная основа", а также с оптимизацией условий использования режущего инструмента с покрытием. При эксплуатации режущего инструмента с покрытием особые требования следует предъявлять к конструкции режущего инструмента и станочному оборудованию (повышение жесткости конструкции режущего инструмента и технологической системы, снижение уровня вибраций и др.) [3, 6].

Многослойные вакуумные ионно-плазменные покрытия должны отвечать следующим требованиям:

— непосредственно примыкающие к инструментальной основе слои должны обеспечивать прочность сцепления;

— верхние слои должны иметь повышенные твердость и прочность, а также минимальное схватывание по отношению к конкретному обрабатываемому материалу.

Повышение работоспособности режущего инструмента с покрытием обеспечивается за счет повышения микротвердости, прочности, трещиностойкости покрытий. Высокая микротвердость, прочность и трещиностойкость покрытий в полной мере не создают условий для высокой работоспособности режущего инструмента. Обладая высокими значениями данных характеристик, покрытие может иметь низкую прочность сцепления с инструментальной основой, что в итоге приведет к отслаиванию покрытия в процессе резания и, в конечном счете, к недостаточной работоспособности режущего инструмента. Поэтому одно из условий высокой долговечности покрытий на рабочих поверхностях режущего инструмента — высокая прочность его сцепления с подложкой. Повысить прочность адгезионной связи покрытия и инструментальной основой можно дополнительной обработкой режущего инструмента с покрытием.

Остаточные напряжения в покрытии оказывают существенное влияние на работоспособность режущего инструмента с покрытием. Увеличение остаточных напряжений в покрытии и, соответственно, перепада напряжений на границе "покрытие — инструментальная основа" приводит к снижению периода стойкости режущего инструмента [2, 5]. Существуют следующие способы снижения остаточных напряжений в покрытиях: создание многослойных структур, имеющих мягкие прослойки с низкими значениями модулей упругости и сдвига; формирование между покрытием и инструментальной основой промежуточного слоя, компенсирующего разницу физико-механических и теплофизических характеристик.

Многослойное покрытие позволяет тормозить развитие трещины за счет создания протяженных полей сжатия (твердые слои, переслоенные более мягкими) и барьера на пути ее движения (мягкие слои). Снижение модуля упругости покрытия до уровня, соответствующего модулю упругости инструментальной основы, позволяет снизить остаточные напряжения в покрытии и уменьшить их перепад на границе раздела "покрытие — инструментальная основа" [4, 5].

Получаемые многослойные наноструктурированные (НС) покрытия, которые состоят из периодически расположенных слоев из различных материалов нанометровой толщины, например, чередующихся Ti и TiN, с характерным размером толщиной слоев менее 100 нм и числом слоев до нескольких десятков, обладают высокими механическими и эксплуатационными

sb918.indd 410 06.09.2018 8:22:45

свойствами. Благодаря особенностям строения, ультрамалой толщины слоев и их большому количеству, а также возможности плотного сопряжения слоев различных материалов, НС покрытия сочетают в себе качества слоистых систем и специфические свойства нанообъектов.

Процесс нанесения НС покрытия на основе Ti—TiN реализуется в среде рабочего газа азота. Предлагаемая технология позволяет в едином операционном пространстве и цикле совместить дуговой разряд, горящий в парах катода и несамостоятельный сильноточный разряд, создаваемым плазмогенератором "ПИНК".

Технология основана на следующих процессах:

— бомбардировка поверхности несамостоятельным сильноточным диффузионным разрядом (НСДР) с помощью плазмогенератора "ПИНК" в среде инертного газа аргона, в результате чего происходят модификация поверхности и ее предварительная очистка;

— дополнительная бомбардировка поверхности НСДР в среде инертного газа аргона;

— испарение материала катода в вакууме;

— осаждение ионов на поверхности с формированием слоя покрытия в среде реактивного газа азота.

В одном технологическом цикле предусмотрено проведение модификации поверхности, предварительной ионной очистки плазмой НСДР в среде инертного газа аргона, нагрев деталей ионами металла и нанесение покрытий в среде реактивного газа.

Предварительную обработку поверхности в целях ее модификации осуществляют низкоэнергетическими ионами аргона при давлении 10^{-1} Па при отрицательном смещении (1100 В). Это позволяет снизить отрицательное воздействие на подложку в виде внедрения ионов плазмы, гарантированно исключить привязывание микродуг, проводить предварительный нагрев при более низкой температуре, а также обеспечить высокую адгезию покрытий вследствие термической активации и образования центров зародышеобразования.

Синтез многослойных покрытий происходит в процессе последовательного осаждения Ti, Ti_2N, TiN из плазмы, создаваемой электродуговым испарителем. Покрытия формировались при одновременном воздействии плазмогенератора "ПИНК".

Равномерность распределения толщины формируемых покрытий осуществлялась планетарным вращением обрабатываемой детали относительно собственной оси и одновременно вокруг оси стола.

Предлагаемая технология позволяет формировать многослойные НС покрытия с толщинами слоев до 150 нм и многослойные покрытия с микрометровыми слоями. Число слоев и их толщина задаются режимами напыления.

Сложность назначения и расчета режимов обработки обусловлена тем, что совместное действие управляющих факторов приводит к большому разбросу параметров покрытий. Точные расчеты возможны только на основе применения компьютерных технологий.

Технология плазменно-ассистированного нанесения НС покрытия композиции Ti—TiN включает в себя (рис. 1):

— предварительную подготовку обрабатываемых деталей;

— загрузку обрабатываемых деталей в камеру и откачку воздуха из камеры;

— модификацию поверхности в плазме несамостоятельного сильноточного диффузионного разряда в среде инертного газа аргона;

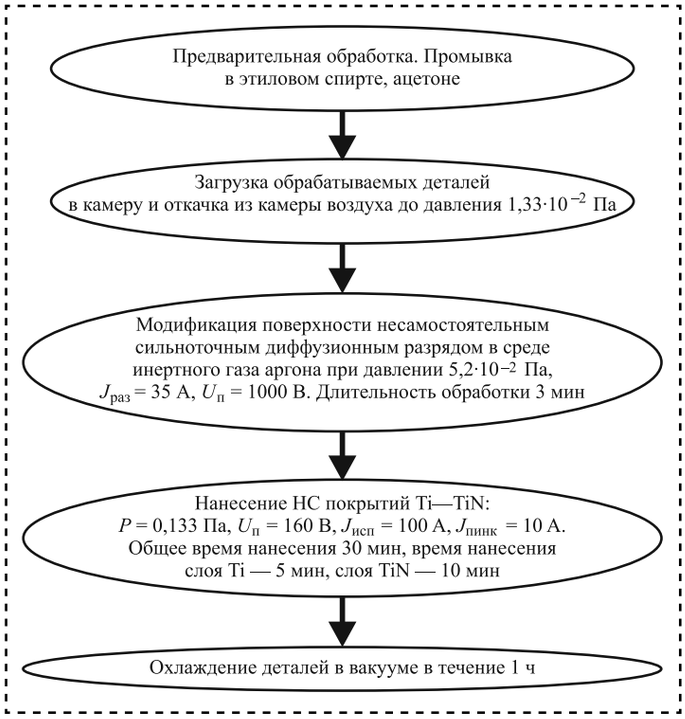


Рис. 1. Схема технологического процесса осаждения наноструктурированного покрытия системы Ti—TiN

sb918.indd 411 06.09.2018 8:22:45

— подачу рабочего газа азота в вакуумную камеру;

— плазменно-ассистированное нанесение многослойного защитного покрытия на основе композиции Ti—TiN;

— охлаждение обработанных деталей в вакууме.

Предварительная подготовка поверхности (химическая очистка) — удаление с поверхности видимых слоев органических загрязнений: остатков масел, смазочных материалов, отпечатков пальцев и жировых пятен с помощью органических растворителей: этилового спирта, ацетона. В особо ответственных случаях очистку проводят в ультразвуковых ваннах.

Модификацию поверхности и активирование на ней центров адсорбции и адгезии НСДР проводили с помощью плазменного источника "ПИНК" в среде инертного газа аргона при давлении $5{,}2 \cdot 10^{-2}$ Па. Напряжение на подложке не менее 1000 В при токе НСДР 35 А, длительность обработки 3 мин.

Модификация поверхности ионами аргона активирует поверхность и приводит к высокой концентрации участков зародышеобразования на поверхности.

Следующая стадия технологии — плазменно-ассистированное нанесение многослойных НС покрытий композиции Ti—TiN. Наносили НС покрытия при давлении в камере 0,133 Па, потенциал на подложке 160 В и при токе дуги электродугового испарителя 100 А. Осаждение покрытий проводили с одновременной бомбардировкой ионами рабочего газа, генерируемыми плазменным источником "ПИНК", ток НСДР 10 А. В качестве переходного слоя использовали слой титана.

Предлагаемая технология позволяет формировать покрытия как с микро-, так и с нанометровыми слоями. Размер слоев и их число задается режимами напыления и расположением обрабатываемой поверхности относительно плазменного потока.

Рассмотренная технология позволяет наносить многослойные НС покрытия, многослойные композиты, покрытия с микрометровыми слоями, предназначенные для защиты рабочих поверхностей лопаток компрессора ГТД от агрессивного воздействия внешней среды.

В качестве катода использовали технически чистый титан марки ВТ1-0. В процессе осаждения покрытий приспособление с закрепленными на нем обрабатываемыми деталями планетарно вращается, обеспечивая более равномерное распределение толщины формируемых покрытий.

Варьирование подаваемыми газами позволило формировать покрытия в едином операционном пространстве и цикле. Время осаждения покрытия — 30 мин. При осаждении многослойного покрытия время напыления слоя Ti составляет 5 мин, слоя TiN — 10 мин.

Установлено, что режимы $J_д = 50$А, $U_п = 120$ В, при давлении 10^{-1} Па являются оптимальными параметрами для формирования многослойного покрытия системы Ti—TiN.

Температура процесса формирования слоев на подложке составляет 400...450 °С. Приносимая осаждаемыми частицами энергия способствует нагреву обрабатываемой детали. Относительно невысокая температура, создаваемая потоком, особенно важна для осаждения покрытий на инструментальные материалы.

Предлагаемая технология позволяет формировать многослойные покрытия с толщинами слоев до 100 нм и с микрометровыми слоями, содержащими в поверхностном слое нитриды титана.

Нанесенные покрытия системы Ti—TiN обладают высокой адгезией к основному материалу. Исследование отпечатка алмазной пирамидки при увеличении с помощью оптического микроскопа показало, что материал покрытия вблизи зоны воздействия не растрескивается, что косвенно свидетельствует о высокой адгезии покрытия.

Исследование адгезионной прочности покрытий на приборе CSM Scratch Test методом царапания показало удовлетворительную адгезию.

На рис. 2 показано начало разрушения покрытия Ti—TiN при увеличении нагрузки на индентор в процессе царапания.

С уменьшением толщины пленки до 100 нм ее поверхностные свойства начинают доминировать над объемными [3—6]. При этом тонкие пленки имеют физические свойства, которые существенно отличаются от свойств объемных образцов из того же материала.

Они зависят не столько от химического состава, сколько от формы и размеров наноструктур и во многих случаях на порядки превосходят характеристики монолитных материалов. Объясняется это более совершенной

sb918.indd 412 06.09.2018 8:22:45

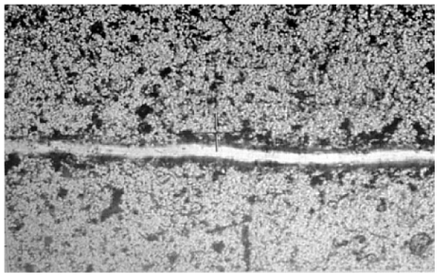


Рис. 2. Оценка адгезионной прочности покрытия на образце с многослойным наноструктурированным покрытием Ti—TiN методом царапания

структурой сверхтонких пленок и более высокой внутренней энергией за счет перераспределения вклада в прочностные свойства материала поверхности по сравнению с объемом.

Толщина осажденных многослойных покрытий, согласно данным микроструктурного анализа, составила 5...7 мкм. Эти данные согласуются с результатами расчетов весовым методом.

Исследование остаточных напряжений осажденных многослойных покрытий, проведенных по методике Давиденкова, показали, что покрытия обладают низким уровнем остаточных напряжений.

Разработана технология ионно-плазменного осаждения покрытий Ti—TiN в условиях дополнительной ионной бомбардировки, обеспечивающая повышение качества поверхностного слоя инструментального материала и высокую адгезионную прочность покрытий.

Установлено, что при осаждении многослойного НС покрытия на основе Ti—TiN наблюдается повышение коррозионных свойств на 20...35 % по отношению к однослойным покрытиям.

Увеличение числа слоев приводит к дальнейшему повышению коррозионной стойкости и повышает эрозионную стойкость в 1,3 раза по сравнению с однослойными покрытиями

Библиографический список

1. **Будилов В.В., Киреев Р.М., Шехтман С.Р.** Технология вакуумной ионно-плазменной обработки. М.: Издательство МАИ, 2007. 155 с.
2. **Криони Н.К., Мигранов М.Ш.** Покрытия и смазки для высокотемпературных трибосопряжений. М.: Инновационное машиностроение. 2016. 327 с.
3. **Мигранов М.Ш., Мигранов А.М., Минигалеев С.М., Шехтман С.Р.** Износостойкость композиционных покрытий для режущего инструмента // Вестник МГТУ "Станкин". 2017. № 4 (43). С. 38—42.
4. **Migranov M., Migranova R.** Tool coatings with the effect of adaptation to cutting conditions // Key Engineering Materials. 2012. Vol. 496. P. 75—79.
5. **Vereschaka A.A., Migranov M.S.** Study of wear resistance of sintered powder tool materials // Advanced Materials Research. 2014. Vol. 871. P. 159—163.
6. **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. № 20. P. 9282—9286.
7. **Гончаров В.С.** Методы получения защитных покрытий // Машиностроитель. 2001. № 5. С. 30—33.

sb918.indd 413 06.09.2018 8:22:45

УДК 629.3.014.2.017

А.В. Дунаев, *канд. техн. наук (ФНАЦ ВИМ, Москва),*
О.Г. Павлов *(ТК "НЕОСФЕРА", Санкт-Петербург),*
И.Ф. Пустовой *(ООО "РеалИнПроект", Санкт-Петербург),*
В.Г. Рыжов *(ООО "ТРИГГЕР", Санкт-Петербург)*
E-mail: dunaev135@mail.ru

Механизмы образования триботехнических покрытий при использовании серпентиновых геомодификаторов трения

Рассмотрены свойства триботехнических покрытий, а также возможные механизмы их образования при вводе в масла сопряжений трения серпентиновых геомодификаторов — гидросиликатов магния, никеля, алюминия.

Analyzed the properties of triborate, and possible mechanisms of their formation when you type in oil mate friction serpentine geomodificators — hydrosilicates of magnesium, nickel and aluminum.

Ключевые слова: покрытие, состав, свойства, ювенильная поверхность, частица минерала, активация, полимеризация, углерод, химическая активность.

Keywords: coating, composition, properties, juvenile surface, mineral particles, activation, polymerization, carbon, chemical activity.

За 25-летнее развитие российской технологии "безразборного ремонта" практически всех узлов трения вводом в их смазку высокодисперсных серпентиновых минералов, названных геомодификаторами трения (ГМТ), показало ее актуальность, эффективность и высокую рентабельность [1]. ГМТ-технология апробирована на самых разных изделиях гражданского и военного машиностроения в РФ и за рубежом [2—4]. Однако коренные проблемы этой технологии и механизм работы геомодификаторов раскрыты лишь частично [3, 5, 6].

Ранние гипотезы образования ГМТ-покрытий из серпентинов (гидросиликатов магния, никеля, алюминия с примесями) нагартовкой, образованием металлокерамики, диффузией компонентов серпентинов, ионообменом металлов [2] и другие — не состоятельны.

На поверхностях ГМТ-покрытий до 90 % углерода (рис. 1—3), мало кремния, железа. ИК-спектроскопия в покрытии показала связи С—Н, С=О, С—О—С, О—Н и немного ароматических углеводородов. Даже под незначительным воздействием электричества покрытие сгорает.

Основные показатели ГМТ-покрытий: прозрачность, зеркальная поверхность (*Ra* 0,012) (рис. 4, 5), высокая твердость, антифрикционность [1, 3, 4], но гидрофобность (угол смачивания водой 58°, а на стали — 12° [3]), полярнее минерального масла (угол смачивания при нанесении тонкого слоя масла 85°), не смывается растворителями, окрашивается красителями.

Факторы образования покрытий — температура и давление [1]. Толщина покрытий на деталях ДВС — до 15 мкм; на шейках кривошипа тяжелых прессов — до 100 мкм; зубьях шестерен — 0,2, 0,3, 0,6 и 1 мм (данные ВМА им. Н.Г. Кузнецова и НПИФ "Энион-Балтика).

Трибоплазма обусловливает полимеризацию компонентов трибосреды и формирование прозрачных *DLC*-пленок гибридизацией атомов углерода (рис. 6). Твердость пленки 1850 HV на 50 % выше, чем у азотированной стали (данные В.В. Острикова); коэффициент

sb918.indd 414 06.09.2018 8:22:45

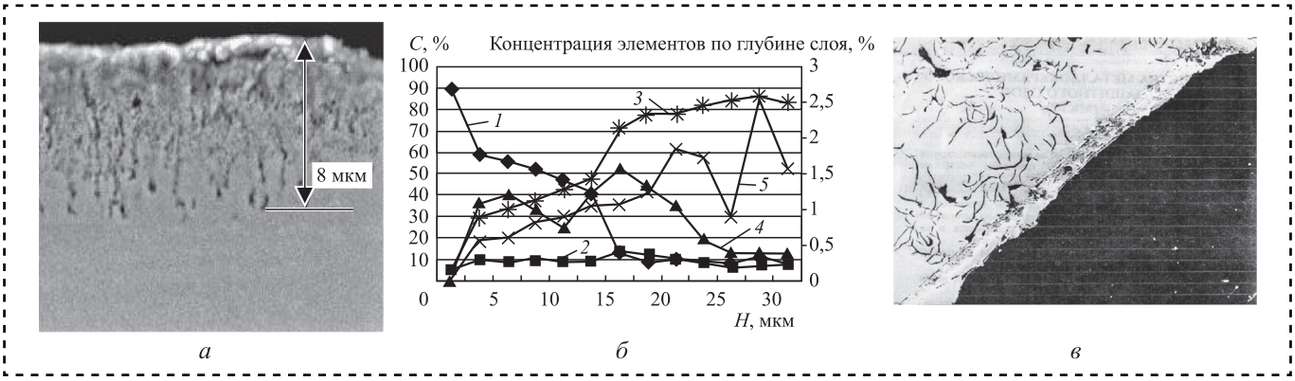


Рис. 1. Характеристики ГМТ-покрытий:
а — срез гильзы цилиндра дизеля 16V280Z тепловоза TF-11 с пробегом 150 тыс. км после двойной обработки геомодификаторами (дизели 103 тепловозов обработаны в 1999—2000 гг. О.П. Гужевым составами РВС от И.В. Никитина, В.К. Матвеева и И.Ф. Пустового), просматривается граница между подложкой и покрытием, ×4000; *б* — динамика элементного состава покрытия по глубине по данным химического Центра Хельсинки (график Ю.Г. Лаврова), на поверхности — химические элементы детали, а выше состав меняется с преобладанием углерода; *1* — C; *2* — O; *3* — Fe (оксид); *4* — Si; *5* — Fe (металл); *в* — шлиф гильзы цилиндров ДВС автомобиля "Волга" из феррито-перлитного чугуна с некачественным трибопокрытием 25...50 мкм из-за загрязненного масла [2] (обработку ДВС провели при пробеге 160 тыс. км без очистки системы смазки, без смены масла, а позже эксплуатировали автомобиль без масла в ДВС, при пробеге 180 тыс. км ДВС разобрали, шлифы анализировали в НПО "Прометей"), ×4000

трения в паре сталь/сталь с синтетическим маслом снижен на 30 %; при испытаниях трибосоставов С.А. Сокола на трибометре TRB-S-DE по схеме палец—диск в масле М-10-$Г_2$(к) под давлением 60...80 МПа коэффициенты трения 0,027...0,030 [1].

В лаборатории трибологии Пекинского университета Цинхуа по заказу ТК "Неосфера" (СПб) избирательной зонной дифракцией, атомной электронной спектроскопией и конфокальной Раман-спектроскопией проведены анализы ГМТ-покрытий на гильзах тепловоз-

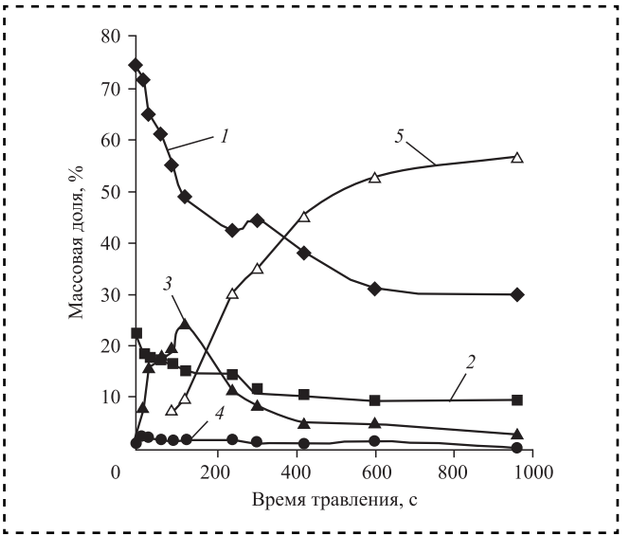


Рис. 2. Выявление травлением динамики элементного состава углеродсодержащего покрытия, образованного в трибопроцессе с алюминий-содержащей смазочной композицией (исследования В.Ф. Пичугина [5]): в верхнем слое поверхности трения преобладает углерод

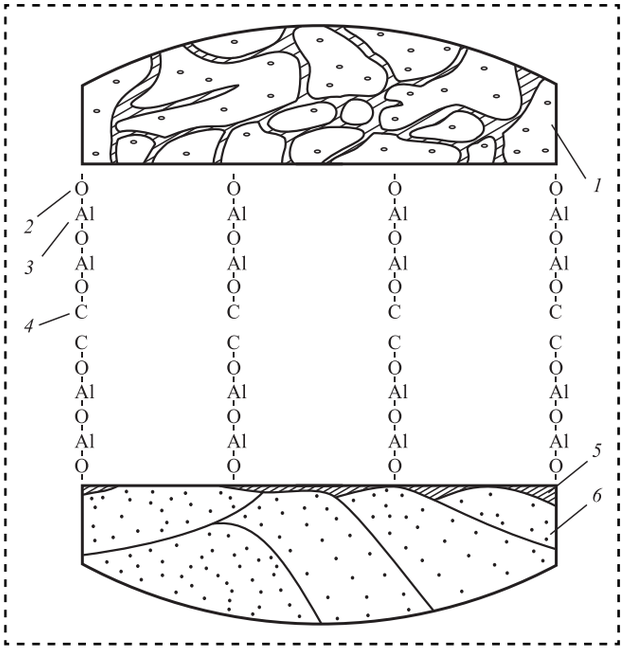


Рис. 3. Строение покрытия на поверхностях пары трения антифрикционный сплав — сталь, работавшей в глицерине (по В.Ф. Пичугину [6]):
1 — сплав алюминия; *2* — кислород; *3* — оксиды алюминия; *4* — углерод; *5* — алюминиевый сплав; *6* — сталь (наверху обеих деталей — углеродная пленка)

sb918.indd 415 06.09.2018 8:22:45

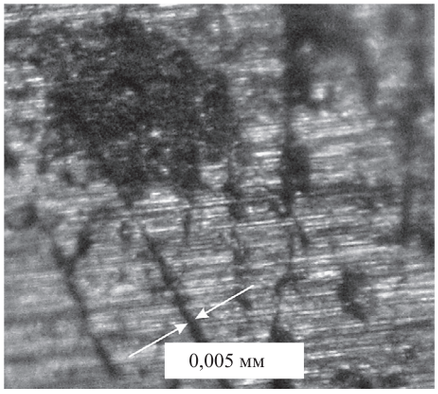


Рис. 4. Поверхность гильзы цилиндра ДВС (при освещении под острым углом) после пробега автомобиля 80 тыс. км до и 4500 км после обработки составом РВД (В.Г. Рыжов, ООО "Триггер"), ×100:
покрытие на гильзе в стадии наращивания имеет золотистый цвет, зеркальную поверхность; наклонные черные линии — риски заводского хонингования (исходная ширина 30...40 мкм); темное пятно — естественная каверна на чугуне; золотистые линии — частицы ГМТ-покрытия

ного дизеля, а также лабораторные испытания ГМТ. Выявлено, что тонкоизмельченные смеси серпентинов состава А.Р.Т. способствуют [4]:

— механохимическим реакциям благодаря эмиссии частиц высоких энергий с образованных свежих (ювенильных) поверхностей;

— трибокаталитической карбонизации, графитизации и образованию твердых углеродсодержащих соединений;

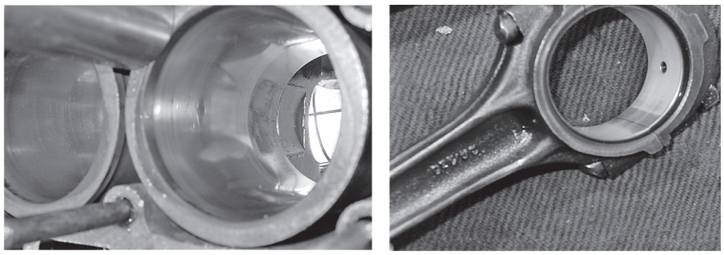
— частичному пиролизу масел под влиянием каталитических элементов в ГМТ.

ГМТ-покрытия содержат: углерод (60...65 %, а на самой поверхности до 100 %); железо (15...17 %) — продукт износа; кислород и водород трибохимических реакций; Si и Mg — менее 1 %. Толщина покрытий от пяти до нескольких десятков микрометров с упорядоченной аморфно-кристаллической структурой. Подтверждены низкие коэффициент трения и теплопроводность, высокая прочность, микротвердость и коррозионная устойчивость ГМТ-покрытий [1, 4].

ГМТ-покрытие на гильзах цилиндров дизеля 16V280Z тепловоза TF-11 (после пробега 150 тыс. км [4]) толщиной 8...10 мкм разделено пополам на подслой и слой с различным элементным составом. Элементы из серпентина (Mg и Si) также не выявлены. Параметр шероховатости 0,0694 мкм — ультрагладкая зеркальная поверхность. Микротвердость покрытия H = 12,72 ГПа, а модуль упругости Юнга E = 210 ГПа; а отношение (H/E), как важный трибологический параметр — 0,0606 [4].

В лабораторных условиях [4] покрытие создавали на трибометре за 240 ч из состава А.Р.Т. концентрацией 1,6 г/л в моторном масле SD/CC SAE 40. Далее масло было слито и проведено трибоиспытание с давлением до 1,43 МПа, скорости скольжения 0,1 м/с. При этом покрытие обеспечило стабильно низкий коэффициент трения 0,005, т.е. супермаслянистость (superlubricity). Химический состав покрытия — анизотропная нанокристаллическая матрица из Fe_3C с рассредоточенными наночастицами чистого железа, магнитного оксида железа Fe_3O_4 и пероксида железа FeOOH [4].

Лабораторное покрытие — компактная структура толщиной 2 мкм без четко различимой границы с подложкой [4]. Микротвердость также больше в два раза, чем на стали 45. Минимальная нанотвердость 13,32 ГПа и максимальная упругость 240 ГПа (H/E = 0,0555), также соответствуют высоким трибологическим свойствам покрытий. Здесь обеспечены очень небольшая упругая деформация с эластичным микроконтактом, что исключает пластическую деформацию, адгезию и истирание. Этому способствуют слабые водородные связи оксидов и гидрооксидов железа в покрытии без адгезии с аналогичной встречной поверхностью благодаря наночастицам Fe_3O_4, рассеянным в матрице сплава Fe—C (карбида железа Fe_3C), а также



а *б*

Рис. 5. Детали ДВС ЗМЗ-402 автомобиля Волга ГАЗ-31029 (пробег 690 тыс. км, обработка при пробеге 110 тыс. км серпентиновым составом РВД):
а — чугунные гильзы цилиндров; *б* — подшипник нижней головки шатуна

sb918.indd 416 06.09.2018 8:22:46

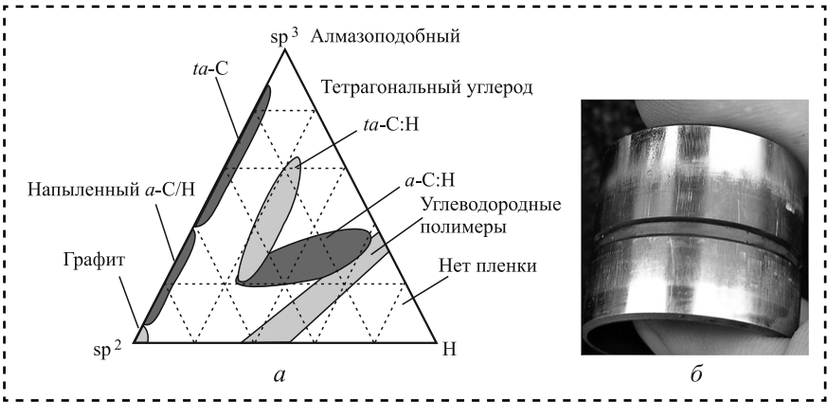


Рис. 6. Образование алмазоподобных углеродных пленок (*DLC*-пленки): *а* — трехфазная диаграмма Робертсона и Феррари и области образования соединений с sp^2 и sp^3-типовыми гибридизациями углерода в зависимости от содержания в среде водорода и углерода [1]; *б* — гидрокомпенсатор ГРМ дизеля MAN с алмазографитной пленкой (данные С.А. Сокола)

наноразмерность шероховатости зеркальной чистоты [4].

Раман-спектрометрия [9] поверхности гильзы цилиндра дизеля показала наличие равных по интенсивности *D*- и *G*-пиков углерода, т.е. аморфные нанозерна в покрытии вероятны из *DLC*-структур. Таким образом, доказано, что серпентины $\{Mg_6(Si_4O_{10})(OH)_8\}$ устойчиво генерируют ГМТ-покрытия в лабораторных и эксплуатационных условиях [1—4].

Но эти антифрикционные, противоадгезионные (т.е. как бы не активные) покрытия, поверхности которых далеки (до сотен микрометров) от подложки, как бы противоестественным способом продолжают свое наращивание. Это не опровергает ли вышеизложенное?

А.С. Ахматов обобщил механохимические воздействия на цепочечные молекулы углеводородов с разрывом в цепях, с протеканием необычных химических реакций [7]. Под действием больших локальных давлений нарушаются ковалентные связи с энергией порядка 100 ккал/моль, разрываются связи С—С с энергией порядка 80 ккал/моль и возникают свободные, высокой реакционности радикалы, например $R—CH_2^{\cdot}$. А с их образованием дальнейший ход реакций может быть различен. Возможны также и прямые химические реакции свободных радикалов с ювенильной поверхностью металлов по схеме:

$$R — (CH_2)_n \ldots CH_2—Me.$$

А.С. Ахматов предвидел: "...механической деструкции могут подвергаться высокомолекулярные молекулы смазки... Именно этим и частично объясняется смазочная способность неполярных углеводородов" [7]. Поэтому неоднократно выявляли трибодеструкцию смазок с выделением водорода и метана, а также образование на активных частицах минералов и на точках поверхностей трения полимерных пленок [3].

Этапы образования ГМТ-покрытия:

— абразивная и кавитационная очистка измельчаемыми, активируемыми частицами ГМТ-поверхностей от окисных пленок и непрочных структур с открытием ювенильных, каталитически активных кристаллов, о которых указано еще А.С. Ахматовым [7]; вывод загрязнений в масло и в маслофильтры, что подтверждается многими ГМТ-технологами;

— активность поверхностей трения и измельченных частиц минерала создает на кристаллах металлов минеральную наноразмерную структуру (рис. 7) [3];

— на остриях минеральных кристаллов идет трибополимеризация аморфного микропористового покрытия [3]; данные ИК-спектрометрии, по высокой работе когезии говорят о том, что покрытие прочно пришито к подложке [3];

— дальнейшее необъяснимое наращивание *DLC*-пленок без ГМТ и даже на сухую.

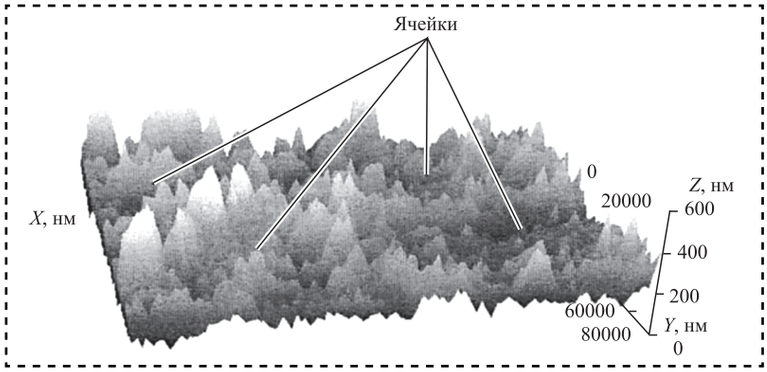


Рис. 7. Топография поверхности после трения в смазочной композиции с ГМТ: пространственная сталагмитовая структура, выросшая по граням кристаллов металлов, на которой растет антифрикционное ГМТ-покрытие [3]

sb918.indd 417 06.09.2018 8:22:46

Уникальные свойства атомов углерода обусловливают возможность образования углеродных алмазоподобных пленок [8].

Число валентных электронов атома углерода и число их валентных орбит одинаково, это одна из причин устойчивых связей между атомами углерода и связей с другими элементами. Способность атомов углерода образовывать между ними четыре равнозначные связи обусловливает разнообразие углеродных структур: линейные, разветвленные, циклические. Ковалентные связи углерода одинаковы как при притяжении, так и при отдаче электронов с координационными числами 4, 3 и 2, со степенями окисления -4, + 2, + 4 [8]. Все это способствует разнообразию трибохимических процессов. В нашем случае интересны жидкий углерод, получаемый при давлении выше 10,5 МПа и температуре выше 3700 °С, а также карбин — черный мелкокристаллический порошок плотностью 1,9...2,0 г/см^3.

Это возможно подтверждается и образованием углеродных покрытий при введении в смазки наноалмазных составов КАРАТ-М (ООО "РеалДзержинск"), КАРАТ-5 и наноуглеродных волокон "GRAF-SB" Красноярского ИХХТ СО РАН, когда на поверхностях трибопар образуются цепочки связей Ме—С—С [9].

Исследования, проведенные в лаборатории трибологии ИПМех им. А.Ю. Ишлинского РАН И.Г. Горячевой [2] показали, что переход в трении от физической к химической адсорбции может проявляться в областях с повышенной температурой и контактным давлением, где в локальных разрушениях и окислении поверхностей повышено содержание углерода и кислорода. Отмечена трибополимеризация смазки и других веществ, образующих радикалы и полимерную "подушку", представляющую эффективный смазочный слой.

По влиянию ГМТ "Форсан" на химический состав и структуру поверхностных слоев подшипниковых сплавов установлено, что на их поверхностях контакта также создается активная трибологическая среда со значительной гетерогенностью по структуре и составу, более активно происходят массоперенос и образование диссипативных дисперсных структур, менее склонных к схватыванию. В образовании покрытий участвуют частицы износа, а также углерод, кислород и сера, адсорбируемые из трибосреды.

Заключение

Ведущие механизмы образования ГМТ-покрытий в смазках — это механоактивация поверхностей трения и частиц минералов, адгезия активных радикалов, минерализация наноразмерного каркаса, трибополимеризация на нем компонентов трибосреды, а дальнейшее наращивание углеродной пленки происходит вследствие химической активности возбуждаемых трением атомов углерода с поглощением нескомпенсированными их связями компонентов трибосреды.

Считается, что ГМТ-процесс может идти без смазок, в водных, в атмосферных условиях, но возможно, что здесь идут другие процессы и для их выяснения необходимы данные о структуре и фазовом составе покрытий. Общим в образовании ГМТ-покрытий в смазках и на сухую является активация поверхностей трения минералами, а самих частиц — разрушением. Поэтому для ГМТ-процесса необходимо обеспечить соответствующий минеральный и фракционный состав серпентинов, время для образования первичного минерального каркаса и трибосреду для реализации химической активности атомов углерода.

Библиографический список

1. **Дунаев А.В., Шарифуллин С.Н.** Модернизация изношенной техники с применением трибопрепаратов. Казань: Издание Казанского университета. 2013. 272 с.
2. **Васильков Д.В., Пустовой И.Ф., Пустовой Н.И.** Анализ поверхностного слоя, формируемого минеральными модификаторами поверхности трения. М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. Т. 107. Ч. 2. С. 11—13.
3. **Любимов Д.Н., Долгополов К.Н.** Формирование смазочных слоев под воздей-ствием на поверхности трения минеральных модификаторов трения // Трибология. Международная энциклопедия. Т. V. Масла, смазки, присадки для подвижных трибосопряжений, герметизация и уплотнения. СПб.: ПГУПС, 2013. С. 352—357.
4. **Yuansheng J., Shenghua L.** Superlubricity of in situ generated protective layer on worn metal surfaces in presence of $Mg_6Si_4O_{10}(OH)_8$ // Superlubricity. Edited by Ali Erdemir Argonne National Laboratory. Argonne, USA; and Jean-Michel Martin. Ecole Centrale de Lyon, Lyon, France. Elsevier B.V., 2007. P. 445—469.
5. **Додонова Д.А., Пичугин В.Ф., Лаптев Д.В.** Влияние алюминийсодержащей смазочной композиции на процессы трения и изнашивания металлических пар. М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. Т. 108. С. 245—249.
6. **Пичугин В.Ф., Щербинин В.М.** Элементный состав, строение и толщина защитных пленок на поверхностях трения пары антифрикционный сплав—сталь в глицерине. М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. Т. 108. С. 250—253.
7. **Ахматов А.С.** Молекулярная физика граничного трения М.: Физматгиз, 1963. 472 с.
8. **Углерод.** БСЭ. Т. 26. М.: Советская энциклопедия, 1972. С. 448—450.
9. **Селютин Г.Е. и др.** Применение модифицированных наноалмазов для увеличения ресурса узлов трения. М.: Труды ГОСНИТИ, 2011. Т. 107. Ч. 2. С. 25—29.

sb918.indd 418 06.09.2018 8:22:47

УДК 539.62+617.3

И.И. Емаев, Н.К. Криони, *д-р техн. наук*
(Уфимский государственный авиационный технический университет),
Б.Ш. Минасов, *д-р мед. наук (Башкирский государственный медицинский университет, г. Уфа),*
Л.Ш. Шустер, *д-р техн. наук (Уфимский государственный авиационный технический университет),*
Р.Р. Якупов, *д-р мед. наук (Башкирский государственный медицинский университет, г. Уфа)*
E-mail: okmim@ugatu.ac.ru

Зависимость износа эндопротезов тазобедренного сустава от показателей адгезионного взаимодействия пары трения "головка — вкладыш"

Экспериментально получена функциональная зависимость скорости изнашивания узла трения "головка—вкладыш" эндопротезов из различных материалов от триботехнического параметра β, выражающего степень влияния давления на прочность $\tau_п$ адгезионных связей на срез.

The functional dependence of speed of deterioration of unit of friction "head — liner " endoprostheses from various materials from parameter of durability of coupling is experimentally received at friction.

Ключевые слова: пара трения "головка—вкладыш", эндопротезы, скорость изнашивания, прочность адгезионных связей на срез, коэффициент упрочнения.

Keywords: pair of friction "head—liner", endoprosthese, speed of deterioration, durability of coupling at friction, factor of hardening.

Введение

Артропластика тазобедренного сустава — один из наиболее эффективных способов двигательной реабилитации при поражениях крупных суставов скелета.

Эндопротез тазобедренного сустава (ЭТБС) представляет собой кинематический узел трения, состоящий из вертлужного компонента, вкладыша, шаровидной головки и бедренного компонента.

Головку эндопротеза изготавливают из керамических материалов или сплавов на основе кобальта, молибдена и хрома. Поверхность головки имеет высокий квалитет шероховатости (полируется) для обеспечения скольжения внутри вертлужного компонента (вкладыша) эндопротеза.

Вертлужный компонент (вкладыш) изготавливают из керамики, металла, ультравысокомолекулярного полиэтилена или полиэтилена, усиленного металлическими элементами.

Применяемые в эндопротезах материалы обладают следующими свойствами:

— биосовместимостью с тканями человеческого организма;

— устойчивостью к коррозии, изнашиванию и разрушению;

— механическими характеристиками, соответствующими заменяемым биологическим структурам.

В значительной мере срок службы эндопротеза зависит от износостойкости материалов в узле трения. По видам материалов пар трения различают следующие сочетания [2]: металл — металл; металл — керамика; металл — полиэтилен; керамика — полиэтилен; керамика — керамика. Работают эти сочетания в биологической среде — синовиальной жидкости, вырабатываемой организмом или при ее отсутствии при патологиях и начале движения.

Наибольшее применение нашли эндопротезы с головками диаметром 28, 32 и 36 мм.

sb918.indd 419 06.09.2018 8:22:47

Основные проблемы эндопротезирования суставов в настоящее время: изнашивание эндопротезов и воспалительные реакции тканей, инициированные продуктами износа [3]. Повышение трибологического ресурса эндопротезов способствует возрастанию уровня медицинского обслуживания населения.

Многолетний опыт эндопротезирования позволил установить наиболее рациональное сочетание материалов пары трения "головка — вкладыш" в ЭТБС [3] и определить средние скорости изнашивания этих трибосопряжений [4]. Эти результаты, как правило, получены в лабораториях фирм-производителей эндопротезов на аппаратуре, имитирующей работу тазобедренного сустава человека. С одной стороны, эти результаты конкретны, реальны и отвечают на поставленные вопросы. Но с другой стороны, полученные результаты в ряде случаев противоречивы, что затрудняет делать какие-либо обобщающие научные выводы и давать перспективные рекомендации с учетом трибологической совместимости контактирующих поверхностей.

Процесс смазывания искусственных суставов (в том числе, эндопротезов) происходит по иным механизмам, чем смазывание синовиальных суставов. Пары трения эндопротезов состоят из жестких и непористых материалов, которые не позволяют реализовать биофизические механизмы смазки, свойственные хрящу. Кроме того, в эндопротезах электрический потенциал поверхностей трения невозможно регулировать. Поэтому в эндопротезах не используются уникальные трибологические свойства синовиальной жидкости (СЖ) и не работает механизм смазки синовиальных суставов, что не позволяет реализовать механизм низкого трения, связанный с оптимизацией структуры и трибологическими характеристиками жидкокристаллической составляющей СЖ. В результате этого при нагрузках и скоростях скольжения, характерных для сустава человека, СЖ обусловливает недостаточное смазывание эндопротезов. Можно предположить, что имплантированные эндопротезы работают в режиме граничного трения, т.е. гидродинамический эффект смазывания может иметь место лишь на малых участках трения. На других участках происходит соприкосновение микронеровностей или они разделены весьма тонкой (доли микрометров) пленкой СЖ, которая уже не может оказывать существенного влияния на трение. В результате этого происходит адгезионно-усталостное изнашивание контактирующих поверхностей.

Интенсивность адгезионного изнашивания трибосопряжений в машинах функционально связана с показателями адгезионного взаимодействия контактирующих материалов и, прежде всего, зависит от коэффициента β, выражающего степень влияния давления p_r на прочность $\tau_п$ адгезионных связей на срез [5, 6]. Коэффициент β в значительной мере отражает индекс *C* совместимости трущихся поверхностей [5].

Цель работы — установление зависимости скорости изнашивания трибосопряжения "головка—вкладыш" ЭТБС из различных материалов от показателей адгезионного взаимодействия (с учетом давления), в том числе от индекса *C* совместимости трущихся поверхностей.

Методика исследования

Выполнено исследование различных пар трения эндопротезов тазобедренного сустава, соответствующих техническим условиям, предъявляемым к современным имплантатам из материалов, получивших наибольшее распространение: головка и вкладыш с преимущественным содержанием кобальта, хрома и молибдена (Мет), головка и вкладыш из керамики с содержанием диоксида алюминия более 80 %, диоксида циркония около 17 % (АКер), вкладыш из поперечно-связанного полиэтилена (Пол) — при сухом трении и в условиях биологической среды (с добавлением в узел трения СЖ). Исследованы четыре трибологические пары диаметрами 28, 32 и 36 мм в следующих сочетаниях материалов: Мет—Мет, Мет—Пол, АКер—АКер, АКер—Пол.

Среднестатистические данные по изнашиванию эндопротезов с соответствующими материалами пары трения "головка—вкладыш", имплантированных в живой организм человека, заимствованы из публикаций [4, 8].

Полученные результаты и их обсуждение

Для всех испытанных пар трения ЭТБС (в условиях наличия или отсутствия биологической среды) прочность $\tau_п$ адгезионных связей на срез возрастает при повышении давления p_r с коэффициентом пропорциональности β (рис. 1):

sb918.indd 420 06.09.2018 8:22:47

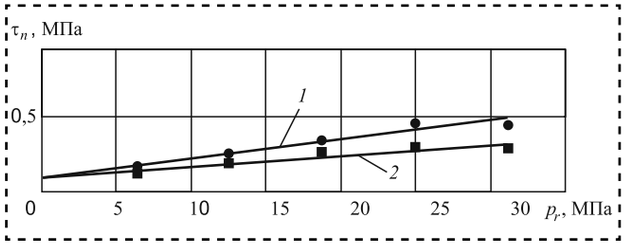


Рис. 1. Влияние контактного давления на тангенциальную прочность адгезионных связей фрикционного контакта индентора из алюминиевой керамики (*d* = 28 мм) и образцов из полиэтилена:
1 — сухое трение; *2* — смазка (биологическая среда)

$$\tau_n = \tau_0 + \beta p, \qquad (1)$$

где τ_0 — прочность на срез адгезионных связей при отсутствии давления на контакте.

Графоаналитическая обработка полученных экспериментальных результатов позволила определить численные значения коэффициента β для всех исследуемых пар трения эндопротезов с различными диаметрами головки (рис. 2). Наиболее высокий коэффициент β выявили в трибологических парах с полиэтиленовым вкладышем, наименьший β обеспечивает пара АКер—АКер.

В работе [4] проанализированы среднестатистические отдаленные результаты эндопротезирования тазобедренного сустава (с учетом различий в конструкциях эндопротезов) с указанием численных значений скорости $v_{изн}$ изнашивания различных пар трения эндопротезов, имплантированных в живой

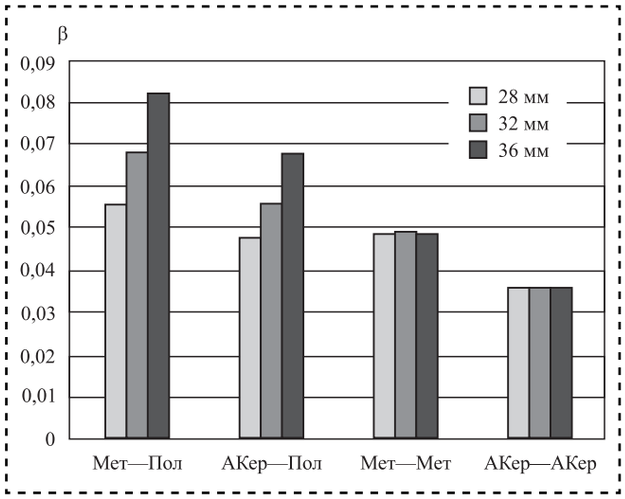


Рис. 2. Среднее значение коэффициента β упрочнения адгезионных связей для различных сочетаний материалов пары трения "головка—вкладыш"

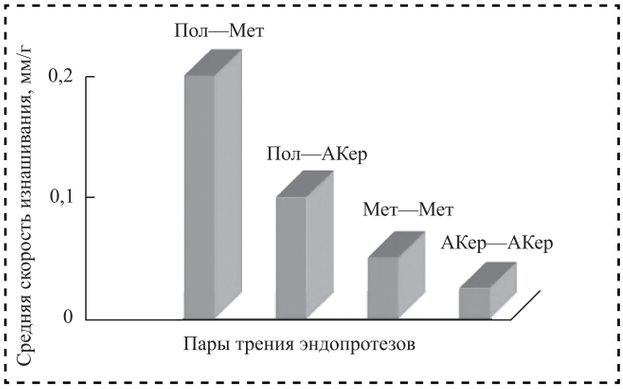


Рис. 3. Средняя скорость изнашивания *in vivo* эндопротеза тазобедренного сустава с различными парами трения

организм (рис. 3). Наиболее высокую скорость изнашивания показывают трибологические пары с полиэтиленовым вкладышем, наиболее низкую — керамика—керамика.

Совместный регрессионный анализ результатов, приведенных на рис. 3 и 4 и в табл. 1, позволил получить математическую модель

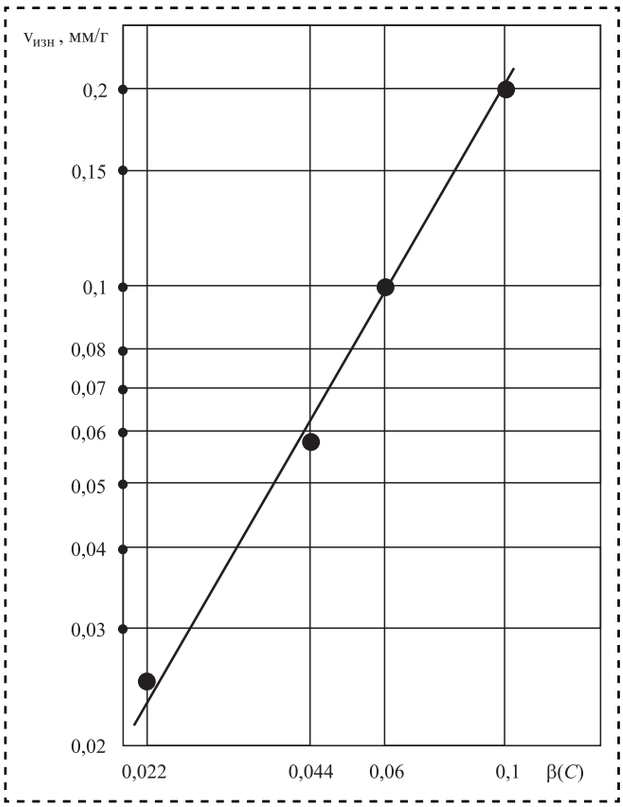


Рис. 4. Зависимость скорости изнашивания различных эндопротезов от адгезионного параметра β (индекса совместимости трущихся поверхностей)

sb918.indd 421 06.09.2018 8:22:47

Таблица 1

Среднестатистические результаты исследования изнашивания и адгезионного взаимодействия пары трения в эндопротезах

Материал пары трения "головка—вкладыш"	Скорость изнашивания, мм/г [4]	β
Мет—Пол	0,2	0,08
АКер—Пол	0,1	0,06
Мет—Мет	0,05	0,044
АКер—АКер	0,025	0,022

изнашивания эндопротезов в виде степенной функции, мм, г:

$$v_{изн} = 5\beta^{1,4}. \quad (2)$$

Проверка по критерию Фишера показала, что гипотеза об адекватности полученной математической модели (2) при 5%-ном уровне значимости не отвергается.

Это же подтверждается данными по изнашиванию различных эндопротезов, приведенными в работе [8]. В этой работе исследованы интактные ЭТБС и компоненты кинематических узлов искусственных суставов, удаленные в срок более 10 лет после имплантации.

Имплантанты представлены головками и вкладышами из различных материалов (по 3 образца каждый): головка и вкладыш с преимущественным содержанием кобальта, хрома и молибдена (Мет—Мет); головка и вкладыш из керамики с содержанием диоксида алюминия более 80 % и диоксида циркония около 17 % (АКер); вкладыш из поперечносвязанного полиэтилена (Пол). Износ головок и вкладышей оценивали по изменению их сферичности с помощью координатно-измерительной машины "Contura-G2". Скорость износа сопряжения $v_{изн}$ "головка—вкладыш" определялась как сумма скоростей износа головки и вкладыша (табл. 2).

Расчетный износ по формуле (2) получен по среднестатическим данным, а фактические значения износа сопряжения "головка — вкладыш" — для рассматриваемых конкретных условий. Эти результаты сопоставимы и численно близки (с отклонением не более 20 %).

Таблица 2

Сопоставление средних расчетных и фактических данных по износу сопряжения "головка—вкладыш" имплантированных эндопротезов

Пара трения	Расчетная скорость изнашивания по формуле (2), мм/г	Фактическая скорость изнашивания, мм/г
Мет—Пол	0,247	0,206
Мет—Мет	0,074	0,067
АКер—АКер	0,034	0,028

Выводы

1. Сопоставление рассчитанных по формуле (2) значений износа различных пар трения "головка — вкладыш" ЭТБС и фактических износов после 13 — 17 лет имплантирования показало их удовлетворительное совпадение.

2. Создание информационной базы данных по трибокоэффициенту β для различных сочетаний материалов пары трения "головка—вкладыш" позволит уже на стадии конструирования эндопротезов и выбора технологии артропластики прогнозировать эксплуатационную долговечность и надежность эндопротезов по износостойкости.

Библиографический список

1. **Николаенко В.И., Буряченко Б.П., Давыдов Д.В., Николаенко М.В.** Эндопротезирование тазобедренного сустава. М.: Медицина, 2009. 356 с.

2. **Тахимов Р.М., Шаповалов В.М., Аверкиев В.А.** Основы эндопротезирования тазобедренного сустава: учеб. пособие. СПб., 2008. 271 с.

3. **Загородский Н.В.** Эндопротезирование тазобедренного сустава. Основы и практика. М: ГЭОТАР-Медиа, 2012. 752 с.

4. **Friction** and dry sliding wear behavior of cermets / J. Pirso, M. Vijus, S. Letunovits // Wear. 2006. Vol. 260. P. 815—824.

5. **Шустер Л.Ш.** Адгезионное взаимодействие твердых металлических тел. Уфа: Гилем, 1999. 198 с.

6. **Камалетдинова Р.Р., Шустер Л.Ш.** Влияние свойств материала деталей трибосопряжений на их изнашивание. // Вестник машиностроения. 2016. № 7. С. 50—52.

7. **Крагельский И.В., Добычин М.Н., Комбалов В.С.** Основы расчетов на трение и износ. М.: Машиностроение, 1977. 526 с.

8. **Анализ** постимплантационных изменений компонентов эндопротезов тазобедренного сустава на основе 3D-лазерной микроскопии / Р.Р. Якупов и др. // Лазерная медицина. 2016. Т. 20. Вып. 2. С. 49—54.

sb918.indd 422 06.09.2018 8:22:47

УДК 658.512

В.А. Звягинцев, *канд. техн. наук,* **Р.И. Дергунов**
(Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева)
E-mail: antiteza13@gmail.com

Разработка методики ассоциативного проектирования каркасов приспособлений для узловой и агрегатной сборки элементов конструкции планера самолета с использованием Siemens NX Product Template Studio

Построена электронная модель шаблона каркаса сборочного приспособления с возможностью трансформации его геометрии в соответствии с геометрией собираемого объекта и возможностью замены типа и параметров стандартных профилей, формирующих каркас в автоматическом режиме.

An electronic model of the frame template of the assembly device is constructed with the possibility of transforming its geometry in accordance with the geometry of the assembled object and the possibility of replacing the type and parameters of the standard profiles that form the frame in an automatic mode.

Ключевые слова: сборка узловая и агрегатная, конструкция планера самолета, приспособления для сборки, автоматизация проектирования, оснастка, ассоциативное проектирование, студия разработки шаблонов.

Keywords: assembly of nodal and aggregate, airframe designs, jig, design automation, tackle, associative design, product template studio.

Проектирование сборочного приспособления (СП) на этапе подготовки производства — трудоемкий процесс, ограниченный сроком запуска изделия. Металлоемкость, трудозатраты при изготовлении и эксплуатации СП в значительной мере зависят от конструктивных решений, заложенных при проектировании несущих элементов сборочных приспособлений. Традиционная методика оригинального проектирования СП сводится к разработке эскизного проекта, разработке общего вида СП и деталировок. Такой подход характерен для проектирования с использованием чертежных инструментов и методов плазово-шаблонной увязки. Длительность проектирования СП с помощью традиционной методики составляет от нескольких месяцев до полугода и больше.

При проектировании с использованием графических редакторов, таких, например, как Siemens NX, структура разработки конструкции СП отличается тем, что источник информации об объекте сборки — электронная модель (ЭМ) собираемого изделия. Это существенно снижает погрешность переноса информации и повышает производительность проектирования. При этом процесс проектирования СП по-прежнему характеризуется неоправданно высокой трудоемкостью. Объясняется это необходимостью выполнения разработчиком большого числа рутинных операций при создании конструкции.

В последние годы появились публикации, отражающие работы в направлении автоматизации процессов проектирования конструкции СП, в том числе, при изменении конструкции объекта сборки или конструктивной схемы сборочного приспособления [1—4]. Характерная особенность предлагаемых методик — разработка приложений NXOpen API в системе Siemens NX для проектирования СП. В них для проектируемого СП формируется каркас в виде плоской рамы, являющейся типовым шаблоном любого приспособления. Процесс построения рамы "привязан" к касательным контура собираемого изделия, проведенным в точках максимального удаления от конструктивной оси [1]. В рассмотренных работах представлен каркас типовой конструкции

sb918.indd 423 06.09.2018 8:22:47

(рис. 1 на стр. 3 обложки), в виде плоской четырехугольной рамы. Ее линейные размеры могут в соответствии с габаритными размерами собираемого изделия изменяться, при этом каркас останется четырехугольной рамой. Эта форма каркаса и методика его построения приемлемы при проектировании СП, предназначенных для сборки плоских каркасных узлов планера самолета типа лонжеронов, балок, т.е. конструкций, геометрия которых аналогична геометрии принятого шаблона для приспособления.

Такой подход к проектированию не может считаться универсальным, поскольку он не дает возможности учесть многообразие геометрических особенностей собираемых изделий. Это в свою очередь ведет к созданию рамы с заведомо завышенной металлоемкостью и фиксаторов (ложементов, рубильников) с габаритными размерами, существенно бóльшими, чем необходимо для базирования и фиксации деталей, увеличивая, таким образом, металлоемкость и трудоемкость изготовления СП. При использовании шаблона в виде плоской рамы, в соответствии с предложенной методикой, невозможно создать СП балочной или пространственной конструкции.

Проведенный анализ показал, что исключить отмеченные негативные моменты можно, если заменить однозначную форму шаблона каркаса в виде плоской рамы на шаблон в виде стандартного профиля (швеллера, трубы прямоугольного или круглого сечения и подобных профилей). Длина элемента такого профиля и его положение на плоскостях 3D-модели определяются числом и положением характерных для собираемого объекта точек. Построенный в автоматическом режиме по этим точкам каркас может быть легко модифицирован простым перемещением характерных точек. Это дает возможность конструктору СП учесть целый комплекс требований, обеспечивающих заданную точность собираемого изделия, эффективность его изготовления и эксплуатации. Возможность быстрой замены типа сечения элемента каркаса и его параметров путем изменения значений, определяющих его размеры, позволяет автоматически перестроить каркас, обеспечив требуемую жесткость конструкции.

Такой подход для процесса проектирования каркасов СП, в отличие от рассмотренных методик, предлагает решение, основанное на следующих принципах:

— универсальный алгоритм действий при разработке каркаса СП, ассоциированного к объекту сборки для любой конструктивной схемы (рамной, балочной, пространственной);

— быструю замену сечения профиля (круглой, прямоугольной формы или швеллера (рис. 2 на стр. 3 обложки)), формирующего каркас, или параметров принятого сечения;

— творческое участие разработчика в создании каркаса при исключении рутинных работ.

В рамках этих принципов разработана конструкция каркаса СП и построена модель рамы приспособления (рис. 3 на стр. 3 обложки) для сборки шпангоута фюзеляжа [5] (рис. 3). Решение реализовано в системе Siemens NX с использованием модуля Product Template Studio — PTS (Студия Разработки Шаблонов). Оно основано на параметрическом взаимодействии компонентов шаблона, разработаных с помощью PTS. В нем сформировано соответствующее диалоговое окно, позволяющее проектировать и изменять геометрию каркаса СП (рис. 4 на стр. 4 обложки).

С помощью разработанного решения сначала был изменен профиль на трубу, а потом автоматически перестроен исходный каркас под сборку шпангоута другой геометрии (см. рис. 3, *а*) и заменен профиль сечения каркаса (рис. 5 на стр. 4 обложки).

Применение данной методики с использованием автоматизации проектирования каркасов СП позволяет:

сократить сроки подготовки сборочного производства;

снизить металлоемкость создаваемой технологической оснастки.

Методика может стать универсальным решением при построении конструкций для узловой и агрегатной сборки.

Библиографический список

1. **Лаврентьева М.В., Чимитов П.Е.** Выборка параметров электронной модели изделия для автоматизированного проектирования технологической оснастки // Современные технологии. Системный анализ. Моделирование. 2016. № 3 (51).

2. **Лаврентьева М.В., Чьен Х.В.** Автоматизированное проектирование электронных макетов элементов сборочной оснастки посредствам программного модуля Nx/Open api // V Всероссийская конференция "Современные наукоемкие инновационные технологии". 2013.

3. **Чимитов П.Е., Лаврентьева М.В.** Интегрированная система создания электронной модели авиационной сборочной оснастки // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 (5), 2014.

4. **Чимитов П.Е.** Разработка модулей расширения функционала САПР Siemens Nx с использованием NXOpen API [Электронный ресурс]. URL: https://www.youtube.com/watch?v=FxA7E03pczc.

5. **Современные** технологии в авиа- и ракетостроении: учебник для вузов / В.А. Барвинок и др.; под ред. чл.-кор. РАН В.А. Барвинка. М.: Машиностроение, 2014. 320 с.

sb918.indd 424 06.09.2018 8:22:48

УДК 621.831+519.8

Н.В. Водолазская, *канд. техн. наук*
(Белгородский государственный аграрный университет)
E-mail: vnv26@bk.ru

Расчет параметров определенных технических систем на основе моделирования их сборочных процессов

Проанализированы особенности сборки технических систем на примере групповых резьбовых соединений. Представлена расчетная схема такого соединения с учетом податливости деталей стыка. Предложена алгоритмическая модель расчета коэффициентов перегрузки для достижения нормируемых сил за один обход.

Features of assembly of technical systems on the example of group threaded connections are analysed. The settlement scheme of such connection taking into account pliability of details of a joint is submitted. The algorithmic model of calculation of overload coefficients for achievement of the normalized efforts for one round is offered.

Ключевые слова: техническая система, групповое резьбовое соединение, моделирование, число обходов, относительная податливость деталей стыка, коэффициент перегрузки.

Keywords: technical system, group threaded connection, modeling, number of rounds, relative pliability of details of a joint, overload coefficient.

Эксплуатационная надежность выпускаемого машиностроительными предприятиями оборудования в значительной степени зависит от уровня подготовки сборочного производства. При сборке технической системы, в состав которой входят ответственные разъемные соединения, к числу которых относятся резьбовые соединения, возникает проблема создания равномерного напряжения в собираемых деталях. Особое значение она приобретает для групповых резьбовых соединений, где сложность обеспечения равномерного нагружения крепежных деталей связана с уменьшением осевых сил в ранее затянутых болтах при поочередной затяжке следующих болтов. И если для резьбовых соединений с небольшим диаметром резьбы эту проблему решают автоматизированной или автоматической сборкой, применяя соответствующее оборудование, например, многошпиндельные гайковерты или роторные сборочные машины [1, 2], то для крупных групповых резьбовых соединений, особенно в условиях единичного производства и последующего ремонтного обслуживания в процессе эксплуатации, эта проблема по-прежнему актуальна и требует решения. Согласно исследованиям И.А. Биргера и Г.Б. Иоселевича проведение сборочной операции при последовательной затяжке одиночных крепежных деталей может вызвать перекосы фланца и привести к неравномерному нагружению деталей стыка, а также дополнительной деформации болтов изгибающим моментом:

$$M = \frac{Q\alpha}{\lambda \operatorname{sh}(\lambda l)}, \qquad (1)$$

где Q — осевая сила;

α — угол перекоса фланца;

l — рабочая длина болта;

λ — коэффициент осевой податливости стягиваемых деталей стыка.

Отмеченное отрицательное явление устраняют сборкой, когда одновременно затягивают две симметрично расположенные на стыке крепежные детали [3]. Однако при этом появляется очередная проблема, связанная с выбором рационального числа обходов и определением необходимых сил затяжки в крепежных деталях.

Эту проблему решают последовательной затяжкой, когда требуемые силы в кре-

sb918.indd 425 06.09.2018 8:22:48

пежных деталях достигаются за несколько обходов или затяжкой каждой из крепежных пар за один обход с таким расчетом, чтобы в конце обхода все крепежные детали оказались затянутыми до одинаковой требуемой силы.

Цель работы — разработка алгоритма сборки технической системы на примере групповых резьбовых соединений с учетом их конструктивных особенностей и за счет выявления возможности затяжки с наименьшим числом обходов.

Рассмотрим расчетную схему группового резьбового соединения (рис. 1), где крепежные детали представлены упругими элементами с осевой податливостью λ_0, а размещенные под ними промежуточные детали стыка — λ_1. Эти упругие элементы разделены жесткой (недеформированной) диафрагмой, имеющей форму фланца. Четное число крепежных деталей и их симметричное расположение на фланце обеспечивают возможность проведения их парной затяжки [3, 4]. При сборке первой пары болтов суммарная осевая сила $P = 2Q_i$. Деформация болтов — δ_1, а промежуточных деталей стыка — δ_0. При этом болты второй пары остаются недеформированными. Последующая затяжка второй пары такой же силой P приведет к дополнительной деформации деталей стыка, величина которой зависит от увеличения осевой силы в затягиваемой паре крепежных деталей и от податливости элементов соединения.

На базе данной расчетной схемы рассмотрен вариант затяжки каждой из крепежных пар до различных сил за один обход.

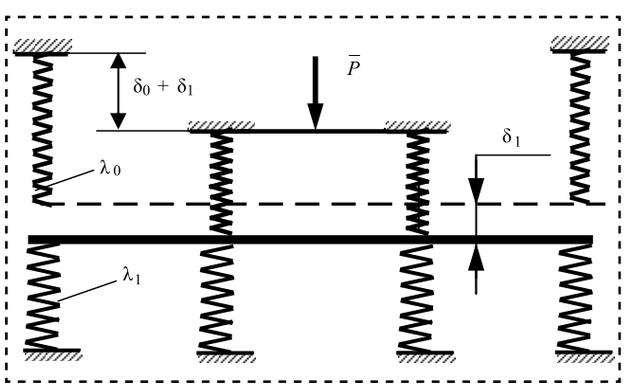


Рис. 1. Расчетная схема начальной стадии сборки группового резьбового соединения

Каждая k-я пара группового резьбового соединения нагружается до силы:

$$P_k = \xi_k P, \tag{2}$$

где P — требуемая сила затяжки;

ξ_k — коэффициент перегрузки k-й пары при затяжке.

Рассчитывая коэффициенты перегрузки принимают во внимание то, что степень снижения сил в ранее затянутых болтах зависит не только от их количества, но и от изменения сил i-й пары от нулевого значения до силы, определяемой по зависимости (2).

Для определения требуемых значений коэффициентов перегрузки проведен анализ изменения осевых сил в деталях группового резьбового соединения при этом режиме затяжки [5]. В результате первой затяжки нагружение первой пары болтов силой $P_1^{(1)} = \xi_1 P$ нагрузка в ранее затянутых деталях не уменьшится и детали стыка окажутся сжатыми на величину:

$$\delta_1 = \xi_1 P \lambda_1. \tag{3}$$

Вторую пару болтов затягивают силой

$$P^{(2)} = \xi_2 P. \tag{4}$$

При этом стягиваемые детали получат дополнительную деформацию сжатия Δl_2, и сила в них станет равной:

$$Q_2 = \xi_2 P + \frac{\Delta l_2}{\lambda_1}. \tag{5}$$

Эта дополнительная деформация приведет к разгрузке ранее затянутой пары болтов на величину:

$$\Delta P^{(2)} = \frac{\Delta l_2}{\lambda_0}. \tag{6}$$

Суммарная осевая сила в болтах этой пары:

$$P_1^{(2)} = \xi_1 P - \Delta P^{(2)} = \xi_1 P - \frac{\Delta l_2}{\lambda_0}. \tag{7}$$

Общая сила в болтах после второй затяжки составит:

$$Q_2 = \xi_2 P + \left(\xi_1 P - \frac{\Delta l_2}{\lambda_0}\right). \tag{8}$$

sb918.indd 426 06.09.2018 8:22:48

Приравнивая выражения (5) и (8), определим искомую дополнительную деформацию:

$$\Delta l_2 = \xi_2 P \frac{\lambda_0 \lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1}. \quad (9)$$

С учетом зависимости (9) снижение осевой силы в болтах первой пары после второй затяжки:

$$\Delta P^{(2)} = \xi_2 P \frac{\lambda_1}{\lambda_0 + \lambda_1} = \xi_2 P \frac{\eta}{1+\eta}, \quad (10)$$

где η — относительная податливость соединения, $\eta = \lambda_1/\lambda_0$.

Тогда болты первой пары окажутся затянутыми силой:

$$P_1^{(2)} = \xi_1 P - \xi_2 P \frac{\eta}{1+\eta} = P\left(\xi_1 - \xi_2 \frac{\eta}{1+\eta}\right). \quad (11)$$

При этом общая осевая сила в крепежных деталях после второй затяжки:

$$Q_2 = \xi_1 P - \xi_2 P \frac{1}{1+\eta} + \xi_2 P = P\left(\xi_1 - \xi_2 \frac{1}{1+\eta}\right). \quad (12)$$

В результате затяжки третьей пары болтов до силы $\xi_3 P$ уменьшатся силы в парах болтов первой и второй затяжек на величину:

$$\Delta P^{(3)} = \frac{\Delta l_3}{\lambda_0}. \quad (13)$$

Тогда сила в первой и второй парах после третьей затяжки:

$$P_1^{(3)} = \xi_1 P - \xi_2 P \frac{\eta}{1+\eta} - \xi_3 P \frac{\eta}{1+2\eta} = P\left(\xi_1 - \xi_2 \frac{\eta}{1+\eta} - \xi_3 \frac{\eta}{1+2\eta}\right); \quad (14)$$

$$P_2^{(3)} = \xi_2 P - \xi_3 P \frac{\eta}{1+2\eta} = P\left(\xi_2 \frac{\eta}{1+\eta} - \xi_3 \frac{\eta}{1+2\eta}\right). \quad (15)$$

Следовательно, после i-й затяжки соединения силой $P^{(i)} = \xi_i P$ сила каждой из всех ранее затянутых $(i-1)$ пар снизится на величину затяжки последней N-й пары:

$$\Delta P^{(i)} = \xi_i P \frac{\eta}{1+(i-1)\eta} = \xi_i P \psi, \quad (16)$$

где ψ — коэффициент разгрузки ранее затянутых пар при i-й затяжке, $\psi_i = \dfrac{\eta}{1+(i-1)\eta}$.

Установлено, что после окончания обхода (затяжки последней N-й пары) суммарные осевые силы в парах крепежных деталей распределятся следующим образом:

$$\begin{aligned}
P_1^{(N)} &= P\left(\xi_1 - \xi_2\psi_1 - \xi_3\psi_2 - \ldots - \xi_N\psi_{(N-1)}\right);\\
P_2^{(N)} &= P\left(\xi_2 - \xi_3\psi_2 - \xi_4\psi_3 - \ldots - \xi_N\psi_{(N-1)}\right);\\
P_3^{(N)} &= P\left(\xi_4\psi_3 - \xi_5\psi_4 - \ldots - \xi_N\psi_{(N-1)}\right);\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
P_{(N-1)}^{(N)} &= P\left(\xi_{(N-1)}\psi_{(N-2)} - \ldots - \xi_N\psi_{(N-1)}\right);\\
P_N^{(N)} &= P\xi_N.
\end{aligned} \quad (17)$$

Учитывая, что после окончания затяжки суммарная сила в каждой паре крепежных деталей должна равняться нормированной силе P, получим систему N уравнений, устанавливающих зависимость между коэффициентами перегрузки, обеспечивающими затяжку соединения за один обход до требуемого уровня:

$$\begin{aligned}
\xi_1 &= 1 + \xi_2\psi_1 + \xi_3\psi_2 + \ldots + \xi_N\psi_{(N-1)};\\
\xi_2 &= 1 + \xi_3\psi_2 + \xi_4\psi_3 + \ldots + \xi_N\psi_{(N-1)};\\
\xi_3 &= 1 + \xi_4\psi_3 + \xi_5\psi_4 + \ldots + \xi_N\psi_{(N-1)};\\
&\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\\
\xi_{(N-2)} &= 1 + \xi_{(N-1)}\psi_{(N-2)} + \xi_N\psi_{(N-1)};\\
\xi_{(N-1)} &= \xi_N\psi_{(N-1)};\\
\xi_N &= 1.
\end{aligned} \quad (18)$$

Из приведенных уравнений следует следующая закономерность изменения коэффициентов перегрузки последовательно затягиваемых пар:

$$\xi_k = \xi_{(k+1)}\left(1 + \psi_k\right). \quad (19)$$

Зависимость (19) позволяет установить простейший алгоритм для расчетов коэффициентов перегрузки с применением ЭВМ для соединений с разным количеством затягиваемых пар и при различных значениях относительной податливости деталей стыка (табл. 1).

На рис. 2 приведен график, характеризующий степень перегрузки крепежных деталей группового резьбового соединения, состоящего из четырех пар, при их затяжке за один обход.

Приведенные аналитические соотношения, полученные в результате исследования алгоритмической модели, сравнивали с ранее полученными результатами затяжки группового резьбового соединения, уплотняющего крышку химического сосуда высокого давления (рис. 3).

sb918.indd 427 06.09.2018 8:22:48

Таблица 1

Коэффициенты перегрузки крепежных деталей при их затяжке за один обход

Номер пары	Коэффициенты перегрузки ξ_i								
	$N = 4$			$N = 6$			$N = 8$		
	$\eta = 0{,}1$	$\eta = 0{,}2$	$\eta = 0{,}3$	$\eta = 0{,}1$	$\eta = 0{,}2$	$\eta = 0{,}3$	$\eta = 0{,}1$	$\eta = 0{,}2$	$\eta = 0{,}3$
1	1,273	1,67	2	1,4544	1,833	2,154	1,636	2,122	2,504
2	1,167	1,231	1,375	1,333	1,57	1,7503	1,4999	1,857	2,034
3	1,077	1,106	1,1579	1,2307	1,374	1,474	1,3845	1,625	1,788
4	1	1	1	1,1428	1,22	1,273	1,285	1,444	1,5445
5	—	—	—	1,0667	1,106	1,12	1,2	1,2999	1,359
6	—	—	—	1	1	1	1,125	1,1818	1,2135
7	—	—	—	—	—	—	1,0558	1,0833	1,09677
8	—	—	—	—	—	—	1	1	1

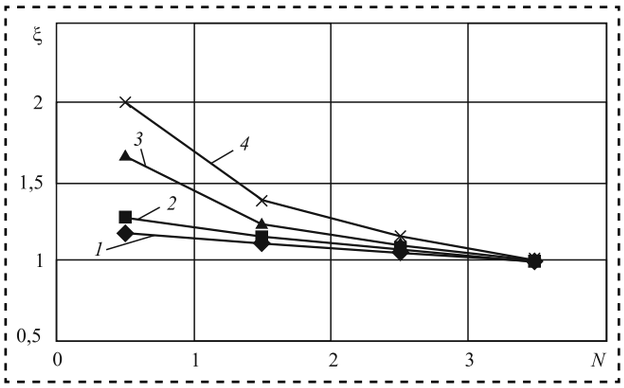


Рис. 2. Степень перегрузки группового резьбового соединения, состоящего из четырех пар крепежных деталей, необходимая для их затяжки за один обход, при относительной податливости:
1 — η = 0,06; *2* — η = 0,1; *3* — η = 0,2; *4* — η = 0,3

Крепление крышки в этом узле осуществляется восемью шпильками (n = 8, т.е. $N = 4$) с резьбой М76, диаметр стержня которых d_0 = 70 мм, рабочая длина l_0 = 190 мм. Крышка сосуда высотой h_1 = 190 мм уплотняется стальной кольцевой прокладкой толщиной l_1 = 12 мм с диаметрами D_1 = 340 мм и d_1 = 320 мм. С учетом этих параметров, используя известную зависимость [Биргер И.А., Иосилевич Г.Б. Резьбовые и фланцевые соединения. М.: Машиностроение, 1990. 368 с.] определяли податливость двух одновременно затягиваемых шпилек и податливость деталей стыка:

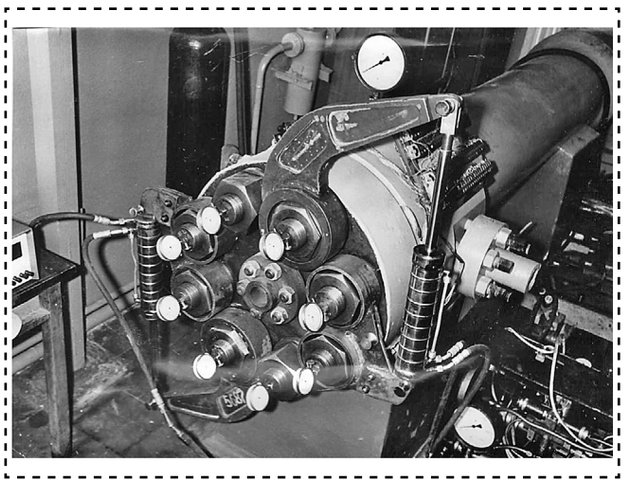


Рис. 3. Процесс затяжки группового резьбового соединения, состоящего из четырех пар крепежных деталей

$$\lambda_0 = \frac{l_0}{E_0 F_0} = \frac{4 l_0}{E_0 \pi d_0^2}; \qquad (20)$$

$$\lambda_1 = \lambda_1' + \lambda'', \qquad (21)$$

где E_0 — модуль упругости материала шпильки,

λ_1' — податливость двух кольцевых участков крышки под затягиваемыми гайками, наружный диаметр которых 135 мм;

λ'' — податливость прокладки.

Для расчета податливости двух кольцевых участков крышки под затягиваемыми гайками с учетом замены конуса давления цилиндром применяли зависимость:

$$\lambda' = \frac{4 h_1}{E \pi \left[(a + h_1)^2 - d_0^2 \right]}. \qquad (22)$$

Податливость кольцевой прокладки рассчитывали по формуле:

$$\lambda'' = \frac{8 l_1}{E \pi \left(D_1^2 - d_1^2 \right)}. \qquad (23)$$

С учетом приведенных параметров относительная податливость соединения составила 0,06 (см. рис. 2).

Двухпозиционным гидравлическим гайковертом проводили парную затяжку восьми шпилек до нормированной силы, соответствующей удлинению 0,15 мм. Удлинение шпильки при затяжке измеряли установленным на ее торце индикатором часового типа, ножка которого контактировала с размещенным в осевом

sb918.indd 428 06.09.2018 8:22:49

Таблица 2

Результаты затяжки после первого обхода без учета коэффициентов перегрузки

Номер пары	Удлинение шпилек с номерами, мм							
	1	2	3	4	5	6	7	8
1—5	0,15	0	0	0	0,15	0	0	0
3—7	0,145	0	0,15	0	0,14	0	0,15	0
2—6	0,13	0,15	0,147	0	0,125	0,15	0,138	0
4—8	0,12	0,145	0,131	0,15	0,111	0,145	0,125	0,15

отверстии шпильки стержнем. При затяжке соединения до требуемой силы без учета коэффициентов перегрузки необходимо осуществить три обхода. В этом случае после одного обхода разгрузка в первой паре может достигнуть 30 % (табл. 2). С учетом теоретических рекомендаций при невысокой относительной податливости затяжка группового резьбового соединения с малым количеством пар (в данном примере $N = 4$) возможна за один обход (см. рис. 2).

Библиографический список

1. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Воркуев Д.С.** Многошпиндельный гайковерт повышенной точности на основе дифференциальных механизмов, механизмов свободного хода, муфт предельного момента с переключением вращений соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2013. № 4. С. 8—11.
2. **Водолазская Н.В., Михайлов А.Н.** К вопросу оценки компоновок роторных сборочных машин для резьбовых соединений // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2004. № 4. С. 34—37.
3. **Водолазская Н.В.** Силовой анализ процесса сборки резьбовых соединений при симметричной затяжке крепежных деталей // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 11. С. 486—490.
4. **Vodolazskaya N.V., Iskritskiy V.M.** Mathematical analysis of assembly technology of responsible types of connections // Research and Development in Mechanical Industry. 2017. Vol. 1. 2017. P. 205—211.
5. **Водолазская Н.В.** Теоретическая оценка вариантов сборки ответственных видов соединений // Journal of Advanced Research in Technical Science. North Charleston. USA, 2017. Is. 6. P. 17—20.

УДК 621.499

Н.В. Петров, *канд. техн. наук,* **В.П. Друзьянова,** *д-р техн. наук,* **С.И. Григорьев, К.В. Старостин**
(Северо-Восточный федеральный университет имени М.К. Аммосова, г. Якутск)
E-mail: wangod7596@gmail.com

Верификация математической модели двигателя внутреннего сгорания, работающего на биогазовом топливе

Выполнено исследование двигателя внутреннего сгорания МеМЗ-307 при использовании биогазового топлива для получения экспериментальных индикаторных диаграмм, определения индикаторных и эффективных показателей двигателя. Выявлены закономерности изменения регулировочных параметров. Проведена верификация математической модели процесса сгорания в биогазовом двигателе внутреннего сгорания, позволяющая расчетным путем определить показатели мощности, экономичности и токсичности этого двигателя. Уравнения для переменного показателя сгорания и продолжительности сгорания экспериментально проверены в диапазоне изменения показателей малолитражного биогазового двигателя. Погрешности расчетного определения показателей мощности, экономичности и токсичности с помощью полученной математической модели находятся в допустимых пределах для двигателя внутреннего сгорания.

An experimental study of the MeMZ-307 internal combustion engine on the use of biogas fuel for obtaining experimental indicator diagrams, determination of indicator and effective parameters of the engine is considered. Based on the analysis of the obtained data, the regularities of changing the adjusting parameters were revealed. Verification of the mathematical model of the combustion process in a biogas internal combustion engine has been performed, which makes it possible to calculate the power, economy and toxicity parameters of this engine by calculation, and also the equations for the variable combustion index and the duration of combustion have been experimentally tested in the range of changes in the indices biogas engine. Errors in the calculation of power, efficiency and toxicity with the help of the mathematical model obtained are within the limits allowed for the internal combustion engine.

Ключевые слова: биогазовое топливо, ДВС, математическая модель, исследование, результат расчета.
Keywords: biogas fuel, internal combustion engine, mathematical model, research, calculation result.

sb918.indd 429 06.09.2018 8:22:49

Исследование предусматривает использование экспериментального стенда с биогазовым двигателем внутреннего сгорания МеМЗ-307 (ДВС) (рис. 1). Стенд предназначен для получения экспериментальных индикаторных диаграмм, определения индикаторных и эффективных показателей ДВС на режиме, а также показателей токсичности.

На основании анализа полученных данных выявляют закономерности изменения регулировочных параметров режима в зависимости от объемной доли отработавших газов r_{CO_2}. Для практической реализации изменения регулировочных параметров необходима разработка корректора регулировочных параметров ДВС.

Верификацию математической модели осуществляли сравнением показателей мощности, экономичности и токсичности, полученных с помощью расчетной модели, с данными показателями, полученными экспериментально.

Уравнения для переменного показателя сгорания и продолжительности сгорания экспериментально проверены в диапазоне изменения показателей малолитражного биогазового двигателя: α = 1...1,5; θ = 5...70° п.к.в. до ВМТ; n = 800...5600 мин$^{-1}$; η_v = 0,86...0,21. Режимы выбирали случайным образом. Сравнивали индикаторные диаграммы, полученные экспериментально, с их расчетными аналогами (рис. 2).

Для обработки индикаторных диаграмм использовали методику, разработанную на

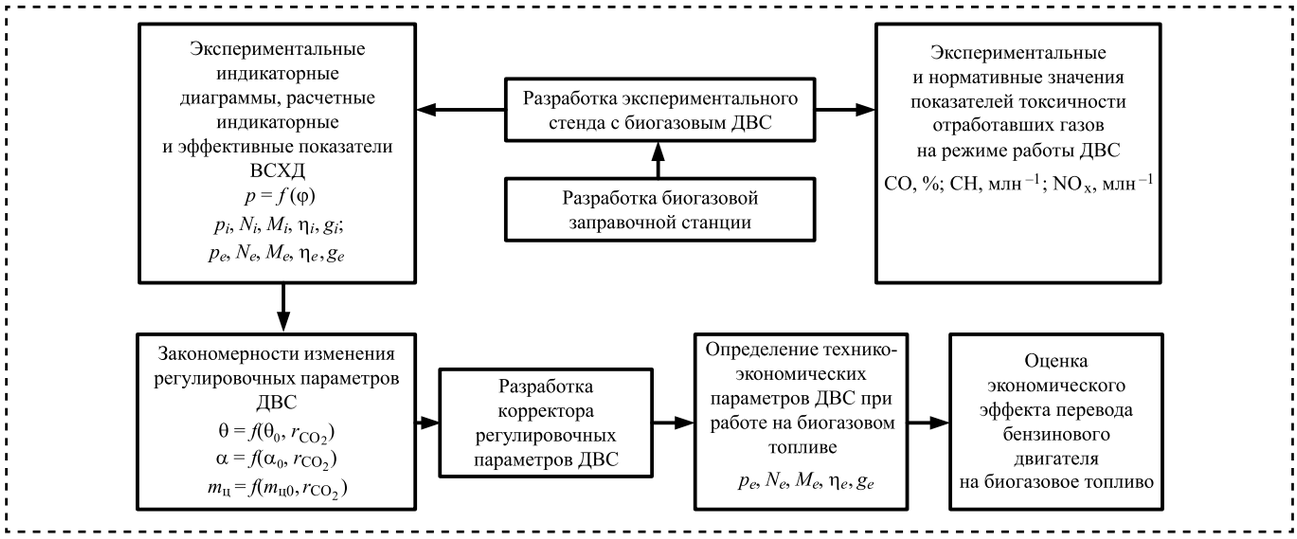


Рис. 1. Структурная схема экспериментального исследования

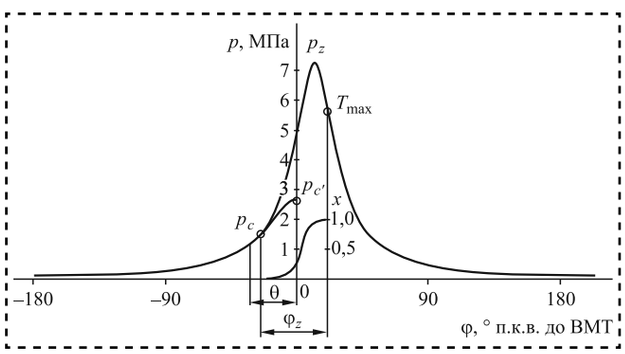


Рис. 2. Экспериментальная индикаторная диаграмма и соответствующая ей характеристика тепловыделения:
n = 4500 мин$^{-1}$; η_v = 0,79; α = 1,05; ε = 12; θ = 32°п.к.в. до ВМТ; N_e = 38 кВт

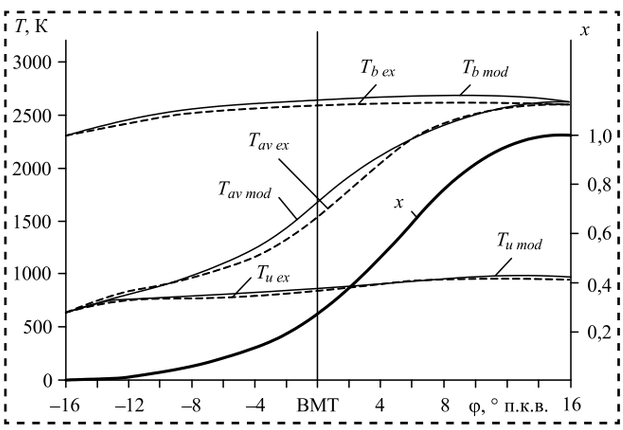


Рис. 3. Математическое моделирование температур в цилиндре двигателя по двухзонной модели в сравнении с экспериментом:
$T_{u\ ex}$, $T_{u\ mod}$ — температура несгоревшей смеси; $T_{b\ ex}$, $T_{b\ mod}$ — температура сгоревшей смеси; $T_{av\ ex}$, $T_{av\ mod}$ — средняя температура смеси в цилиндре; *ex* — эксперимент; *mod* — расчет

sb918.indd 430 06.09.2018 8:22:49

кафедре ДВС ХНАДУ (Украина) [1], которая позволяет определять не только среднюю термодинамическую температуру в цилиндре двигателя, но и распределение температур по сгоревшей и несгоревшей зонам [2].

На рис. 3 приведено сравнение температур в цилиндре двигателя в процессе сгорания для экспериментального и расчетного режимов (параметры режима: n = 4500 мин$^{-1}$; η_v = 0,79; α = 1,05; ε = 12; θ = 32° п.к.в. до верхней мертвой точки (ВМТ); N_e = 38 кВт).

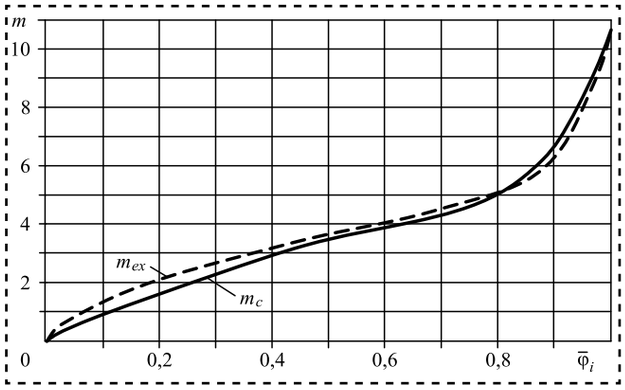


Рис. 4. Изменение переменного показателя сгорания И.И. Вибе в процессе сгорания:
m_{ex} — эксперимент (n = 4500 мин$^{-1}$; η_v = 0,79; α = 1,05; ε = 12; θ = 32° п.к.в. до ВМТ, N_e = 39 кВт); m_c — расчет

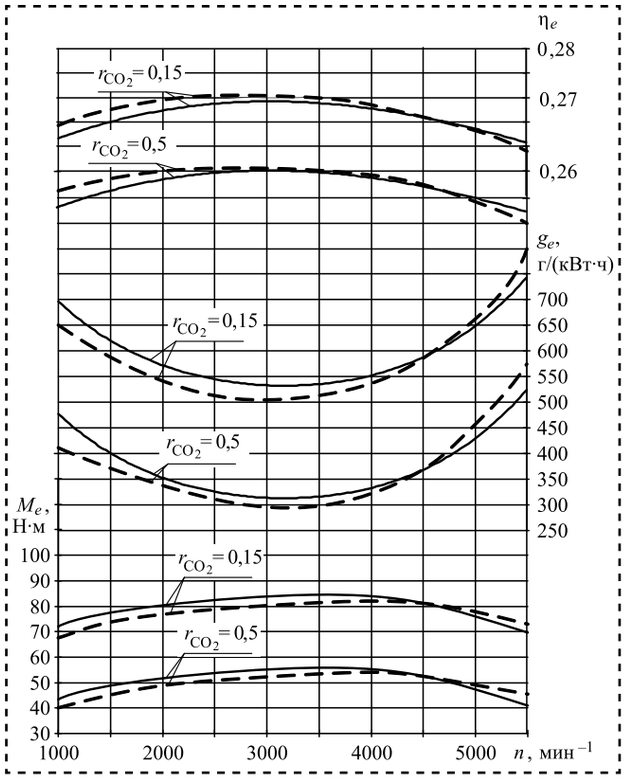


Рис. 5. Сравнение расчетных показателей мощности и экономичности режимов ВСХД с экспериментальными данными:
— — эксперимент; — — — расчет

Сравнение расчетной и экспериментальной характеристик переменного показателя характера сгорания m_{var} представлено на рис. 4 (параметры режима: n = 4500 мин$^{-1}$; η_v = 0,79; α = 1,05; ε = 12; θ = 32° п.к.в. до ВМТ; N_e = 39 кВт).

Экспериментальная проверка уравнений для переменного показателя сгорания и продолжительности сгорания биогазового ДВС показала максимальную погрешность расчетного определения среднего индикаторного давления Δp_i = 4,2 %. В то время как использование табличных значений постоянного значения показателя характера сгорания m дает максимальную ошибку определения Δp_i = 14,6 %.

Сравнение экспериментальных показателей мощности и экономичности режимов внешней скоростной характеристики двигателя (ВСХД) с расчетными данными показано на рис. 5. Максимальная погрешность расчетного определения мощности M_e составляет до 10 %, погрешность определения η_e и g_e — до 12 %. Средняя погрешность расчетного определения M_e составляет до 7 %, η_e и g_e — до 9 %.

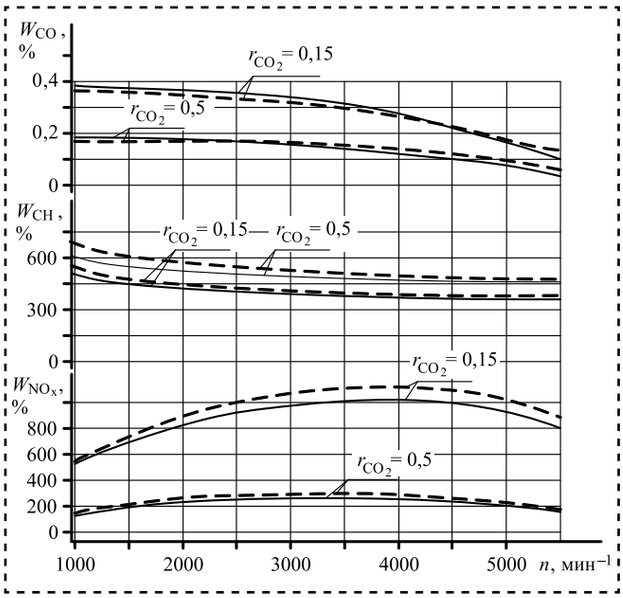


Рис. 6. Сравнение расчетных показателей токсичности отработавших газов на режимах ВСХД с экспериментальными данными:
— — эксперимент; — — — расчет

sb918.indd 431 06.09.2018 8:22:50

На рис. 6 сравниваются расчетные значения содержания CO и NO_x в отработавших газах с результатами экспериментального анализа химического состава отработавших газов для режимов ВСХД.

Согласно ГОСТ Р 17.2.2.06—99 контроль токсичности отработавших газов двигателей, работающих на газовом топливе, осуществляется на холостом ходу на режимах минимальных оборотов холостого хода (n_{min} = = 800 мин$^{-1}$) и поверочных оборотов холостого хода ($n_{пов}$ = 3000 мин$^{-1}$). В таблице приведены результаты расчетов и измерений содержания CO и CH в отработавших газах биогазового двигателя (r_{CO_2} = 0,5) в сравнении с нормами ГОСТ Р 17.2.2.06—99. Из рис. 5 и таблицы видно, что максимальная погрешность расчетного определения W_{CO} составляет до 15 %, W_{NO_x} — до 14 %, W_{CH} — до 12 %. Средняя погрешность расчетного определения W_{CO} составляет до 11 %, W_{NO_x} — до 11 %, W_{CH} — до 8,5 %.

Сравнительные результаты расчетных и экспериментальных исследований биогазового двигателя на режимах холостого хода

Режим		Норма	Расчет	Эксперимент	Погрешность, %
n_{min}	CO, %	3,0	0,32	0,3	6,3
	CH, млн$^{-1}$	800	720	660	8,3
$n_{пов}$	CO, %	2,0	0,19	0,2	5,3
	CH, млн$^{-1}$	500	430	480	10,4

Таким образом, погрешности расчетного определения показателей мощности, экономичности и токсичности с помощью полученной математической модели находятся в пределах допустимой для ДВС нормы.

Библиографический список

1. **Автоматизированный** стенд для исследования и доводки газового малолитражного быстроходного двигателя внутреннего сгорания / А.Н. Туренко и др. // Автомобильный транспорт. 2009. № 23. С. 89—94.

2. **Андрюхіна О.С.** Розробка спрощеного випробувального циклу для перевірки технічного стану бензинових двигунів легкових автомобілів в умовах експлуатації: дис. ... канд. техн. наук. Київ, 2006. 171 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 10.07.2018. Подписано в печать 03.09.2018. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

sb918.indd 432 06.09.2018 8:22:50