ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

2017 Том 18 / **8 (205)**

СОДЕРЖАНИЕ

Экономика и организация сборочного производства

Дубовик Е.А. Обобщенный критерий оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки селектора всеволнового СКВ-301 339

Технологичность конструкции

Топоров А.В., Пучков П.В., Полетаев В.А., Кропотова Н.А., Киселев В.В. Применение сжатого газа для привода гидравлического инструмента 345

Сборка с использованием клеев

Игнатов А.В., Винокурова М.Э. Оригинальная технология сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений 348

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Микаева С.А., Микаева А.С., Горбунов А.А. Повышение качества и экологичности при сборке люминесцентных ламп 352

Трение и смазка в машинах и механизмах

Берент В.Я., Берент В.В. Целесообразность использования металлокерамических тормозных колодок 355

Болотов А.Н., Бурдо Г.Б., Новиков В.В., Новикова О.О. Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел . . . 361

Гурьянов Г.Н. Оценка качества технологической смазки для волочения круглого сплошного профиля 366

Ивасышин Г.С. Приложения квантовой механики. Аттосекундные процессы в микро-, нано-, пико- и фемтотрибологии 376

В помощь конструктору, технологу

Чеботарев Е.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В. Повышение надежности тяговой зубчатой передачи грузовых электровозов 379

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

Тел.: 8 (499) 269-54-98

E-mail: sborka@mashin.ru

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

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, *академик РАН*

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

БЕЛГОРОД
Н.А. ПЕЛИПЕНКО, д.т.н.

БРЯНСК
О.А. ГОРЛЕНКО, д.т.н., проф.

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

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

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

КАЗАНЬ
Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ
Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

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

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД
С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОМСК
В.Н. КОСТЮКОВ, д.т.н.

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

ХАБАРОВСК
В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

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

ГОМЕЛЬ
В.Е. СТАРЖИНСКИЙ, д.т.н.

Украина

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

ДОНЕЦК
А.Н. МИХАЙЛОВ, д.т.н., проф.

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

Ответственные за подготовку и выпуск номера:

Е.М. НУЖДИНА, И.М. ГЛИКМАН

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

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

THE MONTHLY JOURNAL FOR SCIENTISTS AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

THE JOURNAL IS AMONG THOSE APPROVED BY RF FOR DISSERTATION PUBLICATION

2017 Vol. 18 **8 (205)**

CONTENTS

Economy and the organization of assembly

Dubovik E.A. The generalized criterion of estimation of cost the completing of electronic components for assembly of the selector-wave SKV-301 339

Manufacturability of a construction

Toporov A.V., Puchkov P.V., Poletaev V.A., Kropotova N.A., Kiselev V.V. The hydraulic tool driving by using of the compressed gas 345

Assembly with use glue

Ignatov A.V., Vinokurova M.E. Original technology of assembling adjustable cylindrical adhesive joints 348

Quality assurance. Testing. Monitoring

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Gorbunov A.A. Improve quality and environmental performance in the assembly for fluorescent lamps 352

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Berent V.Ya., Berent V.V. The feasibility of using sintered brake pads 355

Bolotov A.N., Burdo G.B., Novikov V.V., Novikova O.O. Technological methods increasing the lubricant action of nanodispersed magnetic oils 361

Guryanov G.N. Assessment of quality of technological lubricant for drawing of a round continuous profile 366

Ivasyshin G.S. Applications of quantum mechanics. Attosekundny processes in mikro-, nano-, piko- and femtotribologiya 376

Industrial and design engineer's aid

Chebotarev E.A., Gubarev P.V., Glazunov D.V. Increasing the reliability of traction gears electric freight locomotives 379

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

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

BELGOROD
N.A. PELIPENKO

BRIANSK
O.A. GORLENKO

VLADIVOSTOK
Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

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

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

KAZAN
R.I. ADGAMOV

KOVROV
Yu.Z. ZHITNIKOV

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

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

NIZHNY NOVGOROD
S.V. GOLUBEV

OMSK
V.N. KOSTYUKOV

OREL
Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

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

PERM
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON
V.I. KOLESNIKOV
A.A. RYZHKIN

RYBINSK
V.F. BEZIAZYCHNYI
V.V. NEPOMILUEV
A.N. SEMENOV

SAMARA
Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG
E.V. SHALOBAEV

SEVASTOPOL
E.L. PERVUKHINA

TOMSK
A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA
A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK
V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK
V.L. BASINJUK
M.L KHEIFETZ

GOMEL
V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV
A.S. ZENKIN
V.A. MATVIENKO

DONETSK
A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

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

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

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

УДК 621.37.01; 05.12.04

Е.А. Дубовик
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: dubovik1982@list.ru

Обобщенный критерий оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки селектора всеволнового СКВ-301

Предложено использовать интегральный показатель достаточности для оценки стоимости комплектующих радиодеталей при сборке селектора всеволнового СКВ-301. Применение рассмотренного подхода позволяет сформулировать в задаче оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки селектора всеволнового СКВ-301 условие достаточности в форме обобщенного критерия, определяемого введением мультипликативного метризованного оператора свертки на множестве частных критериев.

It is proposed to use an integral index of adequacy for estimating the cost of the completing of electronic components for the assembly of selector SKV-301. Application of the considered approach allows to formulate the problem of estimating the cost of the completing of electronic components for the assembly of the selector-wave SKV-301 the sufficiency condition in the form of a generalized criterion defined by the introduction of a metric multiplicative convolution operator on the set of individual criteria.

Ключевые слова: анализ, достаточность, многокритериальность, радиодетали, изделие, критерий.

Keywords: analysis, sufficiency, multicriteria, radio, product, criterion.

Селектор всеволновой СКВ-301 (далее — изделие № 1) применяют в телевизионных приемниках VI—VII поколения. Он предназначен для селекции, усиления и преобразования телевизионных сигналов в метровом и дециметровом диапазонах и является аналогом селектора UV917 фирмы PHILIPS. В его конструкции применены поверхностно монтируемые электрорадиоэлементы. Поверхностный монтаж компонентов, в отличие от существующей технологии, обеспечивает высокую производительность и миниатюризацию аппаратуры при одновременном росте ее функциональной сложности.

Постановка задачи

В случае многокритериальной оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 вопрос о показателях качества (количестве, значимости, методах измерения и т.п.) не всегда очевиден. Набор критериев должен охватывать все существенные стороны рассматриваемых объектов. В большинстве принципов оценки качества в общем случае обычно принимается, что чем больше значение какого-либо показателя, характеризующего положительную сторону объекта, тем лучше. Однако применительно к оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 это положение не всегда справедливо. Поэтому предположим, что по каждому из показателей качества существует граница, за которой увеличение показателя бессмысленно, так как не приводит к действительному улучшению оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 и может быть даже вредным из-за возможного ухудшения других неконтролируемых показателей. Вводимую таким образом границу будем называть уровнем достаточности, а использованное положение — концепцией или аксиомой достаточности.

Модель анализа качества

Парадигма анализа (оценки) качества включает:

1) предварительный анализ (формулировку проблемы и определение перечня характеристик исходного множества оценки объектов);

2) структурный анализ (структуризация проблемы, формулировка общей цели оценки и целей более низкого уровня, определение критериев, показывающих степень достижения этих целей);

3) анализ неопределенности (установление соответствия между действительным критерием оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 и его положением в одно- или многомерном пространстве критериев);

4) анализ полезности или ценности (установление кардинальной полезности, т.е. отображение некоторого множества вариантов оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 на числовую ось, имеющую содержательный смысл "лучше-хуже");

5) процедура оптимизации (поиск варианта решения, который максимизирует ожидаемую полезность).

Применительно к проблеме обеспечения требуемого качества оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 первые три фазы анализа качества отрабатывали в ходе различных исследований. При этом по объему исследований и затраченному времени самой большой является фаза анализа неопределенностей, которая включает исследования по проблемам получения оценок качества и методам их подтверждения, т.е. имеет целью раскрытие всех неопределенностей в этих вопросах. Этапы формулировки проблемы целей оценки и анализа полезности (ценности) несмотря на кажущуюся тривиальность очень важны, так как даже малая ошибка в постановке задачи приводит к неверному результату или, как говорят, "значительно хуже получить ответ на неправильно поставленный вопрос, чем неполный ответ на правильно сформулированную задачу" [1].

С точки зрения анализа полезности и процедуры оптимизации более предпочтительным с методической и математической точек зрения являются подходы, основанные на использовании процедур оценки, согласно которым лучшими при оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 признаются объекты, получившие при отображении на числовую ось специального измеримого показателя бóльшую (или меньшую) оценку. При этом обычно предполагается, что числовая оценка не зависит от того, какое исходное множество объектов рассматривается [1].

Предлагаемый подход к построению процедуры оценки является не единственным, так как ее основным элементом служит правило (или принцип) оценки π, задающее отношение мультипликативного метризованного линейного порядка на множестве частных критериев. Обзор различных принципов оценки объектов (выбора) по виду отношения, задаваемому на множестве критериев, и их разрешающей способности приведен в работе [2]. Предпочтительными являются принципы, которые полностью решают проблему оценки или определяют выбор, т.е. позволяют установить для пары объектов a_ν и a_μ, оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 однозначное заключение, что $a_\nu > a_\mu$ (объект a_ν "лучше" оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 объекта a_μ), либо $a_\nu \approx a_\mu$ (объект a_ν равноценен объекту a_μ), либо $a_\nu < a_\mu$ (объект a_ν "хуже" объекта a_μ), и характеризуются векторами сравнений $S_{\nu\mu}$.

К числу таких принципов выбора относится принцип обобщенного критерия. Полезными также могут оказаться подходы, применяемые в лексикографических принципах выбора, когда на множестве частных критериев задается отношение сильного предпочтения [3]. В частности, лексикографический принцип выбора с уровнями притязаний при наличии отношения сильного предпочтения на множестве частных критериев устанавливает равноценность объектов ($a_\nu \approx a_\mu$), если их оценки по всем критериям не ниже некоторых пороговых значений [4].

Этот критерий может быть использован для обоснования многокритериальной оценки качества при наличии по каждому из m показателей заданного порогового значения d_i, превышение которого оценками $x_{i\nu}$ и $x_{i\mu}$ сравниваемых объектов (ν-го и μ-го) является необходимым и достаточным условием их равноценности по оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 состоянию:

$$a_\nu \approx a_\mu \Leftrightarrow x_i^\nu \geqslant d_i;\ \ x_i^\mu \geqslant d_i,\ \ i = 1,\ \ldots,\ m. \qquad (1)$$

Данное условие представляет собой вариант математической формулировки концепции достаточности в оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1, а вводимая таким образом граница d_i называется уровнем достаточности по каждому из показателей. Прямое использование этого принципа оценивания качества предполагает наличие отношения сильного предпочтения на множестве критериев $K = \{K_1,\ K_2,\ \ldots,\ K_m\}$, задаваемого в виде

$$K_1 \geqslant K_2 \geqslant K_3 \geqslant \ldots \geqslant K_m. \qquad (2)$$

Это в значительной степени ограничивает возможность его практического использования. С этой точки зрения, более целесообразным является использование принципа обобщенного критерия [5], когда на множестве критериев задается метризованное мультипликативное отношение линейного порядка. В этом случае:

$$a_\nu \succ a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\nu) > \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\mu);$$
$$a_\nu \approx a_\mu \Leftrightarrow \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\nu) = \sum_{i=1}^{m} \alpha_i K_i(a_\mu), \quad (3)$$

где α_i — коэффициенты, удовлетворяющие, например, условию

$$\sum_{i=1}^{m} \alpha_i = 1. \quad (4)$$

Принципы оценки (выбора) с несравнимыми критериями (принципы Парето, доминантности, Слейтера и др.), как правило, не определяют полностью оценку объекта и не могут однозначно провести выбор.

В пользу использования в процедуре оценки качества принципа обобщенного критерия (показателя) говорит невозможность манипулирования результирующей оценкой при наличии оператора агрегирующего набор строгих бинарных упорядочений вариантов по частным критериям в коллективную функцию одиночного выбора (в "синглтон"), когда оцениваемое множество одноэлементно, например, путем изменения отношения (2). Теорема Гиббарда—Саттервайта для этого случая доказывает, что оператор агрегирования неманипулируем, только если существует главный (решающий) критерий. Ввиду наличия условия (4) возможность манипулирования оценкой здесь исключена. Применительно к функциям оценки их характеристическим свойством, защищающим от манипулирования, является монотонность оператора, отображающего исходное множество оцениваемых объектов на числовую ось "лучше-хуже", поэтому важным является получение такого монотонного оператора.

В качестве монотонного оператора отображения (свертки) исходного множества оценки объектов на числовую ось "лучше-хуже" можно использовать метод, предложенный в работах [5, 6], где в качестве интегрального показателя рассматривается скалярная линейная функция от исходных критериев, определяемая размытым (в смысле Л. Заде) отношением на парах специально задаваемых объектов.

Необходимость использования аппарата нечетких множеств для задания размытых отношений обусловлена особенностями получения оценок по различным показателям, характеризующим оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1, и разрабатываемых на этапе анализа неопределенностей моделей для оценки объектов и процессов. Учитывая недостаточную определенность априорной информации при оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1, касающуюся как отдельных показателей, так и объектов в целом, целесообразно использовать адаптационные модели оценивания, наряду с детерминированными. В данном случае, при оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 неопределенность вызвана не только стохастическими причинами, а носит стратегический или концептуальный характер.

Для раскрытия такой неопределенности необходимо уточнение модели объекта в заданной области путем создания адекватных реальной обстановке расчетных методик функционирования сложных систем, в том числе в масштабе реального времени. Затраты на моделирование в целях оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 должны быть гораздо меньше возможных потерь от получения неадекватных оценок. Поэтому при недостатке информации в настоящее время для оценивания качества объекта широко используют методы, заключающиеся в установлении тем или иным способом однозначных значений только некоторых параметров. Заданные таким способом однозначные параметры значительно облегчают раскрытие дальнейшей неопределенности (механизмов и критериев оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1), однако величина неопределенности исходных данных при этом остается неизменной.

Это и определяет необходимость использования предлагаемого научно-методического аппарата для достижения поставленной цели — оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 в условиях неопределенности ряда их характеристик и широкого спектра ограничений, устанавливаемых технической, эксплуатационной и уставной документацией.

Переменные и критерии для оценки (анализа) качества

В самом общем случае структура любого комплексного критерия описывается набором высказываний, включающих различные признаки

или свойства объекта оценки. По своей природе большинство этих признаков оценки с точки зрения математики нечетко или субъективно либо вообще лишено в своем начальном виде количественных характеристик. В этом случае нечеткие или размытые признаки называют "субъективными", чем подчеркивается субъективная неопределенность в оценке наличия этого признака у исследуемого объекта. В отличие от этого "объективными" называют признаки, которые для услуги (объекта) определены четко в классическом математическом понимании, и всегда можно сказать, обладает ли этими признаками объект.

Для обработки и анализа "субъективных" переменных до недавнего времени не было единой строгой в математическом смысле теории. В 1965 г. Л. Заде разработал основу такой теории, которая в переводе получила название теории нечетких множеств (НМ). Концепция НМ возникла как реакция на неадекватность высоких требований, предъявляемых к точности анализа сложных систем классическими математическими методами, реальному положению дел, когда во многих случаях сама постановка задачи, ограничения и цели исследований являются неопределенными или размытыми. К таким задачам следует отнести и проблему оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1.

Лежащие в основе теории НМ понятие нечеткого множества предлагается в качестве средства математического моделирования комплексного критерия достаточности и входящих в него нечетких признаков объектов, которые описывают с помощью так называемых "лингвистических переменных" [7]. К настоящему времени основные определения и понятия теории НМ хорошо известны. В соответствии с этими определениями лингвистическими переменными будем называть все нечеткие признаки или свойства объектов и характеризовать их соответствующими нечеткими подмножествами некоторых базовых четких множеств (базовых переменных).

Введем также понятие лингвистического критерия. Лингвистическими будем называть критерии, оценки по шкалам которых являются нечеткими значениями одноименных лингвистических переменных [7]. В этом случае комплексный критерий для оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 будет являться в общем случае лингвистическим и составным.

Следовательно, оценки по шкалам лингвистических критериев являются нечеткими подмножествами некоторых базовых множеств. В зависимости от природы базовой переменной (базового множества) различаются лингвистические критерии с измеримой базовой переменной (числовые) и с неизмеримой базовой переменной (ординальные).

Для числовых лингвистических критериев средством математического описания оценок по базовым физическим шкалам могут быть выбраны обычные четкие или нечеткие числа в зависимости от степени определенности соответствующих оценок. Для ординальных лингвистических критериев с неизмеримыми базовыми переменными физические шкалы могут вообще не существовать. В этом случае при формализации таких критериев могут использоваться некоторые базовые терм-множества, состоящие из нескольких термов [8]. Каждый терм будет описываться конечным нечетким подмножеством множества балльных значений, рассматриваемых как лингвистические значения соответствующих критериев.

В целом возможны два направления или подхода в формировании обобщенного лингвистического критерия оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1. Первый подход основан на свертывании отдельных частных критериев, составляющих иерархическую структуру, в некоторый обобщенный критерий с помощью тех или иных логических и алгебраических операций. Второй подход основан на одновременном рассмотрении всех критериев нижележащего уровня, входящих в критерий более высокого уровня. В этом случае, например, лингвистический критерий достаточности формализуется в виде некоторой нечеткой области в многомерном критериальном пространстве R_e^m (m — число частных критериев верхнего уровня). Связь между критериями K_i (i = 1, ..., m) и результирующим критерием выражается с помощью отображения Ф [5]. Методы построения отображений Ф — суть современных исследований в данной области.

Модель построения показателя для оценки (анализа) качества объектов

Пусть $A = \{a_1, a_2, ..., a_n\}$ — множество объектов, ранжировку которых по оценке стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 требуется осуществить в критериальном пространстве R_e^m, характеризуемым множеством критериев $K = \{k_1, k_2, ..., k_m\}$. Множество объектов A отображается в критериальном пространстве R_e^m

в виде множества точек, образующих матрицу оценок. Пусть так же задана форма скалярной линейной функции Z в виде выражения (3) и на соответствующей ей оси показателя z могут точками отображаться объекты из множества A при известном векторе коэффициентов α_i, которые обозначим B и назовем вектором свертки.

Задача заключается в определении компонент вектора B, подчиняющихся условию (4), и построении показателя z, аппроксимирующего некую объективно известную или специально задаваемую (обучающую) матрицу парных взаимосвязей между искусственными объектами (радиодеталей для сборки изделия № 1):

$$Q = \|q_{rk}\|_{p,p}. \quad (5)$$

Размер квадратной симметричной матрицы Q определяется числом p рассматриваемых искусственных объектов, а ее элементами q_{rk} являются известные или задаваемые квадраты расстояний между r-м и k-м искусственными объектами на оси полезности (ценности) с точки зрения общей (глобальной) цели ранжирования.

На оси показателя z квадрат расстояния между r-м и k-м искусственными объектами имеет вид:

$$d_{rk}(B) = \left(z_r - z_k\right)^2 = \left[\sum_{j=1}^{m} b_j \left(x_{rj} - x_{kj}\right)\right]^2. \quad (6)$$

Наблюдаемая структура взаимосвязей между различными искусственными объектами на оси показателя z при фиксированном векторе B определяется квадратной симметричной матрицей

$$D(B) = \|d_{rk}\|_{p,p}. \quad (7)$$

Соответствие структуры взаимосвязей между искусственными объектами (транспортными средствами), задаваемой матрицей Q и наблюдаемой на оси показателей z структуры взаимосвязей, определяемых матрицей $D(B)$, оценивается с помощью функционала:

$$J(B) = \sum_{r=1}^{p-1} \sum_{k=r+1}^{p} \left[d_{rk}(B) - q_{rk}\right]^2. \quad (8)$$

Функция Z^*, для которой величина $J(B)$ минимальна, а вектор B удовлетворяет условиям (8), называется структурным фактором в критериальном пространстве R_e^m и является искомым интегральным критерием для оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1.

Пример оценивания (анализа) качества объектов

В качестве примера рассмотрим оценку стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1.

В соответствии с введенной концепцией достаточности и реализующим ее критерием вида (3) "лучший" критерий оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 имеет минимальное значение показателя достаточности. В этом случае степень интегрального отклонения частных показателей от требований (уровней достаточности) будет минимальной, тем самым обеспечивается максимальное качество.

Основная сложность получения критерия достаточности для конкурентоспособного прибора аппаратной связи заключается в определении весовых коэффициентов, которые устанавливают предпочтительность одних критериев по сравнению с другими. Используя функциональный способ определения весовых коэффициен-

Цены, нормы расхода и ранжировка оценки стоимости комплектующих изделий и полуфабрикатов для технологического процесса сборки селектора всеволнового СКВ-301

Наименование	Количество на 1 изделие, шт.	Оптовая цена за единицу, у.е.	Показатель достаточности z_i	Место в рейтинге
Транзистор (S880TR)	2	2,20	0,220	2
Микросхема (SO-24)	1	4,20	0,420	1
Диод (BA 582)	6	1,37	0,137	3
Резистор (Р1-12)	24	0,91	0,091	7
Конденсатор (МЧ)	56	1,10	0,110	5
Варикап (BB 619)	11	1,60	0,160	4
Плата монтажная	1	0,95	0,095	6

тов, определим достаточность оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1.

Полученные по результатам вычислений значения показателя достаточности z_i ранжируют, сравнивая оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 (таблица).

Таким образом, предпочтительным является резистор, так как его уровень достаточности самый меньший, что говорит о малозатратности на сборку радиодеталей изделия № 1, непредпочтительным является микросхема, ее уровень достаточности самый большой в рейтинге — свидетельствует о высокой стоимости на сборку изделия № 1.

Рассмотренная общая методика построения критерия оценки может быть использована для построения требуемых критериев оценки стоимости комплектующих радиодеталей для сборки изделия № 1 в современных условиях, так как опирается на апробированные методы теории принятия решений.

Библиографический список

1. **Кини Р.Л., Райфа Х.** Принятие решений при многих критериях: предпочтения и замещения: пер. с англ. М.: Радио и связь, 1981. 560 с.
2. **Литвак Б.Г.** О разрешающей способности принципов выбора при экспертных оценках // Автоматика и телемеханика. 1991. № 2. С. 162—170.
3. **Литвак Б.Г.** Экспертная информация. Методы получения и анализа. М.: Радио и связь, 1982. 184 с.
4. **Вентцель Е.С.** Исследование операций: задачи, принципы, методология. М.: Наука, 1988. 208 с.
5. **Мучник И.Б., Ослон А.А.** Методы построения интегрального показателя // Автоматика и телемеханика. 1984. № 10. С. 5—23.
6. **Авен П.О.** Построение интегрального показателя в критериальном пространстве // Автоматика и телемеханика. 1985. № 4. С. 87—91.
7. **Заде Л.А.** Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенного решения. М.: Мир, 1976. 165 с.
8. **Норвич А.М., Турксен И.Б.** Построение функций принадлежности // Нечеткие множества и теория возможностей. Последние достижения: пер. с англ. / под ред. Р.Р. Ягера. М.: Радио и связь, 1986. С. 64—71.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

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

УДК 621.22

А.В. Топоров, П.В. Пучков, *канд-ты техн. наук*
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России),
В.А. Полетаев, *д-р техн. наук*
(Ивановский государственный энергетический университет им. В.И. Ленина),
Н.А. Кропотова, *канд. хим. наук,* **В.В. Киселев,** *канд. техн. наук*
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России)
E-mail: poletaev@tam.ispu.ru

Применение сжатого газа для привода гидравлического инструмента

Рассмотрены новые технические решения по разработке привода для гидравлического инструмента. Предложено в качестве источника энергии использовать газ под давлением. Описаны принципиальная схема генератора давления и конструкция испытательного стенда для проверки ее работоспособности. Приведены некоторые результаты испытаний.

New technical solutions to drive the development of hydraulic tools are considered. It proposed as a power source utilize a pressurized gas. This design of the generator and a pressure test stand design for testing purposes is described. Some test results are given.

Ключевые слова: гидравлический инструмент, пневмогидронасос, привод, сжатый газ.

Keywords: hydraulic tools, pneumohudraulic pump, drive, compressed gas.

Традиционно для привода гидравлического инструмента используют насосные станции с приводом от электрического двигателя, двигателя внутреннего сгорания или с ручным приводом. Недостатки насосов с бензиновыми двигателями — трудоемкость обслуживания, необходимость хранения и транспортировки топлива, проблемы с запуском при низких температурах. Ручные насосы просты в эксплуатации и обслуживании, однако менее эффективны по сравнению с бензиновыми и требуют для работы дополнительную единицу расчета из числа личного состава. Электрические насосные станции имеют ограниченное время работы, определяемое емкостью батарей [1].

Одна из основных проблем, возникающих при использовании гидравлического инструмента — необходимость привлечения как минимум двух человек, обслуживающих непосредственно исполнительный орган и гидравлическую насосную станцию. При коммерческом использовании гидравлического инструмента это влечет дополнительные материальные затраты. Привлечение дополнительных единиц личного состава при проведении ликвидации масштабных последствий чрезвычайных ситуаций, где требуется применение гидравлического аварийно-спасательного инструмента, значительно увеличивает трудозатраты и повышает время выполнения задачи.

Поэтому в последнее время появились устройства, позволяющие работать гидравлическим инструментом одному оператору [1]. Например, ООО "Простор" (Московская обл.) освоило производство станции насосной гидравлической СНГа "Штурм" ранцевого исполнения [1]. В данном изделии в качестве источника энергии служат батареи, приводящие в действие электрический насос мощностью 1,2 кВт. Масса станции — 8,5 кг. Время непрерывной работы от аккумулятора — 7...10 мин.

Довольно высокая плотность энергии аккумуляторных батарей, составляющая порядка 30 Вт·ч/кг [2], относится непосредственно к самому элементу питания. Масса всего устройства складывается из массы шасси, насоса, электродвигателя, гидравлической жидкости и соединительно-запорной арматуры. Таким образом,

исключив из конструкции хотя бы один элемент, можно добиться сопоставимой энергетической эффективности, даже применив источник энергии с меньшей плотностью.

Таким источником может быть баллон с газом под давлением. Его энергетическая плотность составляет порядка 14 Вт·ч/кг, что почти в два раза меньше энергетической плотности электрических аккумуляторов [2]. Для работы генератора давления рабочей жидкости с использованием газа под давлением в качестве источника энергии не требуется электродвигатель. Расчеты показывают, что разрабатываемый генератор давления имеет общую массу 11,5 кг и может работать 24 мин от одной заправки баллона [3]. Это достигается за счет значительного увеличения, по сравнению с аккумуляторными батареями, массы баллона и, как следствие, запасенной энергии.

В данном случае энергетическая эффективность ранцевой электрической установки при емкости батареи 100 Вт·ч составит 11,7 Вт·ч/кг, а разрабатываемого устройства при запасе энергии 150 Вт·ч — 13 Вт·ч/кг. Помимо меньшей энергетической эффективности установки с электрическими аккумуляторами процесс их зарядки занимает порядка 10 ч, в то время как баллон может быть заправлен за 3...4 мин.

С точки зрения энергетической эффективности использование сжатого газа для привода гидравлического аварийно-спасательного инструмента наиболее предпочтительно.

Предлагаемая конструкция (рис. 1) содержит исполнительный механизм *1* со сменным рабочим органом *2* (например, ножницы, расширители, домкраты, труборезы или резаки). Исполнительный механизм *1* соединен шлангами высокого давления с приводным механизмом, выполненным в виде отдельного узла в ранцевом исполнении. Элементы приводного механизма закреплены на снабженном ремнями *4* основании *3*, изготовленном, например, из композитного материала. Приводной механизм содержит пирогенератор давления рабочей среды, включающий пневмогидронасос *5*, заполненный рабочей жидкостью и снабженный расширительным бачком *6*. Исполнительный механизм *1* соединен шлангом высокого давления *7*, имеющим быстроразъемные соединения на концах (на чертеже не показаны), с пневмогидронасосом *5* и шлангом высокого давления *8*, имеющим быстроразъемные соединения на концах (на чертеже не показаны), с расширителем *6*. Пневмогидронасос *5* соединен шлангом *9* через редуктор давления *10* с ресивером *11*, выполненным в виде емкости и заполненным воздухом. Ресивер *11* через редуктор давления *10* соединен с камерой *12*, снабженной затвором с системой инициации и предназначенной для установки сменного пиропатрона (на чертеже не показан) и предохранительным клапаном *13*.

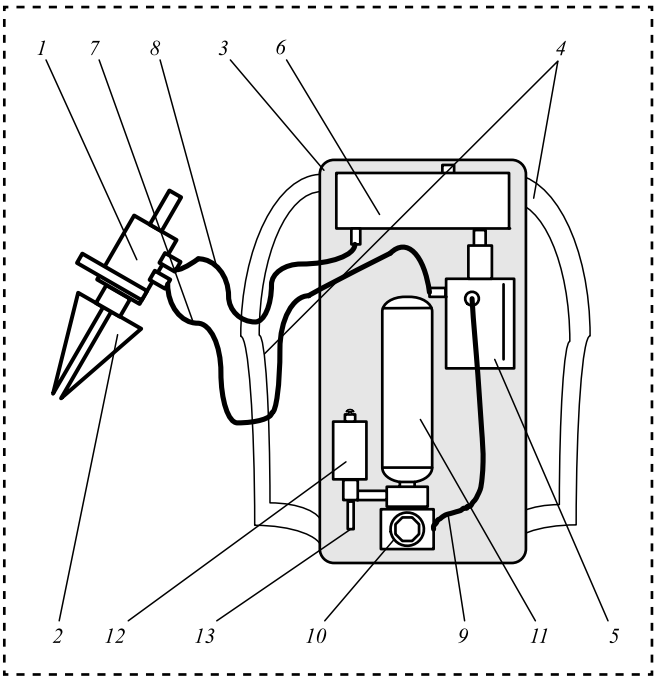

Рис. 1. Схема привода:
1 — исполнительный механизм; *2* — рабочий орган; *3* — основание; *4* — ремень; *5* — пневмогидронасос; *6* — расширительный бачок; *7*, *8* — шланги высокого давления; *9* — шланг; *10* — редуктор давления; *11* — ресивер; *12* — камера; *13* — предохранительный клапан

Переносной гидравлический аварийно-спасательный инструмент работает следующим образом. Приводной механизм инструмента посредством ремней *4* закрепляют в виде ранца на спине оператора. Изготовление приводного механизма в виде отдельного узла в ранцевом исполнении позволяет значительно сократить время, необходимое для доставки инструментов в зону работы. После этого шлангами высокого давления исполнительный механизм: *1* подсоединяется к приводному механизму: шлангом высокого давления *7* — к пневмогидронасосу *5*, заполненному рабочей жидкостью, а шлангом высокого давления *8* — к расширительному бачку *6*. Наличие быстроразъемных соединений на шлангах высокого давления позволяет менять в случае необходимости сам исполнительный механизм *1*. Сменный рабочий орган *2* прикрепляют к исполнительному механизму *1*. В камеру *12* устанавливают пиропатрон и запирают затвором, снабженным системой инициации. Размещение пиропатрона в камере *12* исключают контакт газов, полученных при сгорании пиропатрона, с рабочей жидкостью. После инициации и сгорания заряда пиропатрона в емкости ресивера *11* создается избыточное давление газа (воздуха), при превышении рабочего давления газов выше допустимого значения срабатывает предохранительный клапан *13*. Газ (воздух) под

давлением из ресивера *11* через редуктор давления *10* по шлангу *9* поступает к пневмогидронасосу *5*, преобразующему давление газа в давление рабочей жидкости, которая по шлангу высокого давления *7* подается к исполнительному механизму *1*, приводя его в действие. Редуктор давления *10* позволяет понизить давление газа (воздуха) до необходимой величины подачи газа (воздуха) из ресивера *10* по шлангу *9* к пневмогидронасосу *5*. Отработанная жидкость по шлангу высокого давления *8* поступает в расширитель *6*, а затем — в пневмогидронасос *5*, что обеспечивает ее непрерывную циркуляцию в гидравлической системе.

Для проверки работоспособности предложенной схемы изготовлен специальный испытательный стенд (рис. 2).

В качестве источника давления применяли баллон со сжатым воздухом под давлением 26 МПа. Для понижения давления воздуха баллон оснащен редуктором. Редуцированное давление воздуха составляет 0,6 МПа. Для преобразования давления сжатого воздуха в давление жидкости стенд оснащен пневмогидронасосом *2*. Выходное отверстие пневмогидронасоса *2* соединяется шлангами высокого давления *3* с гидравлическим инструментом *4* марки "Ермак" [1]. Выходная магистраль гидравлического инструмента соединена с баком *5* объемом 1 л, который соединяется с входным отверстием пневмогидронасоса *2*.

Работает установка следующим образом. Сжатый воздух от баллона подается в пневмогидронасос, где давление воздуха преобразуется в давление жидкости. Жидкость под давлением по шлангам подается к исполнительному органу и приводит его в движение. Таким образом, обеспечивается привод аварийно-спасательного инструмента от сжатого воздуха.

Учитывая редуцированное давление воздуха 0,6 МПа и расход 0,28 м^3/мин, для используемого пневмогидронасоса давление рабочей жидкости составляет 60 МПа, расход — 160 см^3/мин. Такое давление и расход рабочей жидкости достаточны для нормального функционирования гидравлического аварийно-спасательного инструмента марки "Ермак" [1].

В ходе проведенных испытаний при давлении воздуха 0,55 МПа и расходе 237 л/мин гидравлический инструмент уверенно перекусывал стальную арматуру диметром 22 мм. Давление воздуха в баллоне рабочим объемом 8 л составляло 26 МПа. Время перекусывания арматуры составило 36 с. Для сравнения перекусывание арматуры этим же гидравлическим инструментом, приводимым ручной насосной станцией с привлечением двух человек, составило 46 с при нормативном времени 50 с.

При таких характеристиках баллона и условиях работы время непрерывного функционирования установки составило 24 мин.

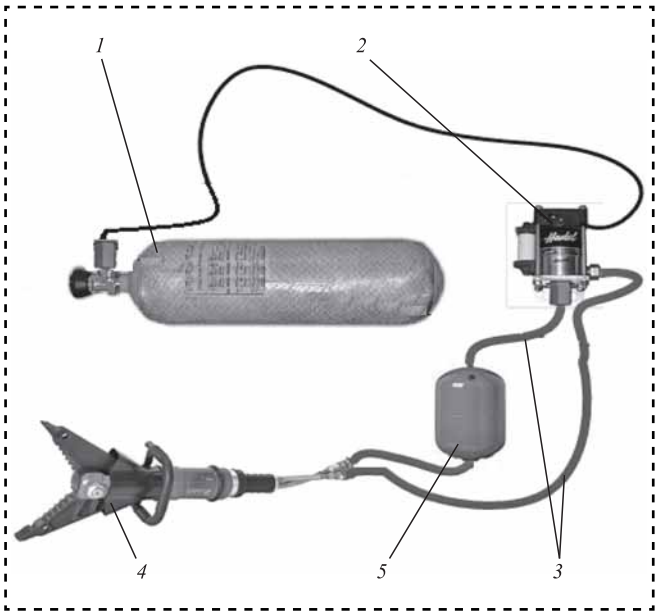

Рис. 2. Схема экспериментального стенда:
1 — баллон со сжатым воздухом; *2* — пневмогидронасос; *3* — шланги высокого давления; *4* — гидравлический инструмент; *5* — бак

Представленный стенд продемонстрировал на практике возможность применения сжатого газа в качестве источника энергии для привода гидравлического инструмента. Время непрерывной работы устройства превосходит время работы аккумуляторного гидравлического насоса [1].

Габаритные размеры входящих в состав устройства компонентов позволяют выполнить устройство в едином блоке с возможностью транспортировки за спиной.

В дальнейшем планируется совершенствование стенда и проведение его более детальных испытаний.

Библиографический список

1. **Лавриненко Д.Ф., Петренко П.П., Баринов М.Ф., Мясников Д.В.** Основы применения аварийно-спасательного инструмента и оборудования: учеб. пособие. Химки: Академия гражданской защиты МЧС России, 2014.

2. **Гулиа Н.В.** Накопители энергии. М.: Наука, 1980. 152 с.

3. **Смирнов М.В., Топоров А.В., Покровский А.А.** Использование сжатого воздуха для привода гидравлического аварийно-спасательного инструмента // Фундаментальные и прикладные исследования в современном мире. 2015. № 12-1. С. 110—112.

4. **Киселев В.В., Гомонай М.В., Пучков П.В., Лисовская И.А.** Перспективы применения нанопорошков силикатов в смазочных материалах, используемых в аварийно-спасательной и пожарной технике // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2015. № 3 (26). С. 38—46.

5. **Киселев В.В., Топоров А.В., Пучков П.В.** Перспективы применения магнито-жидкостных устройств в пожарной и аварийно-спасательной технике // Научные и образовательные проблемы гражданской защиты. 2010. № 2. С. 63—64.

УДК 621.792

А.В. Игнатов, *канд. техн. наук,* **М.Э. Винокурова**
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: Tamaeka@yandex.ru

Оригинальная технология сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений

Предложен оригинальный метод сборки цилиндрических клеевых соединений в вертикальном положении с возможностью использования дозирующих устройств. Выделены два основных подхода к формированию технологического процесса сборки цилиндрических клеевых соединений с использованием оригинального метода сборки, учитывая оснащенность производства, требуемые условия сборки и габариты изделия.

The original method of assembling cylindrical glue joints in an upright position, with the possibility of using dosing machines is offered. Two main approaches to the formation of the technological process of assembling cylindrical adhesive joints using the original assembly method which include the production equipment, required assembly conditions and the dimensions of the product are separated.

Ключевые слова: регулируемые цилиндрические клеевые соединения, качество сборки, методы сборки, дозирующие устройства.

Keywords: adjusting cylindrical adhesive joints, joining quality, joining methods, technological process of joining, dosing machine.

Клеевые цилиндрические соединения применяют при установке подшипников в корпуса или на валы, фиксации роторов, шестерен, звездочек и шкивов на валах, установке цилиндрических втулок и гильз в корпуса и т.д.

Наибольшую сложность при сборке цилиндрических соединений представляют сдвоенные направляющие, к которым предъявляют повышенные технические требования по взаимному расположению (рис. 1, *а*). Например, при сборке допускаются углы перекоса между направляющими $\beta = 1°37'$, отклонение направляющей от нормали $\alpha = 48'$.

В случае нагруженных соединений в данных конструкциях направляющие, как правило, запрессовываются в нижнюю плиту, а с верхней плитой соединяются по посадке с зазором через подшипники скольжения, которые запрессованы в верхнюю плиту. При этом требование свободного перемещения верхней плиты по направляющим без рывков и заеданий обеспечивается только технологическими методами. Поэтому взаимные перекосы, отклонение от перпендикулярности могут привести к браку изделия. Обеспечение указанных требований конструкции достигают высоким классом точности обработки деталей, что увеличивает трудоемкость и себестоимость изготовления и сборки изделий.

Для малонагруженных изделий вместо прессовых допустимо использование клеевых соединений, что дает возможность проводить обработку отверстий с более грубым классом допуска и большего диаметра в нижней плите под направляющие, а в верхней — под подшипники. В этом случае, направляющие устанавливают с зазором в нижнюю плиту, который впоследствии будет заполнен соответствующей клеевой композицией. При установке в верхнюю плиту посадка подшипников с направляющей сохраняется, а сборка подшипников скольжения с верхней плитой выполняется аналогично установке направляющей в нижнюю плиту (рис. 1, *б*). В собранном изделии эксплуатационные требования обеспечиваются за счет регулирования взаимного положения направляющих в клеевом зазоре, которые фиксируются в требуемом положении до

отверждения клеевой композиции. Такой подход позволяет снизить трудоемкость и себестоимость сборки, не снижая качество соединения.

Способы нанесения клеевых композиций при сборке цилиндрических направляющих:

— по спирали (требуется технологическая оснастка, обеспечивающая вращательное и поступательное движения направляющей в отверстие);

— внутрь отверстия под давлением (при сборке возможно вытеснение клеевой композиции из клеевого шва);

— несколькими локальными витками с последующей установкой направляющей в отверстие (равномерность такого нанесения обеспечивается лишь в процессе сопряжения).

При таких способах нанесения происходит перерасход клеевой композиции, вытеснение ее из зоны сборки, что приводит к ухудшению внешнего вида соединения, трудно обеспечить равномерность нанесения и вытеснение пузырьков воздуха из клеевого шва.

При механизации и автоматизации работы используют дополнительные устройства, позволяющие повысить качество и уменьшить время сборки: нагрев (для изменения вязкости клея и увеличения скорости отверждения); перемещение сопла, подающего клеевую композицию.

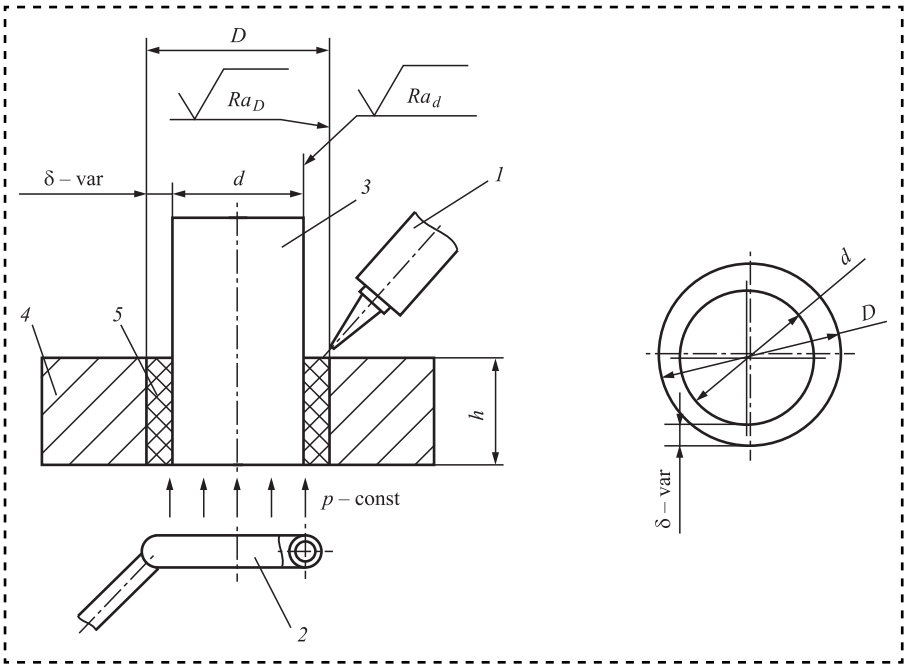

Рис. 2. Принципиальная модель сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений:
1 — дозатор; *2* — насадка; *3* — вал; *4* — втулка; *5* — клеевая композиция; δ — зазор; *d* — диаметр вала; *D* — диаметр втулки; Ra_d — параметр шероховатости наружной поверхности вала; Ra_D — параметр шероховатости внутренней поверхности втулки; *h* — длина сопряжения; *p* — давление воздушной среды

Представленные особенности приводят к увеличению трудоемкости и себестоимости изготовления выпускаемой продукции.

Для повышения качества сборки цилиндрических направляющих разработан оригинальный метод сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений (рис. 2).

Вал *3* устанавливают во втулку *4*. Регулируют положение сопрягаемых деталей за счет создаваемого в соединении зазора *5*. Дозатором *1* в зону сборки *5* подают клеевую композицию определенной вязкости. Насадкой *2* с подачей воздушного потока в зоне сборки регулируют давление воздушного потока, необходимого для предотвращения вытекания клеевой композиции из зоны сборки *5*, а также температуру для ускорения отверждения клея.

Разрабатываемый метод сборки предусматривает технологическую оснастку для сборки соединения, которая позволяет регулировать и фиксировать соединения в требуемом положении.

При сборке регулируемых цилиндрических клеевых соединений зазор в разных направлениях

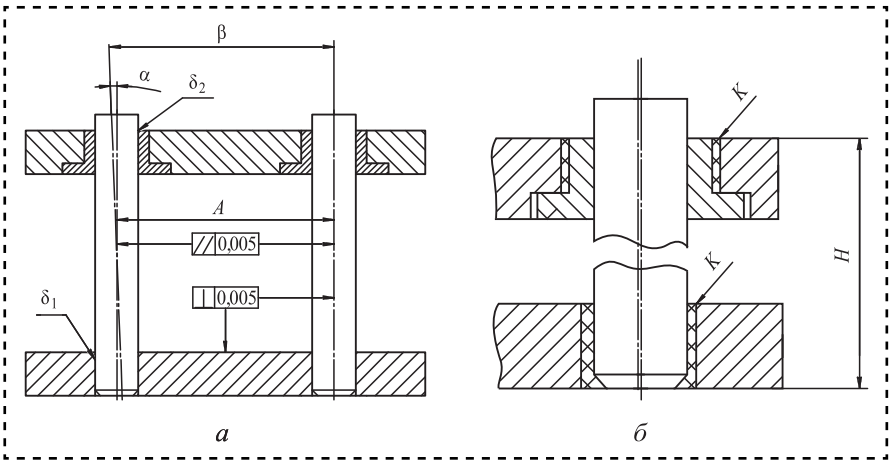

Рис. 1. Сборка цилиндрических направляющих:
а — при запрессовке; *б* — при склеивании; *К* — клеевая композиция

соединения варьируется из-за возможности регулирования сопрягаемых изделий по углу наклона; положению сопрягаемых деталей и смешанно.

При разработке технологического процесса сборки регулируемых клеевых цилиндрических соединений учитывают требования:

1) геометрические (см. рис. 2):
угол перекоса сопрягаемых поверхностей;
высоту соединения h;
диаметр охватываемой детали d;
диаметр охватывающей детали D;
направляющие фаски;
заходные пояски;

2) технологические: скорость отверждения; время выдержки; давление воздушной среды;

3) эксплуатационные: температуру эксплуатации; вид нагружения соединения.

По данным литературных источников при сборке цилиндрических соединений в натяг: угол перекоса сопрягаемых поверхностей не должен превышать 30′; направляющие фаски выполняют под углом 30...45°, а при больших натягах под углом 10...15°; заходные пояски обрабатывают толщиной 2...3 мм.

В зависимости от зазора, геометрических, конструкционных и эксплуатационных особенностей соединения можно варьировать параметры для каждого изделия в партии.

Разработанный метод имеет ряд оригинальных особенностей. В зону сборки через насадку, установленную в основании сборочной единицы, подают поток воздушной среды, в котором регулируется давление и температура. Такой прием позволяет предотвратить вытекание нагнетаемого клея из зазора, обеспечить равномерность заполнения зазора в соединении, варьировать скорость отверждения клеевой композиции.

Метод предусматривает использование дозирующих устройств, что позволит повысить технико-экономические показатели. При известных геометрических параметрах соединения доза клеевой композиции может быть легко рассчитана, что сократит перерасход клеевой композиции. Подача клея в зону сборки через дозатор предусматривает его нагнетание с избыточным давлением. Таким образом, образуется замкнутая поверхность, заполненная клеевой композицией, в которой направляющая свободно перемещается, а ее положение регулируется до отверждения клеевой композиции.

Сама клеевая композиция "запирается" в замкнутом объеме и полимеризуется при благоприятных условиях, исключающих ее вытекание, выпучивание или вспенивание. В случае разнотолщинности зазора, возникновении эксцентриситета необходимо варьировать температуру и давление воздушного потока по секторам, что создаст благоприятные условия для одновременного отверждения клея во всем клеевом шве.

Рассмотренные особенности позволяют сформировать два основных подхода к технологическому процессу сборки цилиндрических клеевых соединений с использованием предложенного метода в зависимости от оснащенности производства, требуемых условий сборки, габаритов изделия.

Первый подход заключается в выполнении следующих основных этапов:

1. Сопряжение собираемых изделий в требуемом положении. В зависимости от габаритов изделия, геометрических параметров соединения, оснащенности производства и квалификации рабочих подбирают скорость сопряжения, технологическую оснастку, которая позволяет регулировать и фиксировать соединения в требуемом положении.

2. Заливка создаваемого зазора клеевой композицией определенной вязкости. Согласно предлагаемому методу возможно использование любых (например, предварительно смешанных многокомпонентных) клеевых композиций при создаваемом зазоре, различных геометрических параметрах соединения, а также при возникновении эксцентриситета. В зависимости от оснащенности производства применяют дозирующие устройства, устройства подачи давления или температуры в зону сборки для равномерного распределения клеевой композиции, а также варьирование скоростью отверждения.

3. Регулирование положения сопрягаемых деталей проводят исходя из требований точности изготовления изделия (предельные отклонения размеров и формы, расположения поверхностей) по углу наклона, положению сопрягаемых изделий или смешанно. Контроль регулирования осуществляют в зависимости от уровня автоматизации работ с помощью измерительных головок, эталонных направляющих, с использованием специальных приспособлений для больших партий деталей.

При использовании такого технологического подхода к сборке происходит равномерное заполнение зазора клеевой композицией в соединении. Данный подход наиболее применим для малогабаритных изделий, так как для изделий большой массы требуется дополнительное обо-

рудование для регулирования взаимного положения сопрягаемых деталей.

Второй подход к процессу сборки цилиндрических соединений подразумевает выполнение следующих основных этапов:

1. Сопряжение изделий.

2. Регулирование взаимного расположения изделий в соединении.

3. Заливка зазора требуемой клеевой композицией.

В таком случае при регулировании положения деталей до заливки клеевой композицией могут образоваться неравномерный зазор в соединении, непроклеи из-за разнотолщинности получаемого клеевого слоя и образования эксцентриситета.

При втором подходе необходимо:

1) устройство придания дополнительного движения валу или корпусу для создания равномерного клеевого слоя в соединении в зависимости от конструкции изделия. В случае если корпус имеет сложную конфигурацию или большие габариты, дополнительное вращательное движение необходимо задать валу, если вал выполнен из хрупкого материала, то дополнительное движение для более равномерного распределения клеевой композиции в зазоре необходимо задавать корпусу;

2) в случае большого эксцентриситета необходимо предусмотреть применение секционной насадки, подающей воздушный поток в зону сборки с варьированием температуры и давления воздушного потока по секторам. Число секторов и давление в каждом из них зависят от величины эксцентриситета и вязкости клеевой композиции;

3) варьирование температуры воздушной среды позволяет ускорять процесс отверждения клеевой композиции, регулировать ее вязкость, что сказывается на смачиваемости поверхностного слоя и уменьшает трудоемкость выполнения соединения. Благоприятные условия для одновременного отверждения клея по всему объему в клеевом шве создаются с помощью специальной конструкции насадки (рис. 3).

Благодаря предлагаемой методике сборки регулируемых цилиндрических клеевых соединений по каждому из рассматриваемых подходов возможно:

регулирование и фиксация деталей в требуемом положении;

исключение перерасхода и вытекания дорогостоящей клеевой композиции;

применение любых готовых клеевых композиций;

сокращение времени технологического процесса сборки;

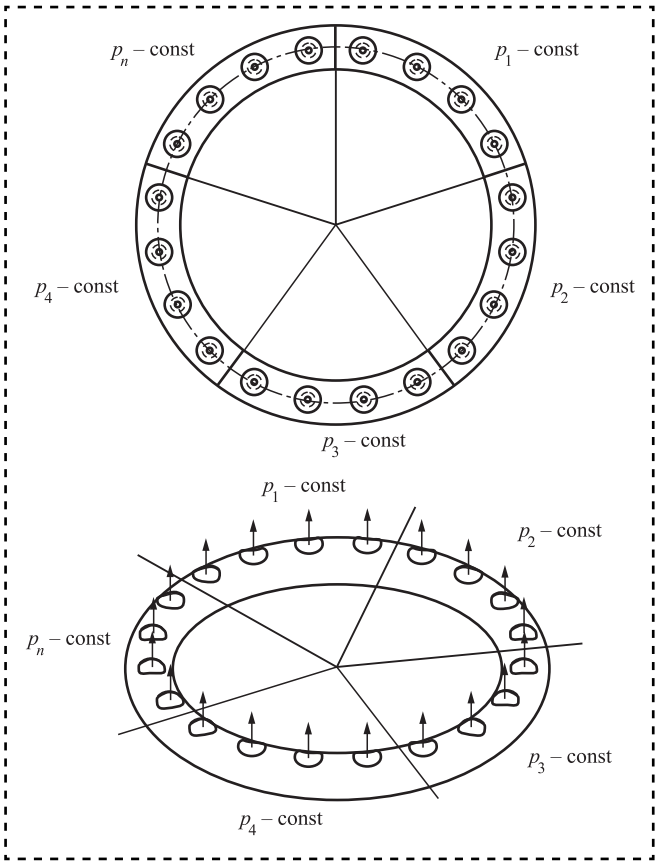

Рис. 3. Конструкция секционной насадки:
$p_1 ... p_n$ — давление воздушной среды в каждом секторе; $p_1 \neq p_2 \neq p_3 \neq p_4 \neq ... \neq p_n$

регулирование скорости отверждения клеевой композиции;

повышение качества сборки цилиндрических соединений;

снижение трудоемкости и себестоимости сборки.

Библиографический список

1. **Ignatov A.V., Bezmenov V.S.** Devices for Transportation and Dosing of Adhesive Compounds at Assembly Facilities // Polymer science. Series D. Vol. 8. No. 1. 2015. P. 79—84.

2. **Игнатов А.В.** Применение клеев при сборке изделий в машиностроении: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2000. 43 с.

3. **Игнатов А.В.** Новые тенденции развития сборки клеевых соединений в машиностроении // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. Технология и технологические машины. 2011. № 10. С. 62—68.

4. **Игнатов А.В.** Влияние характеристик поверхностного слоя детали на качество сборки клеевого соединения в машиностроении // Справочник. Инженерный журнал. 2010. № 12. С. 17—24.

5. **Малышева Г.В.** Склеивание в машиностроении: справочник. В 2 т. Т. 2. М.: Наука и технологии, 2005. 244 с.

6. **Петрова А.П.** Клеящие материалы: справочник // под ред. Е.Н. Каблова, С.В. Резниченко. М.: Каучук и резина. 2002. 196 с.

УДК 666.1:681.2:682.9

С.А. Микаева, *д-р техн. наук,* **А.С. Микаева,** *канд. экон. наук*
(Московский технологический университет),
А.А. Горбунов, *канд. техн. наук*
(Мордовский государственный университет им. Н.П. Огарева, г. Саранск)
E-mail: mikaeva@ npo.lit.ru

Повышение качества и экологичности при сборке люминесцентных ламп

Описаны пути освоения новых конструкций сборки люминесцентных ламп и технологий введения в них ртути, обеспечивающих минимизацию потребления и попадания ртути в окружающую среду и обусловленных необходимостью решения проблемы зартученности при производстве и эксплуатации люминесцентных ламп. Показаны исследования по сборке конструкций и технологии изготовления ламп с минимально необходимым количеством ртути, находящейся в связанном состоянии — в виде амальгамы.

Ways of development of new structures for the assembly fluorescent lamps and technologies, the introduction of mercury, supporting the minimization of consumption and release of mercury in the environment and due to the need to solve the problem of artusenate in the production and operation of fluorescent lamps are described. Studies on the assembly of structures and manufacturing technology lamps with minimum necessary quantity of mercury held in a bound state — in the form of amalgam are shown.

Ключевые слова: сборка, люминесцентная лампа, ртуть, амальгама, штенгель, колба, конструкция, технология.

Keywords: assembly, fluorescent lamp, mercury, amalgam, stengel, bulb, design, technology.

В настоящее время можно выделить следующие направления повышения качества и экологичности сборки люминесцентных ламп (ЛЛ) [1].

1. Создание ЛЛ на безртутной основе. В рамках данного направления созданы ЛЛ с использованием разряда в инертных, молекулярных газах и в парах кадмия, но они не удовлетворяют требованиям серийного и массового производства.

2. Создание ЛЛ с уменьшенным количеством ртути. Уменьшить количество жидкой ртути, вводимой в лампу, можно перейдя на малые диаметры трубок и малые габаритные размеры ЛЛ — до 3 мг, а также с помощью производства безэлектродных ЛЛ — до 1 мг [1].

3. Создание ЛЛ с дозированием ртути в связанном состоянии — с использованием амальгам, оксида ртути и пр.

4. Создание ЛЛ с защитными полимерными покрытиями на малогабаритных компактных ЛЛ (КЛЛ) [2, 5] и безэлектродных ЛЛ, в которые можно дозировать достаточно малое количество ртути.

В связанном состоянии ртуть может вводиться в лампы в виде:

— порошка меркурида титана;
— твердых амальгам;
— оксида ртути.

Наиболее перспективно применение амальгамного метода. Во-первых, амальгама во время работы лампы способна выделять необходимое количество ртути (например, 0,076 мг в ЛЛ мощностью 40 Вт), а в выключенном состоянии практически полностью поглощать ее из объема лампы.

Во-вторых, утилизация амальгамных ЛЛ более надежна ввиду того, что ртуть находится в амальгаме.

В-третьих, данный метод введения ртути в ЛЛ предпочтителен в случае ламп, работающих в закрытых светильниках, обеспечивая необходимое

давление паров ртути в лампе, а следовательно, и максимальный световой поток. При работе же ЛЛ в открытых светильниках используют низкотемпературные амальгамы, которые не нарушают зависимости светового потока от температуры окружающей среды.

Существуют и недостатки, которые препятствуют широкому производству и применению амальгамных ЛЛ [3]:

— повышенное время разгорания (3...5 мин);

— малое значение светового потока в момент включения (30...40 % от установившегося значения);

— отсутствие термического обезгаживания компонентов амальгамы в процессе производства, что отрицательно сказывается на характеристиках ламп;

— изменение состава амальгам при прохождении в печи откачного полуавтомата, что влечет за собой разброс характеристик ламп;

— ненадежная конструкция дозаторов амальгамы, установленных на каждой позиции откачного полуавтомата.

Конструктивно амальгамные ЛЛ отличаются местом расположения и химическим составом амальгам [4, 5]. Характерное место расположения амальгам в ЛЛ — внутренняя поверхность колбы, удлиненная ножка и штенгель ламп.

Технологический процесс изготовления и сборки ЛЛ с амальгамой, расположенной в штенгеле, предпочтителен, так как удовлетворяет всем основным требованиям массового производства ламп без существенных изменений производственного цикла.

Однако такое расположение амальгамы предполагает ее дозировку на откачном автомате специальными дозаторами, в количестве, достаточном для работы полуавтомата в течение одной или даже двух смен. Дозировка проводится на том же месте обработки, где обычно дозируется ртуть, т.е. уже в остывающую лампу (250...300 °С), что требует жесткого соблюдения вакуумной гигиены при изготовлении и загрузке амальгам (она не прогревается до 400 °С).

Так же состав амальгамы может изменяться (обедняться ртутью) в течение смены (двух смен) за счет постоянной откачки из дозатора, который охлаждается, что не будет способствовать стабильности температурных характеристик ламп.

Для улучшения обезгаживания амальгамы, а также исключения дозаторов на всех позициях полуавтомата откачки предложено дозирование амальгамы в штенгель или в объем лампы до откачного автомата, что в перспективе позволит иметь только один дозатор перед откачным полуавтоматом.

Для исключения испарения ртути из амальгамы при прохождении лампы в печи откачного полуавтомата амальгаму помещают в контейнер, конструкция которого обеспечивает малое испарение ртути из амальгамы. Данная технология актуальна именно для низкотемпературных амальгамных ЛЛ.

На базе ООО "Научно-исследовательского института источников света НИИИС им. А.Н. Лодыгина" (г. Саранск) изготовлено и собрано 12 экспериментальных образцов ламп типа ЛБА20 с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия для определения температурных и временных зависимостей параметров ламп, исследования процесса стабилизации их характеристик и выявления возможности сокращения времени разгорания.

В качестве низкотемпературной амальгамы применяли амальгаму состава 70 % Pb + 30 % Hg, в качестве высокотемпературной — 43 % Cd + + 35 % Pb + 5,5 % Bi + 7 % Sn + 9,5 % Hg.

По конструкции экспериментальные лампы аналогичны лампам типа ЛБ20 за исключением наличия амальгамы вместо ртути.

Технология изготовления и сборки ламп отличалась от промышленной:

— откачку ламп проводили на откачном посту, снабженном дозатором, при этом для ЛЛ с низкотемпературной амальгамой амальгама дозировалась непосредственно в объем лампы, а для ЛЛ с высокотемпературной амальгамой в штенгель лампы перед откачкой помещали трубочку из стекла, препятствующую прохождению амальгамы в объем лампы (амальгама в штенгеле);

— амальгаму дозировали в лампу, прошедшую термовакуумную обработку и охлажденную до комнатной температуры.

Схема технологического процесса изготовления и сборки ЛЛ с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия представлена на рисунке.

Разработанная конструкция сборки амальгамных ЛЛ обеспечивает введение амальгамы в лампу в контейнерах, препятствующих испарению ртути из амальгамы во время прохождения

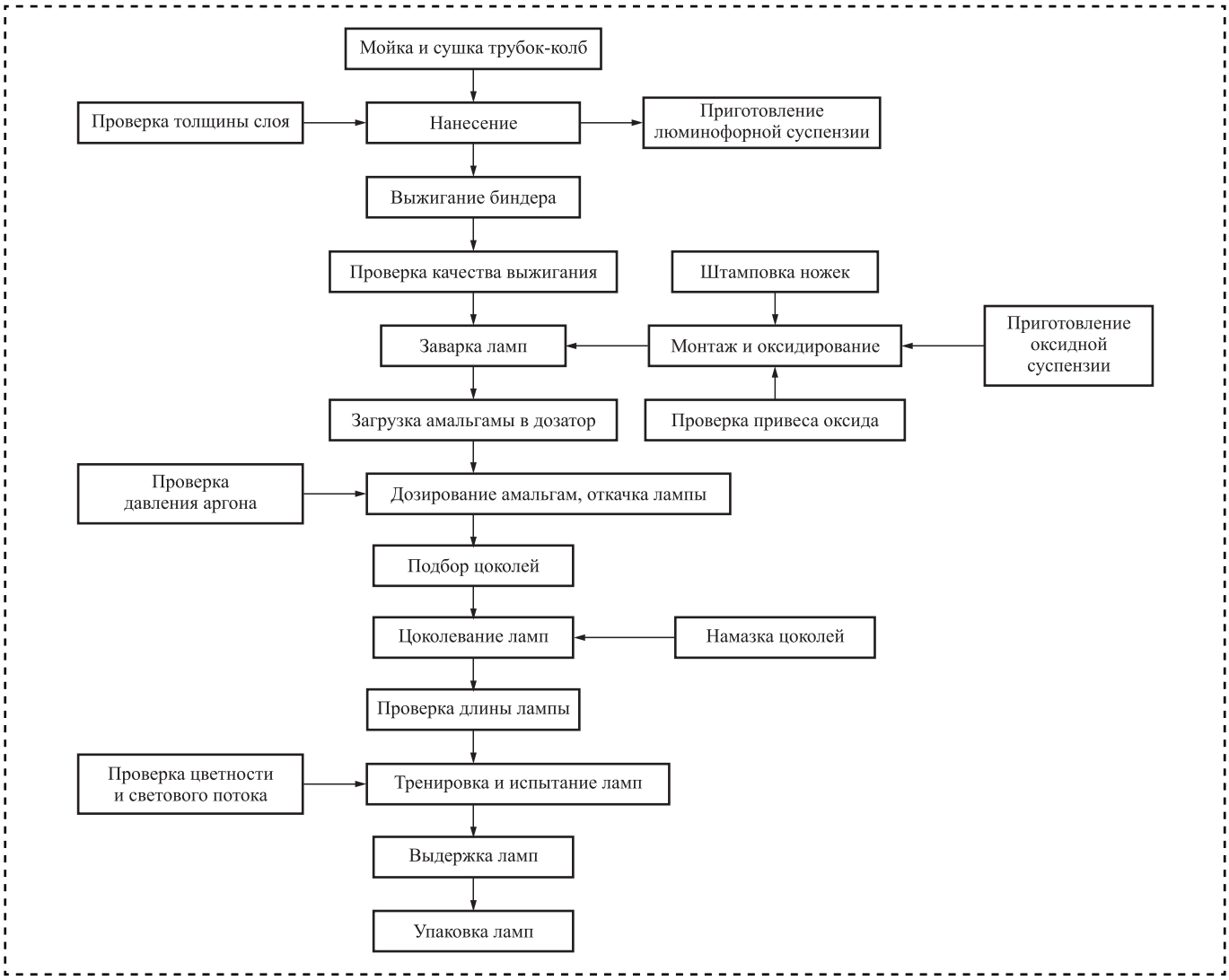

Схема технологического процесса изготовления и сборки амальгамной ЛЛ типа ЛБА20 с низкотемпературной амальгамой свинца и высокотемпературной амальгамой кадмия

ламп в печи откачного полуавтомата в ходе сборочных операций. С одной стороны, амальгама нагревается и обезгаживается, с другой — малое испарение из нее ртути способствует стабильности состава амальгамы и, как следствие, стабильности (минимальному разбросу) характеристик готовых ламп.

Усовершенствованная технология производства ЛЛ позволяет заменить дозаторы ртути на каждой позиции откачного полуавтомата одним дозатором амальгамы перед откачным полуавтоматом.

Предложенные конструкторско-технологические рекомендации по сборке могут быть использованы на предприятиях, производящих ЛЛ, при организации производства экологически безопасных энерго- и ресурсосберегающих ЛЛ.

Библиографический список

1. **Федоренко А.С., Абрамова Л.В.** О повышении экологичности разрядных ламп и светоизлучающих систем с их применением // Проблемы и перспективы развития отечественной светотехники: сб. науч. тр. Всерос. науч.-техн. конф. / под ред. Л.В. Абрамовой. Саранск: СВМО. 2002. С. 254—259.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С., Железникова О.Е.** Повышение качества компактных люминесцентных ламп // Стекло и керамика. 2015. № 10. С. 38—40.

3. **Охонская Е.В., Федоренко А.С.** Расчет и конструирование люминесцентных ламп: учебник. Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 1997. 184 с.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Металлокерамический припой для натриевых ламп высокого давления // Стекло и керамика. 2014. № 8. С. 35—36.

5. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Сборка амальгамных бактерицидных ламп низкого давления типа ДБ // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2015. № 10. С. 32—36.

УДК 629.42.597.3

В.Я. Берент, *д-р техн. наук (ВНИИЖТ),*
В.В. Берент *(НПО "ТрансКонтактИнжиниринг")*
E-mail: berent@transcoing.ru

Целесообразность использования металлокерамических тормозных колодок

Установлены преимущества служебных характеристик металлокерамических тормозных колодок железнодорожного транспорта перед чугунными, композиционными и полимерными колодками. Металлокерамические тормозные колодки повышают безопасность движения, так как обладают не изменяющимся с увеличением скорости движения коэффициентом трения, более коротким тормозным путем, высоким ресурсом работы, меньшей степенью повреждаемости поверхности катания колеса и шумом во время торможения. Исследованы структура и фазовый состав металлокерамических колодок зарубежных производителей и разработан состав порошкового материала отечественных металлокерамических колодок.

The advantages of sintered brake pads performance over cast iron and composite, polymeric pads were established. The sintered brake pads is to a greater extent tend to increase driving safety as they have, not changing with increasing speed, coefficient of friction, shorter braking distances, higher service life, less damage to the tread surface of the wheel, less noise during braking. Based on metallographic studies the structure and phase composition of sintered pads of manufacturers from abroad were found. Powder sintered material composition development of domestic manufacturers was performed.

Ключевые слова: металлокерамическая тормозная колодка, чугунная колодка, композиционная колодка, коэффициент трения, износ, ресурс работы, повреждаемость поверхности катания колеса, тормозной путь, металлографическая структура, порошковый материал.

Keywords: sintered brake pad, cast iron pad, composite pad, coefficient of friction, wear, life, damaging the tread surface of the wheel, braking distances, metallographic structure, powder material.

В настоящее время для торможения на тяговом подвижном составе железных дорог России применяют тормозные колодки из серого чугуна. Эти колодки в процессе взаимодействия с поверхностью скольжения колеса хорошо прирабатываются к ней, но имеют небольшой ресурс работы из-за низкой износостойкости. Они обладают низким коэффициентом трения, который уменьшается по мере увеличения скорости движения подвижного состава. В результате снижается безопасность движения железнодорожного транспорта из-за достаточно высоких величин тормозных путей.

Композиционные колодки из полимерных материалов по сроку службы превосходят чугунные, но имея более низкую теплопроводность, при торможении более интенсивно нагревают поверхность катания колеса, повреждая ее термическими трещинами. В зимний период эксплуатации они в значительной степени теряют свои служебные свойства.

Для пластичных металлов при сухом трении под нагрузкой характерно проявление схватывания — основной причины износа трущихся тел. В обычных условиях металлы и сплавы не могут использоваться в трибосистемах, работающих при высоких температурах, вызванных фрикционным нагревом [1]. В этом случае необходимо применить композиционные материалы, включающие в себя ряд компонентов, придающих им необходимые свойства. Компоненты в композите должны сохранять индивидуальные свойства, а следовательно, слабо взаимодействовать как в жидком, так и твердом состоянии с его матрицей.

Использование технологии порошковой металлургии позволяет создать композиты, соче-

тающие необходимые свойства для фрикционного материала. Для лучшего отвода тепловой энергии, выделяющейся в контакте при торможении, композит выполняют на металлической основе.

Учитывая, что фрикционное изделие при торможении прижимается к скользящему контртелу, одно из главных требований к его материалу — устранение схватывания и повреждения скользящих поверхностей задирами, которое обеспечивается введением в состав материала веществ, являющихся твердой смазкой.

Придание материалу свойств, обеспечивающих при скольжении трущихся тел достаточно высокий и не изменяющийся коэффициент трения, достигается вводом в состав материала фрикционных компонентов, обладающих высокой твердостью, прочностью и термостойкостью. В результате создается многофазный с гетерогенной структурой композит, устраняющий протекание лавинообразного схватывания трущихся тел.

Зарубежные производители тормозных колодок для повышения качества и работоспособности тормозной системы железнодорожного транспорта разрабатывают и изготавливают металлокерамические тормозные колодки с использованием технологии порошковой металлургии.

Для выявления преимуществ металлокерамических тормозных колодок зарубежных производителей проведены стендовые и эксплуатационные испытания с натурными секционными безгребневыми локомотивными колодками длиной 250, толщиной 60 и шириной 80 мм и колесом диаметром 950 мм при различных скоростях его вращения и силах прижатия их к колесу. Испытания проводили в соответствии с типовой методикой ТМ № 02-001-91 и положениями Международного (Европейского) союза железных дорог UIC.

Одновременно испытывали две тормозные колодки с нажатием на них 10, 20 и 30 кН. На стенде имитировали нагрузку на ось 146,5 и 245 кН, что соответствует полностью заполненному пассажирами вагону и локомотиву. Согласно методике испытаний осуществляли полные остановочные торможения без подачи воды в трибосистему с начальных скоростей 50, 90, 140, 160, 200, 230 и 250 км/ч и подачей 500 мл/мин воды в узел трения с начальных скоростей 50 и 90 км/ч.

Исследованиям на инерционном стенде подвергали металлокерамические тормозные колодки производства Германии, Франции и Чехии, а также из серого чугуна с оценкой их коэффициентов трения, износа, термостойкости, повреждаемости поверхности катания колеса, силы шума при торможении, возгорания, задымления и выделения из колодок каких-либо компонентов.

Испытания тормозных металлокерамических колодок марки С952 производства Германии показали свое преимущество перед чугунными колодками по постоянству коэффициента трения с повышением скорости движения (рис. 1). Если у чугунных колодок при скоростях движения 50, 90, 140 и 160 км/ч и прижатии с силой 20 кН коэффициент трения 0,13; 0,084; 0,072; 0,069 (рис. 2), то у металлокерамических колодок он соответственно 0,15; 0,18; 0,16; 0,09. Износ металлокерамических колодок при силе нажатия 20 кН при одном и том же цикле торможения составляет 50 г, чугунных колодок — 1000 г, а тормозной путь соответственно при начальной скорости 160 км/ч — 921 и 1532 м. Во время торможения температура колодок поднималась до 412 °С. При испытаниях поверхность катания колеса в отличие от чугунных колодок не повреждается выщербинами, кольцевыми выработками, наварами, ползунами, термическими трещинами.

Металлокерамические тормозные колодки марки С 30-2753 производства Франции испытывали по той же методике (рис. 3). Коэффициент трения отличается высокой стабильностью. Даже при скорости 140 км/ч и силе прижатия 20 кН он имеет значение 0,25, а у чугунных колодок 0,072. При такой же начальной скорости и силе прижатия тормозной путь — 911 м. Износ металлокерамических колодок при одном и том же цикле торможений составил 200 г, чугунных колодок 1000 г. Максимальная температура материала колодки на расстоянии 20 мм от фрикционного контакта с колесом достигала 431 °С при торможении с начальной скоростью 140 км/ч и нажатии на колодку 30 кН. Характер состояния поверхности катания колеса в отличие от чугунных колодок такой же, как у немецких колодок.

Характеристики металлокерамических колодок компании "Диафрикт" (Чехия) представлены на рис. 4. Значения коэффициентов трения при увеличении скорости движения снижаются в среднем с 0,4 до 0,28. Повышение силы прижатия колодок к колесу приводит к снижению коэффициента трения и увеличению их износа. При нагрузке на колодку 20 кН и одном и том же цикле торможения с первоначальной скорости износ металлокерамической колодки соста-

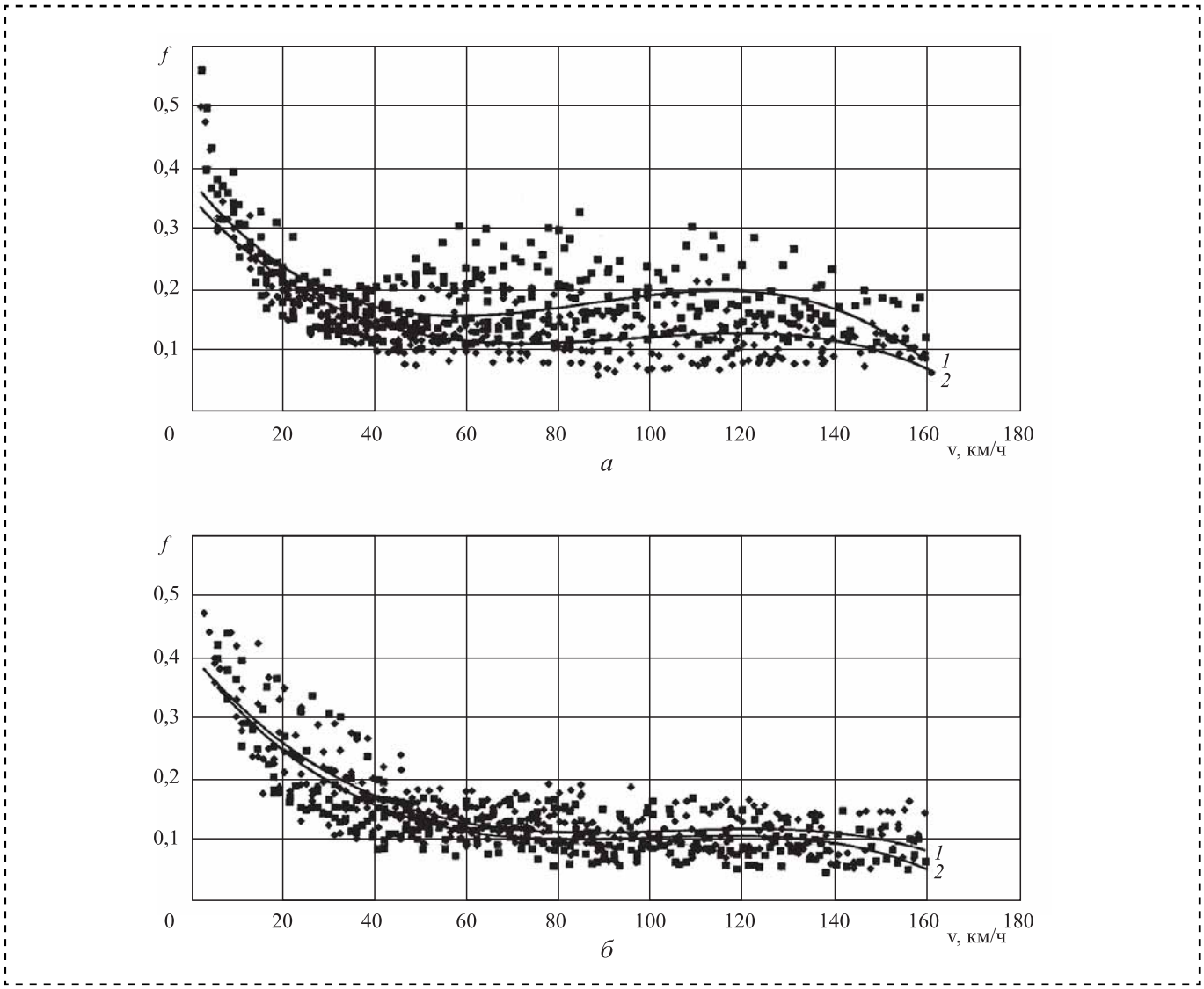

Рис. 1. Изменение в режиме сухого трения коэффициентов трения у металлокерамических колодок производства Германии с увеличением скорости движения с инерционной нагрузкой на ось 245 кН, силой нажатия 20 (*1*) и 30 кН (*2*) (*а*); при тех же условиях, но с подачей воды с расходом 500 мл/мин (*б*)

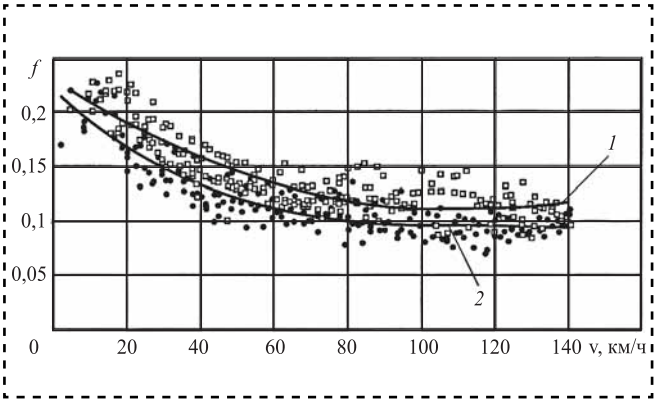

Рис. 2. Изменение в режиме сухого трения коэффициентов трения у чугунных колодок для локомотивов с увеличением скорости движения с инерционной нагрузкой на ось 245 кН, силой нажатия на колодку 30 (*1*) и 20 кН (*2*)

вил 195 г, а чугунной — 1000 г. Повреждаемость поверхности катания колеса аналогична как при использовании металлокерамических колодок Германии и Франции.

Более 500 тормозных металлокерамических колодок чешского производства проходили эксплуатационные испытания на 10 электровозах ЧС2т, курсирующих между Москвой и Санкт-Петербургом в течение 2 лет. Установлено, что ресурс работы металлокерамических колодок превосходит этот показатель у чугунных колодок в 6—10 раз и в 3 раза — у композиционных колодок на основе полимеров. Средний пробег чугунной колодки до полного износа составил 23,4 тыс. км, а металлокерамических — 240,3 тыс. км. В эксплуатации на электровозе

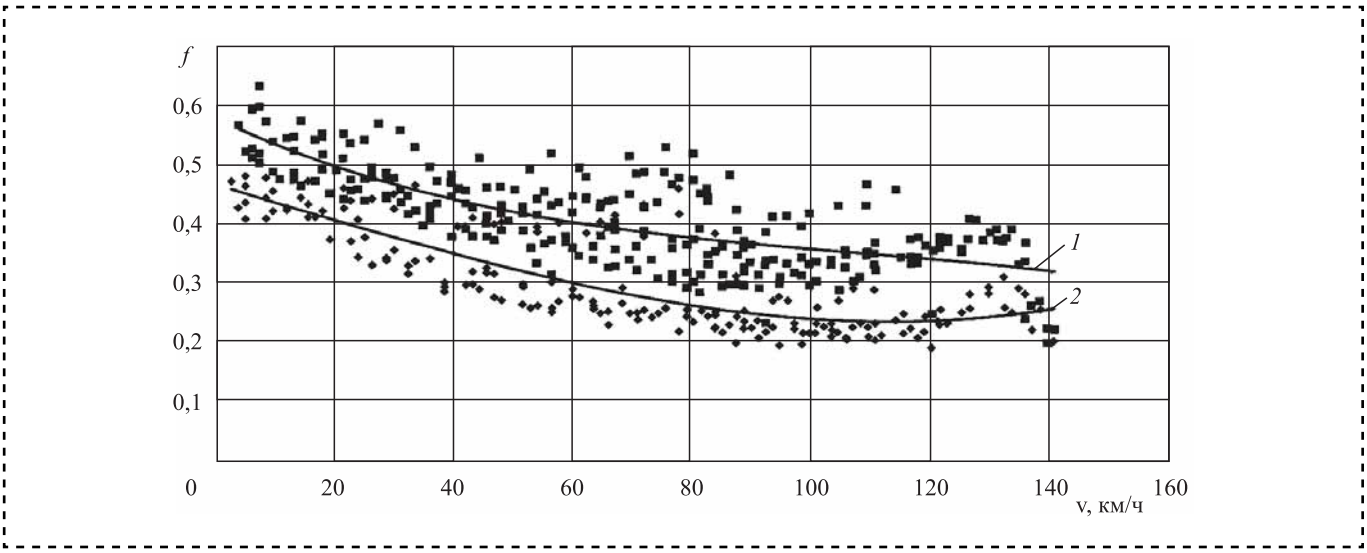

Рис. 3. Изменение в режиме сухого трения коэффициентов трения у металлокерамических колодок производства Франции с увеличением скорости движения с инерционной нагрузкой на ось 245 кН, силой нажатия на колодку 10 (*1*) и 20 кН (*2*)

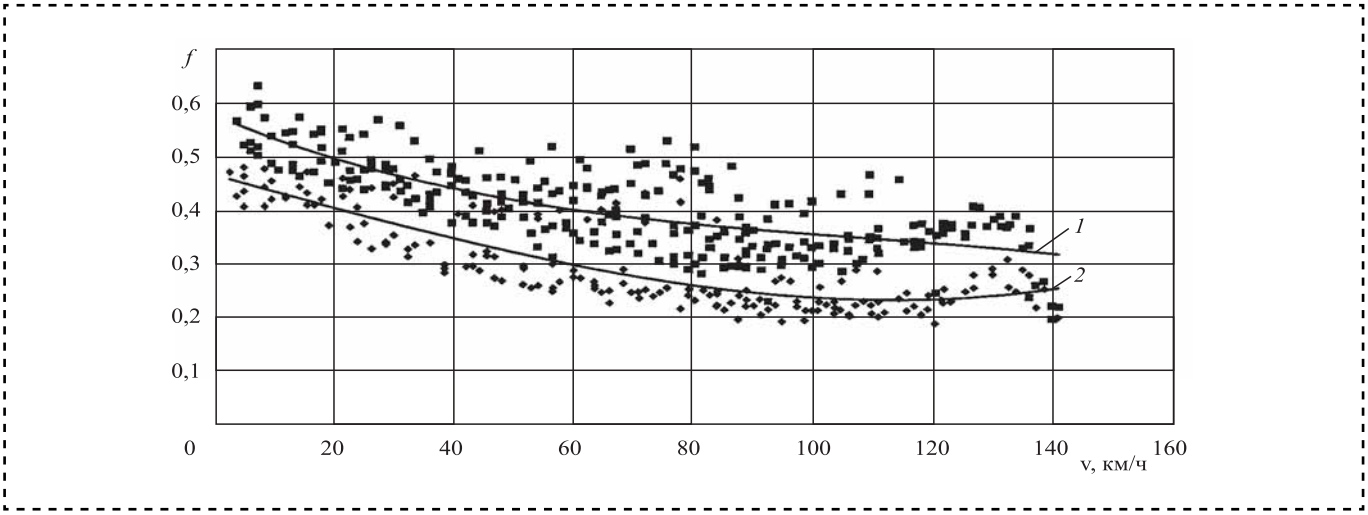

Рис. 4. Изменение в режиме сухого трения коэффициентов трения у металлокерамических колодок производства Чехии с увеличением скорости движения с инерционной нагрузкой на ось 245 кН, силой нажатия на колодку 10 (*1*) и 20 кН (*2*)

ЧС2т-989 проведены определения величин тормозных путей при полном служебном торможении поездным краном машиниста и краном вспомогательного тормоза. В случае давления в тормозном цилиндре 0,18 МПа при начальных скоростях движения 81, 100, 120 км/ч тормозной путь составил 400, 605 и 900 м, в то время как при скорости 100 км/ч у чугунных колодок — 750 м. Поверхность катания колес в меньшей степени повреждается ползунами, термотрещинами, выщербинами, кольцевыми выработками, наварами, что позволяет сократить число обточек колес для их устранения. Технико-экономический расчет показал, что даже при большем износе колес в 1,2 раза и большей стоимости металлокерамических колодок, чем чугунных, в 9 раз, их выгоднее применять более чем в 3 раза.

Проведенные стендовые и эксплуатационные испытания показали преимущества металлокерамических колодок перед чугунными [2—9]. Для разработки отечественных металлокерамических колодок с учетом недостатков зарубежных колодок исследовали их составы и структуры.

Металлографические исследования структуры металлокерамических колодок проводили, используя материалы натурных тормозных колодок, на сканирующем электронном микро-

скопе JSM—35CF с четырехкристальным волновым спектрометром. Химический состав фаз гетерогенных материалов определяли в режиме микрорентгеноспектрального анализа. Изображение в характеристическом излучении в виде плотности отдельных импульсов позволило установить преимущественный химический состав отдельных фаз в структуре композиционных материалов колодок.

Исследованиями микроструктуры металлокерамических колодок производства Германии установлено, что основу их порошкового материала составляет железо, содержащее дисперсные частицы серого цвета. Анализ частиц установил, что этого оксиды железа (рис. 5). В железной матрице колодки размещаются крупные включения желтого и темно-серого цветов. Первые из них по своему составу представляют медь, а вторые — графит. Включения графита одного вида коагулированы и имеют сферическую форму, а другие частицы не имеют определенной геометрической формы. Содержание графита, как твердой смазки, составило менее 30 %. В медных включениях обнаружено до 3 % железа и до 0,6 % хрома, что, очевидно, связано с диффузией из железной матрицы колодки и из фрикционных включений с прямоугольными границами практически белого цвета, содержащих 75 % хрома, 14 % железа и углерода в значительном количестве.

Анализ микроструктуры французских тормозных колодок на установке SPEKTROLAB показал, что они изготовлены на медной основе: 81,5 % меди, 5 % свинца, 6 % цинка, 0,8 % кадмия, 9,17 % серы, остальное — углерод.

Матрица материала колодки окрашена в цвет меди, имеет неоднородную поверхность с многочисленными мелкими включениями и содержит крупные включения с округлыми границами чистой меди (рис. 6) с микротвердостью 55,8 кгс/мм^2 (547 МПа), при микротвердости основы материала 58,8 кгс/мм^2 (577 МПа). Более высокая твердость матрицы колодки связана с содержанием в меди до 3,3 % цинка.

Практически 30...35 % анализируемой поверхности шлифа порошкового материала занимают включения серого цвета с волокнистой структурой, представляющие графит. Крупные включения темно-серого цвета с гладкой поверхностью и с микротвердостью 487 кгс/мм^2 (4,78 ГПа) представляют собой частицы SiO_2 (рис. 7).

Кроме твердой смазки в виде графита в порошковом материале колодки, очевидно, присутствуют сульфиды цинка, меди и свинца, так как во включениях светло-серого цвета с хаотичной структурой содержится 12,5 % Cu, 22,1 % Zn, 41 % Pb и 24,4 % S. Некоторые включения в структуре композита колодки состоят из свинца.

Матрица материала в основном состоит из меди, в которой распределены включения голубого цвета (железо) и серые частицы металлоида с волокнистой структурой (углерод—графит, как твердая смазка в материале колодки). Графитовые включения на поверхности анализируемого металлографического шлифа занимают около 30...40 % его поверхности. Кроме того, в структуре материала тормозной колодки встречаются пустоты в виде раковин и включения темно-серого цвета с гладкой бесструктурной поверхностью. Пористость порошкового материала 30...40 %, что снижает износостойкость колодки, так как продукты износа в основном образуются в результате появления усталостных трещин у пустот, являющихся концентраторами напряжений.

Химический анализ отдельных фаз в структуре колодки и ее матрицы установил, что бесструктурные темно-серые включения представляют собой оксид алюминия Al_2O_3, а медная матрица содержит до 4 % олова. При увеличении ×500 в медной матрице выявляются прожилки серого цвета по границам медных частиц, состоящие из оксидов железа.

При разработке составов отечественных металлокерамических колодок необходимо предусмотреть использование в качестве твердой смазки графита и сульфидов металлов. Для повышения многофазности структуры следует в медную матрицу материала вводить железный порошок. Предпочтительно в качестве фрикционных компонентов использовать Al_2O_3, SiO_2 и карбиды хрома и железа, а при формировании матрицы колодок на основе меди — медные легированные порошки. Для снижения пористости порошкового материала колодки требуется повысить его плотность путем изменения технологии ее изготовления.

По результатам исследований различных фрикционных материалов определены опытные составы порошковых материалов как на железной, так и на медной основе для тормозных колодок. Медную матрицу порошкового материала создавали из легированного медного порошка карбидообразующими элементами. Такие же порошки вводили и в железную матрицу порошкового материала. Легирование меди позволяет повысить прочность и термостойкость колодки, так как при приготовлении таких порошков

распылением в воду из-за неравновесной кристаллизации в микрослитках образуются пересыщенные твердые растворы с подавлением выделений легирующих элементов. Об этом свидетельствуют данные рентгеноструктурного анализа. Размеры решетки твердого раствора порошка медного сплава (a = 0,3618 нм) больше, чем у чистой меди (a = 0,3612 нм). Микротвердость порошков и горячих прессовок легированной матрицы материалов — 91, 98, 99 HV, а отожженной чистой меди — 80 HV.

В качестве фрикционных компонентов в порошковые матрицы материалов вводили Al_2O_3, SiO_2, SiC, B_4C, асбест прокаленный. Количество твердой смазки в виде графита, сульфидов железа, меди, цинка для предотвращения процесса схватывания определяли на испытательной машине трения МИ по схеме колодка—ролик в режиме сухого трения с обезжириванием образцов. Давление на колодку из порошкового материала 0,7 МПа, а при ужесточении условий испытаний — до 1,4 МПа. Ролик из бандажной стали по ГОСТ 398—2010 с твердостью 270 НВ полировали. Весовой износ колодки и ролика определяли с точностью до 0,0001 г. Ошибка опыта при экспериментах составляла ± 0,007 г. Испытания проводили в 5—7 циклов с прохождением пути 2,5 км, после каждого из которых определяли износ. Общий пробег образцов — не менее 12,5 км. Частота циклов позволяла оценить стабильность износа, а запись изменений момента трения во время испытаний — выявить процессы, протекающие при трении скольжения, и определить коэффициенты трения.

После испытаний оценивали характер повреждений поверхностей трения. При отсутствии задиров от схватывания на поверхностях трения момент трения отличался высокой стабильностью.

Установлено, что массовая доля твердой смазки в виде графита должна быть не менее 8 %, чтобы предотвратить схватывание материалов пар трения.

В результате проведения сравнительных испытаний материалов металлокерамических тормозных колодок производства Германии и Чехии, чугунных колодок и 10 опытных порошковых материалов были выбраны 2 состава на железной и медной основе, которые по своим свойствам не уступали зарубежным аналогам и серому чугуну (рис. 8). Для повышения плотности этих материалов предусмотрена операция горячего динамического прессования.

Выводы

1. Применение металлокерамических колодок вместо чугунных повышает безопасность движения на железнодорожном транспорте.

2. Металлокерамические тормозные колодки обладают стабильным коэффициентом трения, не изменяющимся с изменением скорости движения.

3. Фрикционные свойства материала металлокерамических колодок позволяют уменьшить тормозной путь по сравнению с чугунными колодками.

4. Из-за более высокой износостойкости порошкового материала металлокерамических колодок, чем серого чугуна, их ресурс работы намного выше.

5. Повреждаемость поверхности катания колес ниже при взаимодействии с металлокерамическими колодками, чем с чугунными, что позволяет уменьшить число обточек колес.

6. Металлокерамические колодки воспроизводят меньше шума при торможении, чем чугунные.

Библиографический список

1. **Семенов А.П.** О явлении сверхнизкого трения твердых тел // Трение и износ. 2005. Т. 26. № 1. С. 15—20.

2. **Вуколов Л.А., Сапожников С.А., Берент В.Я.** Металлокерамические тормозные колодки для тягового подвижного состава // Вестник ВНИИЖТ. 2009. № 5. С. 13—16.

3. **Фрикционные** материалы тормозов // Железные дороги мира. 2003. № 7. С. 43—47.

4. **Вуколов Л.А., Жаров В.А.** Сравнительные фрикционные характеристики металлокерамических и полимерных композиционных тормозных колодок // Вестник ВНИИЖТ. 1999. № 4. С. 19—24.

5. **Вуколов Л.А.** Композиционные и металлокерамические тормозные колодки для железнодорожного подвижного состава // Тяжелое машиностроение. 2001. № 4. С. 12—14.

6. **Вуколов Л.А., Жаров В.А.** Современные тормозные колодки для железнодорожного подвижного состава // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 3. С. 3—10.

7. **Шакина А.В., Фадеев В.С., Штанов О.В.** Вагонные тормозные колодки повышенной износостойкости // Техника железных дорог. 2014. № 4. С. 66—70.

8. **Металлокерамические** тормозные колодки с пониженным уровнем шума // Железные дороги мира. 2008. № 5. С. 43—49.

9. **Применение** малошумных тормозных накладок из композита и металлокерамики // Железные дороги мира. 2008. № 9. С. 67—69.

УДК 621.891

А.Н. Болотов, Г.Б. Бурдо, *д-ра техн. наук,* **В.В. Новиков, О.О. Новикова,** *канд-ты техн. наук*
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: onvk@mail.ru

Технологические методы повышения смазочного действия нанодисперсных магнитных масел

Предложено и обосновано применение технологических методов повышения смазочных свойств нанодисперсных магнитных масел. Показано, что включение в технологический процесс получения магнитных масел дополнительных операций, направленных на удаление из их состава избыточного ПАВ-стабилизатора и крупных магнитных агломератов, позволяет на десятки процентов снизить трение и износ смазанных ими поверхностей. Экспериментально обоснована необходимость модифицирования поверхностей трения магнитожидкостных узлов с помощью МДО-технологии для защиты их от абразивного износа.

The application of technological methods increasing the lubricant action of nanodispersed magnetic oils has been proposed and profed. It was shown that inclusion in the technological process of producing magnetic oils of the additional operations to remove from the structure the excess surfactant — stabilizer and large magnetic agglomerates allows to reduce friction and deterioration of the surfaces greased with them by tens of percent. The necessity of modifying friction surfaces of magneto-liquid tribounits with MAO-technology for protection them from abrasive deterioration has been experimentally proved.

Ключевые слова: магнитное смазочное масло, трение, износ, стабилизатор, дисперсные частицы, микродуговое оксидирование.

Keywords: magnetic lubricating oil, friction, wear, stabilizer, dispersed particles, microarc oxidation.

В последнее время широкое внимание исследователей привлекает проблема применения нанотехнологий для повышения надежности узлов трения различных машин и механизмов. Некоторые нанодисперсные магнитные жидкости — магнитные смазочные масла — можно использовать для смазывания трибоузлов, работающих при гидродинамическом и граничном режимах трения [Орлов Д.В., Михалев Ю.О., Мышкин Н.К. Магнитные жидкости в машиностроении. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.], [1, 2]. Основное достоинство магнитного масла перед традиционным маслом — поступление в зону контактирования трущихся поверхностей по мере необходимости под действием стационарных термомагнитных полей. Для этого не требуется существенно усложнять конструкцию трибоузла и использовать различные дополнительные устройства для управления движением масла, так как восстановление смазочного слоя происходит самопроизвольно. Однако результаты триботехнических испытаний магнитных масел для смазки показали, что их антифрикционные и противоизносные свойства не всегда достаточно высоки.

Один из наиболее эффективных методов повышения антифрикционных и противоизносных свойств магнитных масел — введение в состав масла дополнительных присадок и наполнителей, не ухудшающих его коллоидную стабильность [1].

Цель работы — повысить смазочное действие магнитных нанодисперсных масел, используя для этого технологические методы.

Большой потенциал аналогичного подхода к повышению надежности и долговечности узлов трения показан в работах многих исследователей, например, в работах профессора Д.Н. Гаркунова [3]. При этом авторы акцентируют внимание на том, что выбор элементов трибоузлов для их технологического совершенствования должен быть основан на системном подходе. В данном контексте становится понятно, что использование термина "смазочное действие" подчеркивает технологическую зависимость свойств магнитожидкостных трибоузлов не только от

характеристик магнитного смазочного материала, но и в значительной мере от материалов трения, топографии поверхностей, источников магнитного поля и т.д.

Проведенный анализ результатов испытаний магнитных масел, полученных по одинаковой технологической схеме, но выбранных из разных опытных партий, показал недопустимо большой разброс по смазочным и реологическим свойствам. Например, коэффициенты трения для поверхностей, смазанных магнитными маслами на основе диэфира карбоновой кислоты и взятых из различных партий, могли отличаться на 20...30 %, а разброс интенсивностей износа доходил до 50...100 %. Установлено, что трибосвойства очень чувствительны к избыточному содержанию в дисперсионной среде масла ПАВ-стабилизатора коллоидной структуры, который активирует негативные процессы коррозионно-механического изнашивания трущихся поверхностей, особенно выполненных из металлических сплавов.

В магнитном масле даже после очень тщательной пептизации всегда содержатся прочные агломераты из монодоменных магнитных частиц размером до 10^{-6} м. Твердость типичных дисперсных частиц из магнетита превышает 5 ГПа и существенно превосходит твердость многих антифрикционных немагнитных сплавов и тем более полимеров. Агломераты из дисперсных частиц сильно увеличивают общий износ трибоповерхностей из-за абразивного воздействия.

Первая задача исследований — включить в технологический процесс получения магнитных масел дополнительные операции, направленные на удаление из масла неадсорбированного стабилизатора и отделения крупных магнитных агломератов и оценить, к каким изменениям смазочных и других свойств масел это приведет.

В процессе граничного трения поверхностей, смазанных магнитным маслом, нельзя исключить образование в нем новых стимулирующих абразивный износ агломератов под действием магнитостатических сил и в результате механического разрушения сольватных оболочек магнитных частиц. В магнитожидкостных трибоузлах, как правило, один элемент пары трения должен быть изготовлен из магнитного материала, а другой — из слабомагнитного недефицитного конструкционного материала (алюминиевый сплав, бронза, латунь), твердость которого заведомо ниже твердости магнетита. Поэтому если в качестве магнитного материала пары трения использовать стойкую к абразивному износу сталь, то сопряженную поверхность нужно технологически защитить от износа твердым антифрикционным покрытием. После детального анализа различных технологий нанесения покрытий выбрана технология микродугового оксидирования (МДО-технология) поверхностей из алюминиевых сплавов [4]. Основное достоинство МДО-технологии, применительно к магнитожидкостным трибоузлам, заключается в том, что она позволяет получать качественные корундовые покрытия на деталях со сложной геометрией поверхности.

Вторая задача исследований — экспериментальное обоснование целесообразности применения микродуговой технологии нанесения защитного покрытия на поверхности трения магнитожидкостных трибоузлов.

Объект исследований и экспериментальное оборудование

Для исследований выбрано магнитное смазочное масло, синтезированное на основе диоктилсебацината. Применение диэфира карбоновой кислоты в качестве дисперсионной среды объясняется его хорошими смазочными свойствами, низкой испаряемостью и вязкостью, широким температурным диапазоном работоспособности. Синтез магнитного масла проводили по традиционной технологии [5], включающей осаждение магнетита (дисперсная фаза) из раствора солей железа, обезвоживание ацетоном дисперсной фазы и обработку магнетита раствором жирной кислоты в диоктилсебацинате при повышенной температуре.

Для удаления избыточного ПАВ-стабилизатора растворенного в дисперсионной среде магнитного масла применяли метод замены дисперсионной среды, предложенный Р.Е. Розенцвейгом [5]. С помощью полярного флокулирующего агента проводили обратимую флокуляцию дисперсной фазы, затем удаляли жидкую фазу, содержащую смесь первоначальной дисперсионной среды и агента. Одновременно удаляли избыток поверхностно активного вещества. Структура сольватных оболочек дисперсных частиц при этом не нарушалась. Затем стабилизированные частицы пептизировали в диоктилсебацинате без примесей.

Для удаления из магнитной жидкости крупных магнитных агрегатов применяли магнитную сепарацию. Для этого кювету с магнитным маслом помещали в неоднородное магнитное поле и выдерживали 1...2 ч в зависимости от высоты слоя масла и его вязкости. Под действием маг-

нитостатических сил происходило больцмановское перераспределение мелких магнитных частиц, а крупные агломераты оседали необратимо на дно кюветы. Для создания неоднородного магнитного поля использовали разомкнутую магнитную систему с конусообразным зазором, в который помещали кювету. Магнитное поле создавали с помощью постоянных магнитов из сплава $SmCo_5$, градиент магнитного поля по высоте кюветы изменялся от 0,5 до 3 А/м^2.

Смазочные свойства магнитных масел исследовали на трехшариковой машине трения МТШ. Для удержания магнитного масла на дорожке трения в оправку между шарами вставлены цилиндрические магниты, обращенные полярной поверхностью к плоскости контробразца. Магнитное масло собиралось и удерживалось неоднородным полем около полюса магнита. При вращении шаров масло увлекалось магнитом и намазывалось на дорожку трения. Момент трения фиксировали непрерывно, износ определяли дискретно по диаметру пятна износа на поверхности шаров. Для экспериментов выбрали шаровые образцы диаметром 8 мм из стали ШХ15. Поверхность трения цилиндрического контробразца из стали 40Х полировали до получения параметра шероховатости Ra = 0,25...0,35 мкм. Испытания проводили при скорости скольжения 0,24 м/с и начальном давлении на контакте 1,25 ГПа.

Для получения покрытий на деталях магнитожидкостных трибоузлов из алюминиевых сплавов применяли стандартную МДО-технологию [4]. В процессе формирования оксидного покрытия на его поверхности образуется рыхлый технологический слой, состоящий из силикатов, который удаляли шлифованием. Покрытия имели толщину около 100 мкм и обладали возрастающей по глубине микротвердостью: внешний стеклообразный слой около 5 ГПа; слой на границе с алюминием 12...20 ГПа. Для экспериментов выбрали сплав Д16, оксидные покрытия на котором имеют высокую твердость, прочность и хорошую адгезию к основе (около $4 \cdot 10^8$ Н/м^2) из-за образования сильных химических связей. Пористость керамического слоя не превышала 15 %, усредненный размер пор составлял 10...30 мкм, при снижении пористости размер пор увеличивался.

Триботехнические свойства покрытий, полученных по МДО-технологии, изучали на установке [1], моделирующей работу радиального магнитожидкостного подшипника скольжения, работающего при граничной смазке магнитным маслом. Вал изготовили из закаленной магнитной стали У8А с микротвердостью поверхности около 7...8 ГПа. На внутренних поверхностях опытных образцов втулок покрытие формировали методом микродугового оксидирования с помощью осевого катода.

Вязкость магнитных масел определяли на ротационном вискозиметре без наложения магнитного поля.

Результаты экспериментов и их обсуждение

В табл. 1 представлены основные экспериментальные результаты по влиянию дополнительных технологических операций на свойства магнитного масла. Показаны смазочные свойства исходного магнитного масла и масла, из которого удалены неадсорбированные на дисперсных частицах молекулы ПАВ-стабилизатора и крупные магнитные агрегаты. Численные значения отражают влияние на трение и изнашивание ПАВ-стабилизатора и абразивных агломератов, содержащихся в избытке в дисперсионной среде магнитного масла.

Все виды дополнительной технологической обработки магнитного масла привели к положительному результату — характеристики трения и изнашивания существенно снизились. Одновременно наблюдается снижение вязкости масел за счет уменьшения концентрации магнитной фазы и свободного ПАВ. Все это положительно

Таблица 1

Смазочные свойства исходного и модифицированных магнитных масел

Магнитное масло	Намагниченность насыщения, кА/м	Вязкость, Па·с	Коэффициент трения	Диаметр пятна износа, мм
Исходное	31	0,13	0,25	0,68
После магнитной сепарации	26	0,08	0,20	0,42
После замены дисперсионной среды	29	0,09	0,19	0,43
После комбинированной обработки	27	0,08	0,17	0,38

Таблица 2

Триботехнические характеристики подшипников с различными материалами пары трения

Материалы трения	Условия трения		Фрикционные свойства	
	Давление на контакте, МПа	Скорость скольжения, м/с	Коэффициент трения	Интенсивность изнашивания, 10^{-9}
У8А — БрАЖ9-4	1	0,6	0,11	0,9
	3	1,1	0,11	3,1
	5	1,5	0,12	4,2
У8А — ЛЖМц 59-1-1	1	0,6	0,12	1,2
	3	1,1	0,13	3,9
	5	1,5	0,13	5,6
У8А − 12Х18Н9Т	1	0,6	0,1	0,8
	3	1,1	0,15	1,7
	5	1,5	0,13	3,4
У8А — корунд	1	0,6	0,07	0,05
	3	1,1	0,09	0,18
	5	1,5	0,09	0,25
У8А — полиамид	1	0,6	0,05	1,4

скажется на работоспособности магнитожидкостных трибоузлов, особенно работающих при высоких скоростях скольжения [1]. Небольшое снижение намагниченности магнитных масел после дополнительных технологических операций существенно не сказывается на работе трибоузлов.

Таким образом, не совсем стандартные технологические операции позволили значительно улучшить смазочные свойства магнитного масла. Коэффициент трения смазанных магнитным маслом поверхностей понизился примерно на 35 %, износ — почти на 45 % после удаления из их состава свободного ПАВ-стабилизатора и крупных агломератов. Скорость изнашивания значительно снижается в результате уменьшения коррозионно-механической и абразивной активности масла по отношению к трибоповерхностям [1]. Сила трения снижается в основном из-за уменьшения неупругих деформационных процессов на поверхности контактирующих материалов.

Экспериментальные данные по трибосвойствам пары трения сталь — МДО-покрытие приведены в табл. 2, в которой для примера указаны аналогичные свойства подшипников, втулки которых изготовлены из традиционных немагнитных материалов.

Пара трения сталь — МДО-покрытие имеет существенно более высокие трибосвойства при различных нагрузочно-скоростных условиях трения. При невысоких нагрузках пара трения сталь—полиамид, смазанная магнитным маслом, имеет ожидаемо низкое трение, но плохую износостойкость. Это связано не только со слабой абразивной стойкостью полимерного материала, но и с интенсивным износом материала вала шаржированными в полимер частицами магнетита. Наиболее перспективно немагнитные элементы трибосопряжений изготавливать из сплава алюминия

и на поверхность наносить твердое керамическое покрытие методом микродугового оксидирования.

Все изученные технологические приемы модификации магнитного масла и материалов трения приводят к значительному повышению смазочного действия магнитных масел в магнитожидкостных трибоузлах.

Использование рассмотренных технологических приемов, направленных, например, на улучшение состава и структуры магнитного масла, сопровождается увеличением стоимости магнитных масел и также усложняет аппаратное оформление технологической линии производства магнитных масел и поэтому их применение в основном целесообразно для масел, предназначенных для смазки ответственных узлов, работающих при граничном режиме трения.

Библиографический список

1. **Болотов А.Н., Хренов В.Л.** Триботехника магнитопассивных опор скольжения // Тверь: ТГТУ, 2008. 124 с.

2. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Исследование триботехнических свойств пьезомагнитожидкостных подшипников // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2010. № 10. С. 23—29.

3. **Гаркунов Д.Н.** Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатация машин): учебник. М.: Издательство МСХА, 2002. 632 с.

4. **Болотов А.Н., Новиков В.В., Новикова О.О.** Применение микродугового оксидирования для получения керамического алмазосодержащего материала // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 3. С. 13—16.

5. **Байбуртский Ф.С.** Магнитные жидкости: способы получения и области применения [Электронный ресурс]. URL: http://magneticliquid.narod.ru/autority/008.htm (дата обращения: 30.05.2012).

Читайте в следующем номере:

Демичев С.Ф., Вашуков Ю.А., Наумов Л.А., Рясный А.В. Совершенствование процесса изготовления неразъемных узлов из разнородных материалов

Можегова Ю.Н., Марихов И.Н. Точность автоматизированного неразрушающего контроля пористости материалов

Колесников В.И., Бардушкин В.В., Колесников И.В., Мясников Ф.В., Сычев А.П., Яковлев В.Б. Прогнозирование эксплуатационных упругих свойств трибокомпозитов с микрокапсулами, заполненными жидкой смазкой

Булгаревич С.Б., Бойко М.В. Активация и дезактивация трением физико-химических процессов в зоне фрикционного контакта

Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г., Шустер Л.Ш. Влияние состояния модификатора на триботехнические характеристики пластичной смазки в различных температурно-силовых условиях трения

Русин Н.М., Скоренцев А.Л., Власов И.В. Формирование слоя переноса при сухом трении сплава Al—Sn по стали

Эрлих Б.М. Перевод гармонических колебаний в состояние покоя

Щелкунов Е.Б., Виноградов С.В., Пронин А.И., Щелкунова М.Е. Применение шаблонов вычислений при проектировании механизмов параллельной структуры

УДК 621.778.016.3.004.18

Г.Н. Гурьянов, *канд. техн. наук*
(ООО "ФЕНИКС+", г. Белорецк, Республика Башкортостан)
E-mail: ggnbelorhome@ rambler.ru

Оценка качества технологической смазки для волочения круглого сплошного профиля

Предложены формулы для расчета коэффициента трения по величине напряжения волочения при разных моделях упрочнения. Выполнены расчеты коэффициента трения при разных параметрах деформации и моделях упрочнения. Величина коэффициента трения отличается при равном среднем пределе текучести в очаге деформации и разных кривых упрочнения материала круглого сплошного профиля. Форма кривых упрочнения влияет на форму линий зависимостей коэффициента трения от коэффициента вытяжки, рассчитанных по предложенным формулам. Приведены результаты расчетов коэффициента трения по формуле немецких исследователей и предложенным аналитическим зависимостям при отсутствии и наличии упрочнения деформируемого материала.

Formulas for calculation coefficient of friction for drawing tension size at different models of hardening was been offered. Calculations coefficient of friction at different parameters of deformation and models of hardening was been executed. The size coefficient of friction differs at an equal average limit of fluidity in the center of deformation and different curves of hardening material of a round continuous profile. The form curves of hardening influences form lines of the dependences coefficient of friction on coefficient of an extract calculated by the offered formulas. Results of calculations coefficient of friction on a formula of the German researchers and the offered analytical dependences at absence and existence of hardening of deformable material was been given.

Ключевые слова: волочение, проволока, пруток, методика расчета, осевое напряжение, коэффициент трения, деформационное упрочнение, средний предел текучести, сила волочения.

Keywords: drawing, wire, rounds, method of calculation, axial stress, coefficients of friction, work hardening, averege limit of fluidity, drawing load.

Один из критериев выбора смазки для волочения проволоки и прутка — условие контактного трения, которое влияет на силу, температуру и технологичность волочения [1—6], качество проволоки и проволочных изделий [7—9]. Условие контактного трения характеризуется коэффициентом трения, для оценки которого разработаны различные методики. В настоящее время предпочтение отдается расчетно-экспериментальным методам определения коэффициента трения по Амонтону—Кулону. Например, по величине силы волочения рассчитывают коэффициент трения на основе формул, предназначенных для определения осевого напряжения волочения [1, 2, 10]. Принятие закона трения по Амонтону—Кулону предполагает пропорциональную зависимость напряжения трения от контактного давления. То есть необходимо знать характер распределения давления вдоль длины очага пластической деформации и изменение прочности обрабатываемого материала из-за его деформационного упрочнения.

Большинство аналитических зависимостей для расчета напряжения (силы) волочения включают усредненный предел текучести $\sigma_т$ в очаге деформации, определенный по его значениям на входе $\sigma_{т0}$ и выходе $\sigma_{тк}$, и не рассматривают форму кривой упрочнения при изменении предела текучести от $\sigma_{т0}$ до $\sigma_{тк}$. Формулы, включающие усредненный предел текучести $\sigma_т$, не учитывают принятый закон трения по Кулону вдоль длины очага деформации. Более того, нет единого мнения о методе расчета средней величины $\sigma_т$ в рабочем канале волоки. Например, при расчете осевого напряжения волочения в работе [11] использовали среднегеометрическую величину предела текучести. В работах [5, 12] дано обоснование принятия среднего интегрального зна-

чения $\sigma_т$ с учетом формы кривой упрочнения. В большинстве же случаев принимается среднеарифметическое значение $\sigma_т$ [1, 2, 5, 10].

Поскольку среднеарифметическая величина больше среднегеометрической $\left(\sigma_т = \sqrt{\sigma_{т0}\sigma_{тк}}\right)$, то расчетная величина коэффициента трения будет меньше при среднеарифметической величине предела текучести при использовании одной формулы для расчета осевого напряжения. При волочении возможно интенсивное изменение прочностных свойств материала вдоль длины очага деформации, поэтому возникает значительный градиент давления вдоль оси волочения. В результате снижается точность расчета осевого напряжения по формулам, включающим усредненную величину предела текучести [1, 2, 4], а следовательно, достоверность определения коэффициента трения с использованием этих формул.

В работе [10] предложена формула расчета коэффициента трения по напряжению волочения σ_Z при модели упрочнения деформируемого материала (2):

$$f = \frac{\operatorname{tg}\alpha\left(1-\mu^k - k\bar{\sigma}_q - 0,385k\operatorname{tg}\alpha\left(1+\mu^k\right) + k\bar{\sigma}_Z\right)}{\left(\mu^k - 1\right)\left(1-\bar{\sigma}_q\right)}; \quad (1)$$

$$\sigma_т = \sigma_{т0}\mu^k, \quad (2)$$

где α — угол наклона образующей рабочего конуса к оси волочения;

$\mu = d_0^2/d_к^2$ — коэффициент вытяжки;

d_0 и $d_к$ — диаметр проволоки (прутка) соответственно на входе и выходе волоки;

k — коэффициент упрочнения;

$\bar{\sigma}_Z$ — относительное напряжение волочения, $\bar{\sigma}_Z = \sigma_Z/\sigma_{т0}$;

$\bar{\sigma}_q$ — относительное напряжение противонатяжения, $\bar{\sigma}_q = \sigma_q/\sigma_{т0}$.

Если отсутствует деформационное упрочнение ($k = 0$), то формула принимает вид

$$f = \frac{\operatorname{tg}\alpha\left(\bar{\sigma}_Z - \bar{\sigma}_q - \ln\mu - 0,77\operatorname{tg}\alpha\right)}{\ln\mu\left(1-\bar{\sigma}_q\right)}. \quad (3)$$

Формула (1) значительно упрощается, если кроме упрочнения отсутствует и противонатяжение ($\sigma_q = 0$):

$$f = \frac{\operatorname{tg}\alpha\left(\bar{\sigma}_Z - 0,77\operatorname{tg}\alpha - \ln\mu\right)}{\ln\mu} = \\ = \operatorname{tg}\alpha\left(\frac{\left(\bar{\sigma}_Z - 0,77\operatorname{tg}\alpha\right)}{\ln\mu} - 1\right). \quad (4)$$

В работе [4] оценивали качество смазки по величине коэффициента трения, который рассчитывали по формуле

$$f = \alpha\left(\frac{P_b/\left(\sigma_s S_к\right) - 2\alpha/3}{\ln\mu} - 1\right), \quad (5)$$

где $S_к$ — площадь поперечного сечения проволоки или прутка на выходе волоки;

P_b — экспериментальная сила волочения;

α — угол, рад.

Авторы формулы (5) отметили ее недостатки: "средняя величина σ_s является средним арифметическим между значениями этого показателя на входе и выходе из волоки и постоянно по всей длине волоки. Недостаток заключается в неточности значения сопротивления деформации, что влечет за собой погрешность в определении коэффициента трения. Из-за этого такая методика лишь ограниченно пригодна для испытаний эффективности технологических смазок" [4]. Однако при наличии недостатков метода для определения коэффициента трения на основе формулы (5) отмечается [4]: "Несмотря на довольно существенные упрощения, этот способ нашел применение на практике, потому что имеются устройства для измерения силы волочения". Использование зависимости (5) для оценки и выбора смазки для волочения дает основание для вывода о возможности применения с этой же целью формул (1) или (3). Поскольку новые зависимости (1) или (3) дополнительно включают напряжение σ_q противонатяжения, то расширяется граница их применения при определении коэффициента трения в сравнении с приближенным равенством (5), так как возможен замер силы волочения при разной силе (напряжения) противонатяжения.

Отметим метод определения коэффициента трения, предусматривающий замер силы волочения при отсутствии и действии противонатяжения [13]. Если принять приближенное равенство $\operatorname{tg}\alpha = \alpha$, то при отсутствии противонатяжения формула (4) примет вид

$$f = \alpha\left(\frac{\bar{\sigma}_Z - 0,77\alpha}{\ln\mu} - 1\right). \quad (6)$$

Формулы (5) и (6) отличаются коэффициентом перед углом α, стоящим в круглых скобках. В формуле (5) коэффициент 2/3 или 0,67, а в формуле (6) — 0,77 или $4\sqrt{3}/9$. Отсюда следует, что коэффициент трения по формуле (5) немецких исследователей должен быть больше, чем по новой формуле (6). Оценка степени различия значений для коэффициента трения по извест-

ной формуле (5) и новой формуле (6) является одной из целей настоящей статьи.

Зависимость (1) учитывает характер изменения предела текучести вдоль длины очага деформации согласно принятой модели упрочнения (2) в отличие от формул (3)—(5). Для ее использования необходимы параметры кривой упрочнения деформируемого материала — исходный предел текучести $\sigma_{т0}$ и коэффициент упрочнения k. При этом кривая упрочнения (2) не всегда достаточно точно описывает изменение предела текучести в процессах обработки металлов давлением. Для этого часто используют кривую упрочнения в виде

$$\sigma_т = \sigma_{т0} + m\varepsilon^n, \qquad (7)$$

где m, n — эмпирические коэффициенты;

ε — степень деформации при волочении, $\varepsilon = \ln\mu$.

Зависимость (7) позволяет представлять более сложные формы кривых упрочнения, чем степенная функция (2), так как включает три постоянных коэффициента, а эмпирическая формула (2) — два. Отсюда возникает необходимость расчета коэффициента трения при модели упрочнения (7).

Цель работы — вывести аналитические зависимости для расчета коэффициента контактного трения при модели упрочнения (7) и выполнить его расчет при разных моделях упрочнения материала и параметрах деформации круглого сплошного профиля.

Аналитические зависимости для расчета коэффициента трения при модели упрочнения (7)

Осевое напряжение σ_Z волочения рассчитывали по формуле

$$\sigma_Z = \sigma_{Z1} + \sigma_{Z2} + \sigma_{Z3}, \qquad (8)$$

где σ_{Z1} — прирост осевого напряжения в рабочем конусе;

σ_{Z2} — прирост от действия напряжения противонатяжения σ_q;

σ_{Z3} — прирост напряжения на деформацию сдвига металла.

Составляющие напряжения σ_Z волочения рассчитывали по формулам [9, 14, 15]:

$$\sigma_{Z1} = \left[\sigma_{т0}\ln\mu + \frac{m}{n+1}(\ln\mu)^{n+1}\right](1 + f/\mathrm{tg}\,\alpha); \qquad (9)$$

$$\sigma_{Z2} = \sigma_q\left[1 - \frac{f}{\mathrm{tg}\,\alpha}\left(\ln\mu + \frac{m(\ln\mu)^{n+1}}{\sigma_{т0}(n+1)}\right)\right]; \qquad (10)$$

$$\sigma_{Z3} = \frac{2\,\mathrm{tg}\,\alpha\left(2\sigma_{т0} + m(\ln\mu)^n\right)}{3\sqrt{3}}, \qquad (11)$$

где $\sigma_т$ — средний предел текучести материала в очаге деформации, $\sigma_т = (\sigma_{т0} + \sigma_{тк})/2$.

Зная σ_Z напряжение волочения из формулы (8) определили коэффициент трения

$$f = \mathrm{tg}\,\alpha\left(\bar\sigma_Z - \bar\sigma_q - \ln\mu - \left(\bar m\ln\mu^{(n+1)}/(n+1)\right) - 4\sqrt{3}\,\mathrm{tg}\,\alpha(1 + \bar m(\ln\mu)^n/2)/9\right)\Big/\left(1 - \bar\sigma_q\right)\left(\ln\mu + \bar m\ln\mu^{(n+1)}/(n+1)\right). \qquad (12)$$

При отсутствии упрочнения ($m = \bar m = 0$) имеем

$$f = \mathrm{tg}\,\alpha\left(\bar\sigma_Z - \bar\sigma_q - \ln\mu - 4\sqrt{3}\,\mathrm{tg}\,\alpha/9\right)\Big/\left(\ln\mu\left(1 - \bar\sigma_q\right)\right). \qquad (13)$$

Формула (12) упрощается, если нет упрочнения и противонатяжения ($\bar m = \bar\sigma_q = 0$):

$$f = \mathrm{tg}\,\alpha\left(\bar\sigma_Z - \ln\mu - 4\sqrt{3}\,\mathrm{tg}\,\alpha/9\right)\Big/\ln\mu. \qquad (14)$$

Из формул (1) и (12) при отсутствии упрочнения и наличии противонатяжения следуют соответственно формулы (3) и (13), а при отсутствии упрочнения и противонатяжения — формулы (4) и (14). Формулы (3) и (13) определяют равные значения коэффициента трения при $n = 0$, как и формулы (4) и (14) при $n = \sigma_q = 0$, так как $4\sqrt{3}/9 = 0{,}77$.

Модели упрочнения деформируемого материала

Расчеты выполняли при следующих моделях упрочнения материала проволоки (прутка):

$$\sigma_т = 1000\mu^{0{,}55}\ \text{МПа}; \qquad (15)$$

$$\sigma_т = 1000 + 500(\ln\mu)^{0{,}767}\ \text{МПа}; \qquad (16)$$

$$\sigma_т = 1000 + 1250(\ln\mu)^{1{,}778}\ \text{МПа}. \qquad (17)$$

Зависимости предела текучести от коэффициента вытяжки при моделях упрочнения (15)—(17) приведены на рис. 1.

Линии *1—3* пересекаются при коэффициенте вытяжки 1,5. Если выполнили бы расчет осевого напряжения σ_Z волочения при коэффициенте вытяжки 1,5 по формулам, включающим усредненное значение напряжение текучести σ_s в оча-

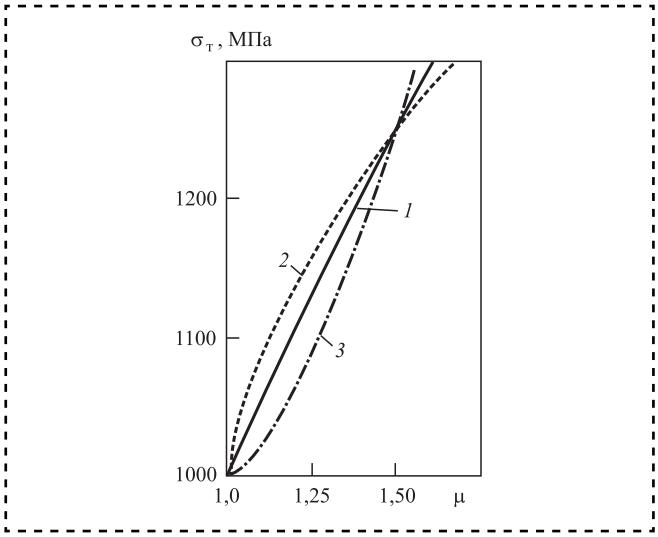

Рис. 1. Зависимости предела текучести от коэффициента вытяжки:
1 — модель упрочнения (15); *2* — (16); *3* — (17)

ге деформации, то значения напряжения σ_Z были бы равны при принятых моделях упрочнения. Представляет интерес оценка значений коэффициента трения при коэффициенте вытяжки 1,5, а также других степенях деформации круглого сплошного профиля с кривыми упрочнения (15)—(17).

Результаты расчета и их анализ

На рис. 2 представлены зависимости коэффициента трения от коэффициента вытяжки по формуле (5) и новой методике расчета при отсутствии противонатяжения. Осевое напряжение σ_Z волочения 750 МПа (рис. 2, *а*, *б*) и 1000 МПа (рис. 2, *в*, *г*). Угол α волочения 6 и 12°. Упрочнение отсутствует: при модели упрочнения (15) коэффициент *k* упрочнения принят равным 0,001, а при моделях упрочнения (16) и (17) коэффициент $n = 0$. Коэффициент *k* не приняли равным нулю, так как при вычислениях по формуле (1) выполняется деление нуля на нуль. Поэтому при расчете коэффициента трения по формуле (1) при отсутствии упрочнения принимается малая величина коэффициента *k*, например, из интервала 10^{-6}...0,001. При отсутствии противонатяжения и упрочнения расчет коэффициента трения при моделях упрочнения (16) и (17) выполняется по формуле (12) или упрощенным зависимостям (13) и (14). В данном случае при отсутствии упрочнения расчет выполнили по формулам (1) и (12) для проверки получения равных значений коэффициента трения при моделях упрочнения (15)—(17).

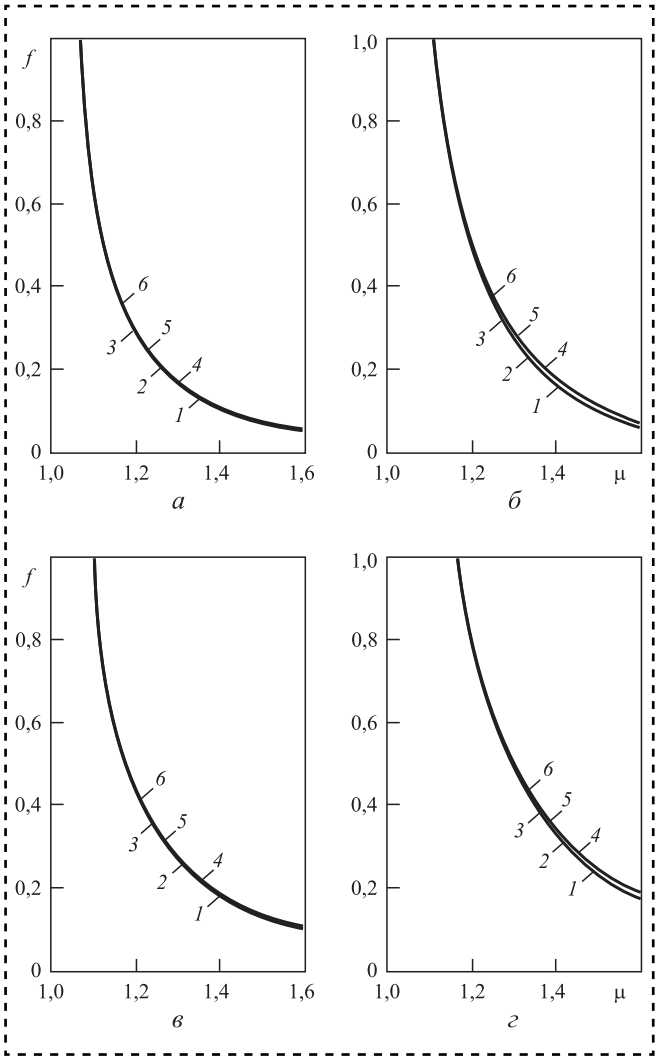

Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от коэффициента вытяжки при отсутствии противонатяжения и упрочнения:
а, *б* — $\sigma_Z = 750$ МПа; *в*, *г* — $\sigma_Z = 1000$ МПа; *а*, *в* — α = 6°; *б*, *г* — α = 12°; *1* — расчет по формуле (1); *2*, *3* — расчет по формуле (12); *4—6* — расчет по формуле (5)

Коэффициент трения существенно снижается с ростом коэффициента вытяжки при обоих напряжениях σ_Z и углах α волочения. Кривые *1—3*, рассчитанные по новым формулам, и кривые *4—6* по формуле (5) слились. При α = 12° (см. рис. 2, *б*, *г*) и повышенных обжатиях (μ > 1,4) линии *4—6* выше линий *1—3*. Для оценки степени расхождения значений коэффициента *f*, вычисленного по разным формулам, построили графики на рис. 3.

Абсолютную Δf и относительную δf разности рассчитывали по формулам:

$$\Delta f = f(5) - f; \quad (18)$$

$$\delta f = 100\left(f(5) - f\right)/f(5), \quad (19)$$

где f (5), f — коэффициент трения соответственно по формуле (5) и (1) или (12).

Абсолютная разность Δf интенсивно снижается с увеличением коэффициента вытяжки от 1,0 до 1,15 (рис. 3, *а*, *б*), особенно при $\alpha = 6°$ (линии *1—3*). При этом значении угла наблюдается незначительное уменьшение коэффициента f в интервале коэффициента вытяжки 1,2...1,6.

Относительная разность δf (рис. 3, *в*, *г*) увеличивается с ростом коэффициента вытяжки. Значит, коэффициент трения по формуле (5) в выражении (19) более интенсивно уменьшается с ростом коэффициента вытяжки, чем разность f (5) − f. Относительная разность δf больше при $\alpha = 12°$ (линии *4—6*) и напряжении σ_Z волочения 750 МПа (рис. 3, *в*).

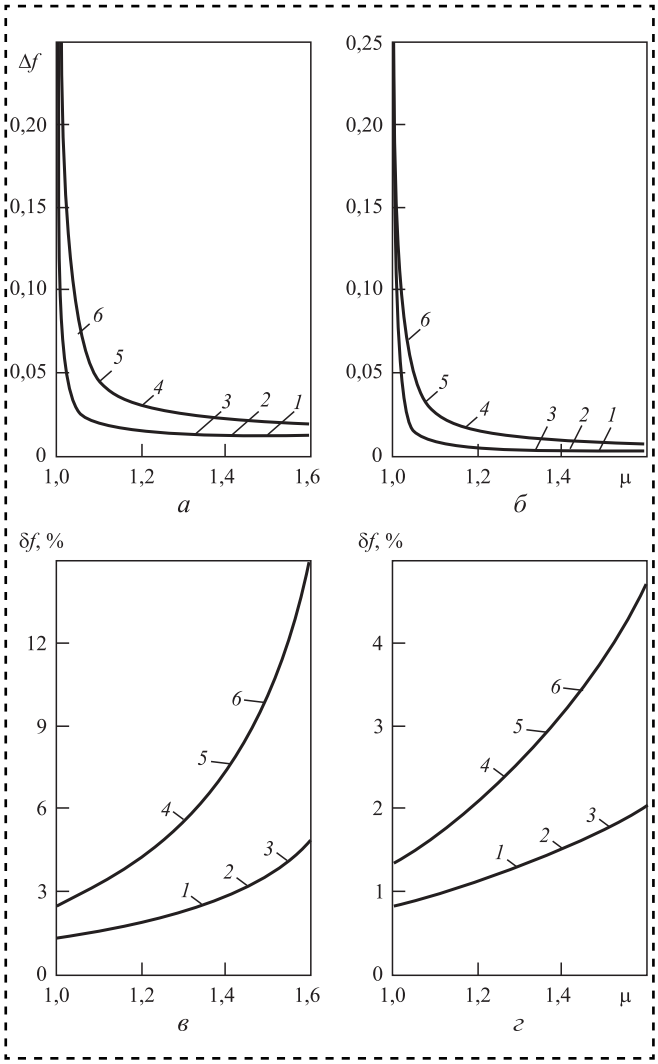

Рис. 3. Абсолютная Δf (*а*, *б*) и относительная δf (*в*, *г*) разности значений для коэффициента трения в зависимости от коэффициента вытяжки при отсутствии противонатяжения и упрочнения:
а, *в* — σ_Z = 750 МПа; *б*, *г* — σ_Z = 1000 МПа; *1—3* — $\alpha = 6°$; *4—6* — $\alpha = 12°$

Выполняли расчет коэффициента трения при отсутствии противонатяжения и моделях упрочнения (15)—(17) по формуле (5) и новым формулам (1) и (12). Осевое напряжение σ_Z равно 750 МПа (рис. 4, *а—г*) и 1000 МПа (рис. 4, *д—з*), угол α волочения 6 и 12°. Среднее значение $\sigma_т$ при расчете по формуле (5) находили с учетом принятой модели упрочнения:

$$\sigma_s = \sigma_{s0}\left(1 + \mu^k\right)/2;$$

$$\sigma_s = \left(2\sigma_{s0} + m\left(\ln\mu\right)^n\right)/2.$$

На рис. 4 представлены зависимости коэффициента трения от коэффициента вытяжки по новой методике расчета и по формуле (5) при отсутствии противонатяжения. При варьировании коэффициента вытяжки в интервале 1,0...1,6 линии для коэффициента трения при разных моделях упрочнения и двух способов расчета коэффициента f находятся на близком расстоянии друг от друга, что затрудняет оценку их расположения относительно осей графика. Поэтому выбрали два интервала варьирования коэффициента вытяжки при пониженных и повышенных степенях деформации, которые имеют незначительное различие значений коэффициента вытяжки.

Штриховая линия *2*, построенная при модели (16) на основе расчета по новой формуле (12), на всех графиках рис. 4 показывает меньшие значения коэффициента трения. Сплошная линия *1* при модели (15) находится между линиями *2* и *3* соответственно при моделях упрочнения (16) и (17), как кривая упрочнения *1* между кривыми упрочнения *2* и *3* на рис. 1. Только штриховая линия *2* при модели (16) находится ниже линии *1* на рис. 4, а на рис. 1 кривая упрочнения *2* при модели (16) выше кривой упрочнения *1* при модели (15). При расчете по формуле (5) сплошная линия *4* при модели (15) также находится между линиями *5* и *6* соответственно при моделях (16) и (17). Таким образом, форма кривых упрочнения (15)—(17) влияет на величину коэффициента трения при ее расчете по новым формулам (1) и (12). Штрихпунктирные линии *3* и *6*, построенные соответственно на основе формул (12) и (5), находятся выше других линий. Отсюда следует меньшая степень влияния на величину коэффициента трения модели упрочнения и формулы расчета коэффициента f, чем изменение угла α волочения от 6 до 12°. При $\alpha = 12°$ (рис. 4, *б*, *г*, *е*, *з*) коэффициент трения больше, чем при $\alpha = 6°$ (рис. 4, *а*, *в*, *д*, *ж*)

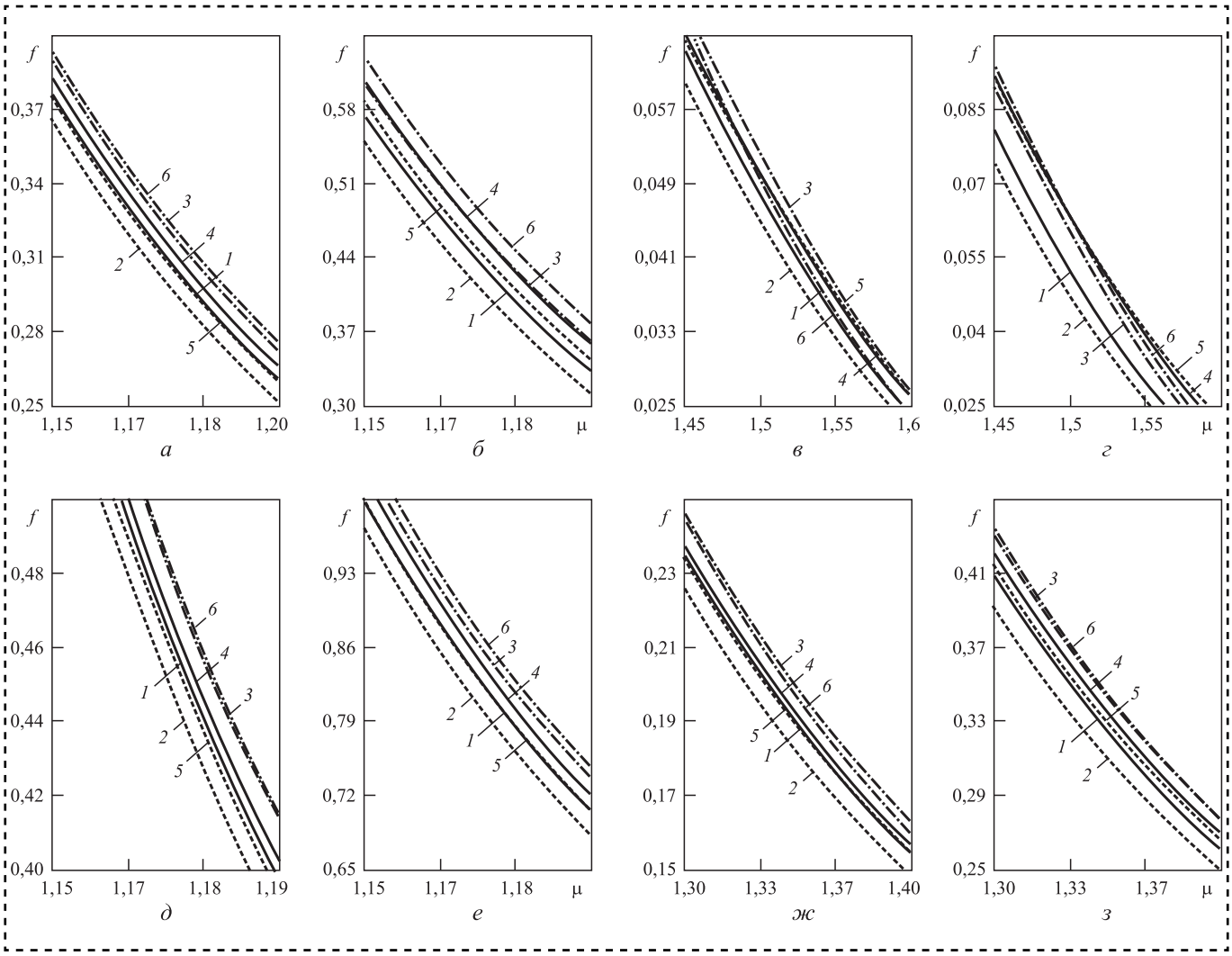

Рис. 4. Зависимость коэффициента трения от коэффициента вытяжки:
а—г — σ_Z = 750 МПа; *д—з* — σ_Z = 1000 МПа; *а*, *в*, *д*, *ж* — α = 6°; *б*, *г*, *е*, *з* — α = 12°; *1—3* — расчет по новой методике; *4—6* — расчет по формуле (5); *1, 4* — модель упрочнения (15); *2, 5* — (16); *3, 6* — (17)

при равных значениях напряжения σ_Z волочения и коэффициента вытяжки. Несмотря на выбор двух интервалов варьирования для коэффициента вытяжки линии *1* и *5* на рис. 4, *е* полностью слились.

Рассчитали абсолютную Δf (рис. 5, *а*, *б*) и относительную δf (рис. 5, *в*, *г*) разности соответственно по формулам (18) и (19) в зависимости от коэффициента вытяжки при отсутствии противонатяжения. Исходные данные оставили без изменения (как при расчете зависимостей рис. 4).

Значения разностей Δf и δf больше при модели упрочнения (16), что показывают штриховые линии *2* и *5* соответственно при α = 6° и α = 12°. При каждой величине угла α сплошная линия при модели упрочнения (15) находится между штриховыми и штрихпунктирными линиями соответственно при моделях упрочнения (16) и (17). При напряжении σ_Z волочения 750 МПа (рис. 5, *а*, *в*) имеются отрицательные значения разностей Δf и δf, что показывает штрихпунктирная линия *3* при модели (17) и α = 6°. То есть, при этой модели упрочнения коэффициент трения может быть больше при расчете по формуле (12), чем при расчете по формуле (5). При напряжении σ_Z волочения 1000 МПа (рис. 5, *б*, *г*) и модели упрочнения (17) отрицательные значения разностей Δf и δf возможны также при α = 12° (кривая *6*). При этом напряжении σ_Z штрихпунктирные кривые *3* и *6* интенсивно снижаются при высоких степенях деформации (μ > 1,4). Линия *1* для разностей Δf и δf при модели (15) находится ближе к нулевой ординате. Степень различия значений коэффициента трения, вычисленных по формуле (5) и новым зависимостям, определяют параметрами

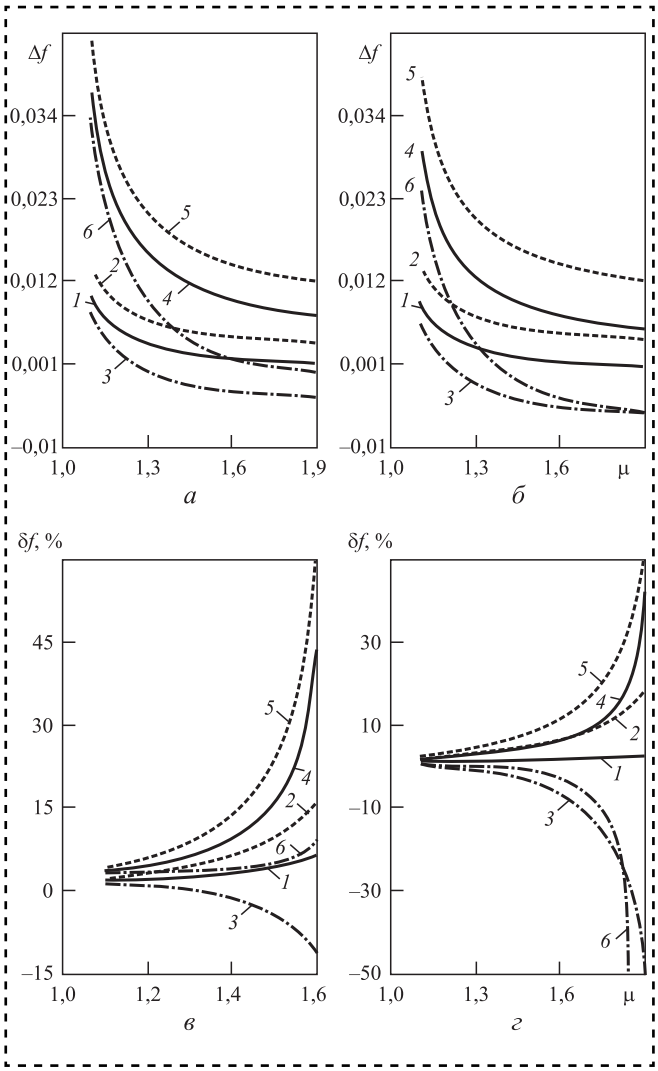

Рис. 5. Абсолютная Δ*f* (*а*, *б*) и относительная δ*f* (*в*, *г*) разности значений для коэффициента трения в зависимости от коэффициента вытяжки при отсутствии противонатяжения:

а, *в* — σ_Z = 750 МПа; *б*, *г* — σ_Z = 1000 МПа; *1—3* — α = 6°; *4—6* — α = 12°; *1*, *4* — модель упрочнения (15); *2*, *5* — модель (16); *3*, *6* — (17)

деформации (коэффициентом вытяжки и углом волочения) и моделями упрочнения.

Вычислили разности для значений коэффициента трения при разных моделях упрочнения:

$$\Delta f_1 = f(15) - f(16); \quad (20)$$

$$\Delta f_2 = f(17) - f(16); \quad (21)$$

$$\Delta f_3 = f(17) - f(15), \quad (22)$$

где *f* (15), *f* (16), *f* (17) — коэффициенты трения при соответствующих моделях упрочнения, вычисленные по известной формуле (5) и по новым зависимостям (1) и (12).

При нулевой разности имеем равенство значений коэффициента трения при двух моделях упрочнения. На рис. 6 выделены интервалы значений коэффициента вытяжки, при которых разности Δ*f* (20)—(22) равны нулю. Разности, вычисленные по формуле (12), приведены на графиках (рис. 6, *а*, *в*, *д*, *ж*), а по формуле (5) — (рис. 6, *б*, *г*, *е*, *з*).

На всех графиках рис. 6 нулевое значение разности Δf_1 (20) наблюдается при большей вели-

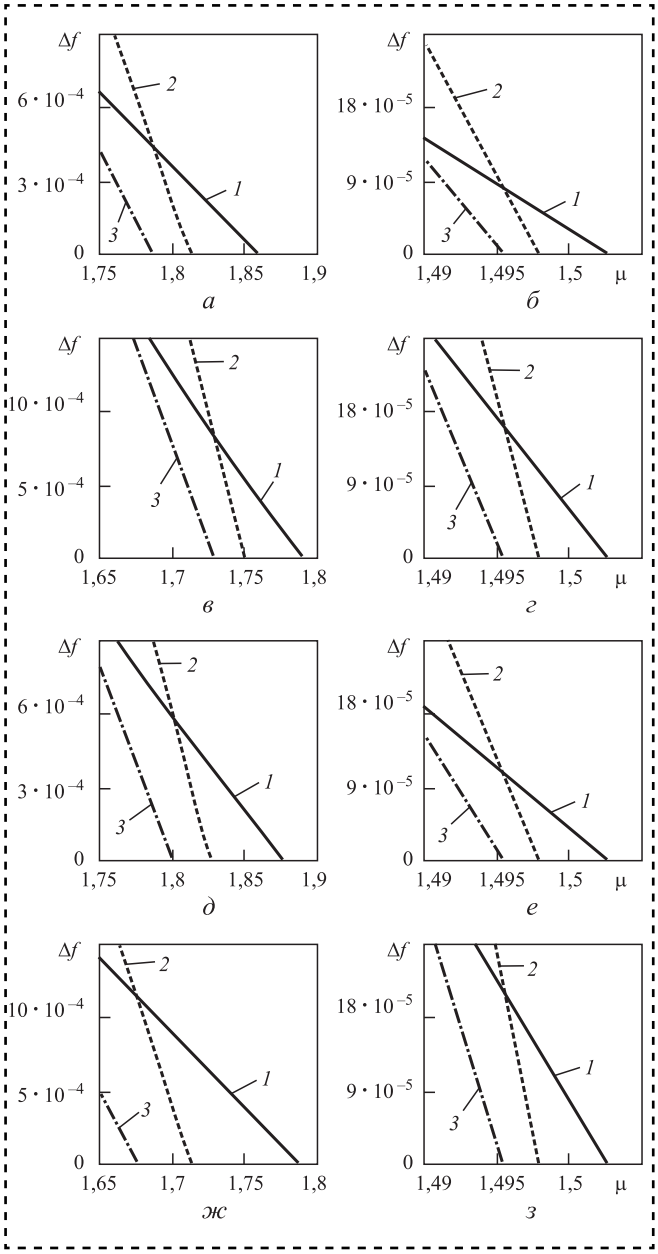

Рис. 6. Разности коэффициента трения в зависимости от коэффициента вытяжки:

а—г — σ_Z = 750 МПа; *д—з* — σ_Z = 1000 МПа; *а*, *в*, *д*, *ж* — расчет по формулам (1) и (12); *б*, *г*, *е*, *з* — расчет по формуле (5), *1* — Δf_1(20), *2* — Δf_2(21), *3* — Δf_3(22); *а*, *б*, *д*, *е* — α = 6°; *в*, *г*, *ж*, *з* — α = 12°

чине коэффициента вытяжки, что показывает сплошная линия. Разность значений коэффициента f при моделях упрочнения (15) и (17) равна нулю при меньших значениях коэффициента вытяжки: штрихпунктирная линия пересекает ось абсцисс в точке, расположенной ближе к оси ординат. Линии графиков рис. 6, *б*, *г*, *е*, *з*, построенные по результатам расчетов по формуле (5), пересекают ось абсцисс в области коэффициента вытяжки 1,5, при котором равны значения предела текучести при трех моделях упрочнения (15) — (17). Точки пересечения оси абсцисс линиями графиков рис. 6, *а*, *в*, *д*, *ж* лежат правее коэффициента вытяжки 1,5, в области коэффициента вытяжки 1,8. Причем при $\alpha = 12°$ эти точки пересечения находятся при меньших значениях коэффициента вытяжки. Напряжение σ_Z волочения практически не оказало влияния на координаты точек пересечения при расчете по известной формуле и новым зависимостям.

Зависимости коэффициента трения от напряжения противонатяжения при моделях упрочнения (15)—(17) представлены на рис. 7. Расчеты выполнены при тех же значениях угла α волочения. Приняты значения напряжения σ_Z волочения 750, 1000 и 1250 МПа и коэффициента вытяжки: 1,25; 1,50; 1,80 и 1,85. Верхняя граница напряжения σ_q противонатяжения у интервала его варьирования выбрана из условия, что числители новых формул (1) и (12) были больше нуля, так как при делении нуля на конечную величину знаменателя наблюдался сбой компьютерного построения графика:

$$\bar{\sigma}_q = \bar{\sigma}_Z - 0,385\,\mathrm{tg}\,\alpha\left(1+\mu^k\right) + \left(1-\mu^k\right)/k; \quad (23)$$

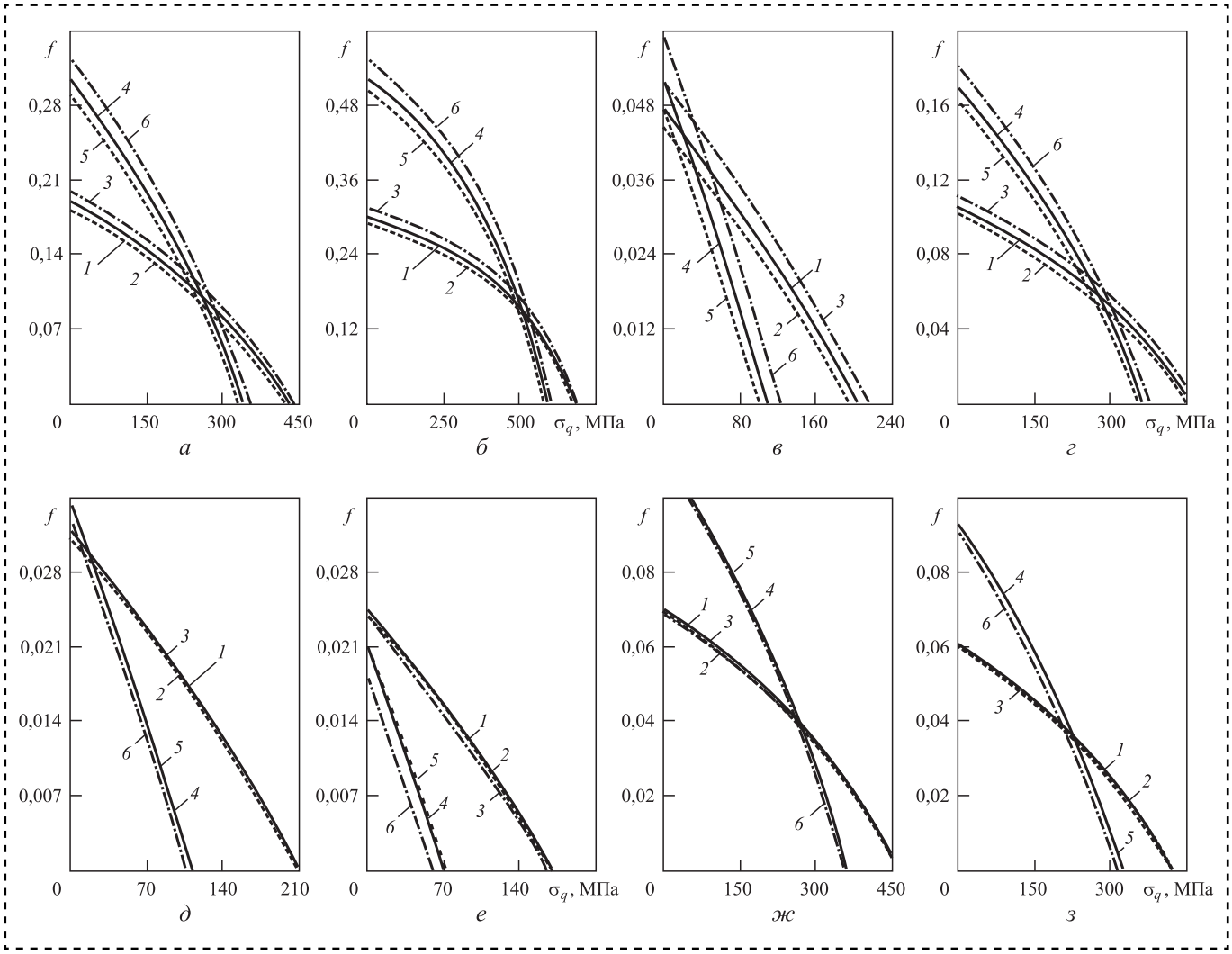

Рис. 7. Коэффициент трения по формулам (1) и (12) в зависимости от напряжения противонатяжения:
а, *б* — μ = 1,25; *в*, *г* — μ = 1,50; *д*, *ж* — μ = 1,80; *е*, *з* — μ = 1,85; *а*, *в* — σ_Z = 750 МПа; *б*, *г*, *д*, *е* — σ_Z = 1000 МПа; *ж*, *з* — σ_Z = 1250 МПа; *1—3* — α = 6°; *4—6* — α = 12°; *1*, *4* — модель упрочнения (15); *2*, *5* — (16); *3*, *6* — (17)

$$\bar{\sigma}_q = \bar{\sigma}_Z - \ln\mu - \left(\bar{m}\ln\mu^{(n+1)}/(n+1)\right) - \\ - 0,77\,\mathrm{tg}\,\alpha\left(1 + \bar{m}(\ln\mu)^n/2\right). \quad (24)$$

При отсутствии упрочнения ($k = m = 0$) формулы (23) и (24) определяют равенство

$$\bar{\sigma}_q = \bar{\sigma}_Z - \ln\mu - 0,77\,\mathrm{tg}\,\alpha.$$

При компьютерном построении зависимостей для коэффициента трения от коэффициента вытяжки (см. рис. 2—6) также ограничили верхнюю границу интервала варьирования коэффициента μ для исключения деления нулевого числителя формул (1) и (12) на конечную величину знаменателя.

Угол наклона линий *1—3* к оси абсцисс на рис. 7 меньше при $\alpha = 6°$. Сплошные линии *1* и *4* при модели упрочнения (15) находятся между линиями при моделях упрочнения (16) и (17). Линии при разных углах волочения не пересекаются только на рис. 7, *е*.

Сравнение зависимостей рис. 7, *а* и *б* при $\mu = 1,25$, зависимостей рис. 7, *в* и *г* при $\mu = 1,50$ дают основание для вывода, что при осевом напряжении σ_Z волочения 1000 МПа коэффициент трения больше, чем при $\sigma_Z = 750$ МПа, если равны другие параметры деформации. При коэффициенте вытяжки 1,80 и напряжении σ_Z волочения 1250 МПа (рис. 7, *ж*) коэффициент трения больше, чем при $\sigma_Z = 1000$ МПа (рис. 7, *д*) и том же коэффициенте вытяжки. При увеличении осевого напряжения σ_Z точки пересечения линий с осью абсцисс смещаются в сторону более высокого напряжения противонатяжения, а при увеличении коэффициента вытяжки точки пересечения смещаются в противоположную сторону, в область меньших значений напряжения противонатяжения. Это видно, например, из сравнения раположения линий на графиках рис. 7, *а* и *в* при $\sigma_Z = 750$ МПа, и линий на графиках рис. 4, *б* и *г* при $\sigma_Z = 1000$ МПа.

Более точные значения коэффициента трения с тремя знаками после запятой при разных параметрах деформации приведены в таблице.

При увеличении напряжения σ_Z волочения при фиксированных значениях коэффициента вытяжки, угла α волочения и напряжения противонатяжения повышается величина коэффициента трения. Например, увеличение напряжения σ_Z с 1250 до 1500 МПа при модели упрочнения (15) и $\alpha = 6°$ привело к увеличению коэффициента трения от 0,055 до 0,100 при коэффициенте вытяжки 1,80, а при коэффициенте вытяжки 1,85 — к увеличению *f* от 0,046 до 0,088. Из таблицы следует малое различие при коэффициентах вытяжки 1,80 и 1,85 значений коэффициента *f* при разных моделях. Например, при коэффициенте вытяжки 1,80, напряжении $\sigma_Z = 1250$ МПа и $\alpha = 6°$ коэффициент *f* при моделях (15) и (17) равен 0,055. Здесь подтверждаются результаты расчетов, представленных на рис. 6. Равенство значений коэффициента *f* при разных моделях упрочнения наблюдается при коэффициенте вытяжки, который больше 1,5 и находится в области $\mu = 1,8$. При коэффициенте вытяжки 1,5 значения коэффициента *f* при разных моделях отличаются. Например, при $\sigma_Z = 1000$ МПа и $\alpha = 12°$ значения коэффициента трения 0,116; 0,109 и 0,126 соответственно при моделях упрочнения (15), (16) и (17).

Коэффициент трения при напряжении σ_q противонатяжения 150 МПа и значениях угла α волочения 6 и 12°, моделях упрочнения (15)—(17) и разных значениях коэффициента μ вытяжки и напряжения σ_Z волочения

μ	σ_Z, МПа	$\alpha = 6°$			$\alpha = 12°$		
		(15)	(16)	(17)	(15)	(16)	(17)
1,25	750	0,144	0,137	0,153	0,198	0,185	0,216
	1000	0,274	0,264	0,288	0,461	0,442	0,488
	1250	0,404	0,391	0,422	0,725	0,700	0,760
1,50	1000	0,083	0,079	0,089	0,116	0,109	0,126
	1250	0,151	0,146	0,158	0,254	0,245	0,268
1,80	1250	0,055	0,054	0,055	0,076	0,075	0,074
	1500	0,100	0,099	0,100	0,166	0,165	0,165
1,85	1250	0,046	0,045	0,045	0,058	0,059	0,055
	1500	0,088	0,087	0,087	0,144	0,144	0,140

Заключение

Предложены формулы (12)—(14) для расчета коэффициента трения по известной величине напряжения волочения при модели упрочнения (7). Выполнены расчеты коэффициента трения по формуле (5) и формулам (1) и (12) при отсутствии и наличии упрочнения по трем моделям упрочнения. Коэффициент трения по формуле (5) в целом больше, чем по формулам (1) и (12). При принятых моделях упрочнения (15)—(17) значения коэффициента трения по формуле (5) равны с точностью до второго знака после

запятой (см. рис. 6, *б*, *г*, *е*, *з*) при коэффициенте вытяжки 1,5, а при расчете по формулам (1) и (12) равенство значений коэффициента f наблюдается в интервале μ = 1,67...1,88 (см. рис. 6, *а*, *в*, *д*, *ж*). То есть при разных моделях упрочнения и равных средних значениях напряжения текучести в очаге деформации не наблюдается равенство значений коэффициента трения по новым формулам расчета. При фиксированном напряжении σ_Z волочения коэффициент трения больше при $\alpha = 12°$, чем при $\alpha = 6°$ и уменьшается с ростом коэффициента вытяжки и напряжения противонатяжения. Форма кривых упрочнения (15)—(17) влияет на форму линий для зависимостей коэффициента трения от коэффициента вытяжки при расчете по новым формулам (1) и (12). Формулы (1) и (12) при отсутствии упрочнения определяют равные значения коэффициента трения. При принятых в производственных условиях степенях деформации проволоки (коэффициент вытяжки обычно меньше 1,4) значения коэффициента трения по формуле (5) и по новым зависимостям (1) и (12) существенно не отличаются при принятых моделях упрочнения.

Библиографический список

1. **Губкин С.И.** Пластическая деформация металлов. Т. 3. М.: Металлургиздат, 1960. 306 с.
2. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
3. **Контактное** трение в процессах обработки металлов давлением / А.Н. Леванов и др. М.: Металлургия, 1976. 412 с.
4. **Мор У., Павельски О., Расп В.** Оценка технологических смазок для волочения прутков и катанки // Черные металлы. 1987. № 10. С. 16—22.
5. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: МГТУ, 2008. 358 с.
6. **Гурьянов Г.Н.** Изменение показателей напряженного состояния и запаса прочности проволоки при отклонении коэффициента трения от номинального значения // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 18—29.
7. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Качество и технологичность волочения проволоки специального назначения // Сталь. 2013. № 3. С. 78—80.
8. **Влияние** скорости волочения на температуру и напряженно-деформированное состояние высокоуглеродистой проволоки / М.Н. Верещагин и др. // Сталь. 2007. № 12. С. 54—58.
9. **Гурьянов Г.Н.** Влияние величины коэффициента контактного трения на напряженное состояние и запас прочности при волочении круглого сплошного профиля // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 11. С. 27—36.
10. **Гурьянов Г.Н.** Методы определения коэффициента трения при волочении круглого сплошного профиля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 8. С. 60—68.
11. **Кучеряев Б.В., Николаев Р.А., Жукова Е.А.** Расчет энергосиловых параметров процесса волочения прутков // Производство проката. 2006. № 6. С. 30—31.
12. **Гурьянов Г.Н.** Запас прочности нержавеющей проволоки при различных методах учета среднего предела текучести в очаге деформации // Известия вузов. Черная металлургия. 2009. № 10. С. 24—27.
13. **Добров И.В.** Новый метод определения коэффициента трения при волочении // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2000. № 4. С. 51—54.
14. **Гурьянов Г.Н.** Оценка параметров волочения при разных моделях упрочнения проволочной заготовки // Сталь. 2014. № 7. С. 71—77.
15. **Гурьянов Г.Н.** Выбор оптимальных параметров деформации при разных формах рабочего канала волоки и моделях упрочнения материала проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2016. № 1. С. 28—38.

УДК 621.9

Г.С. Ивасышин, *д-р техн наук*
(Псковский государственный университет)
E-mail: genrih.ivasyshin@yandex.ru

Приложения квантовой механики. Аттосекундные процессы в микро-, нано-, пико- и фемтотрибологии

Обсуждаются возможности получения конкурентоспособных технологий на основе научных открытий (Дипломы № 258, 277, 289, 302, 392, 404, 466, 468, 492) и квантовой механики.

The opportunities of competitive technologies based on scientific investigations (Diplomas 258, 277, 289, 302, 392, 404, 466, 468, 492) and quantum mechanics are discussed.

Ключевые слова: углеродно-азотный цикл, протон-протонный цикл, сверхтекучесть гелия, гелиевое изнашивание, холодный ядерный синтез.

Keywords: carbon-and nitrogen cycle, proton-and-proton cycle, helium superfluidite, helium wearability, cold nuclear fusion.

Введение

"...Одной из самых важных приоритетных научных проблем в настоящее время является проведение фундаментальных исследований в области основ физики аттосекундных нанотехнологий, использующих в точечных операциях с материалами аттосекундные импульсы электромагнитной энергии в диапазоне жесткого ультрафиолета и мягкого рентгена. Без решения этой проблемы невозможно выполнение высокоточных неразрушающих монтажных операций в материалах на нижнем предельном масштабном уровне 1—10 нм. При этом реализация аттосекундных физических процессов ведется не на типичном для фемтосекундной химии уровне валентных связей атомов, а на более глубоком уровне перестройки внутренней электронной структуры атомов и молекул..." [1].

Ю.И. Головин считает: "...желательно найти условия, в которых трение упало бы до нуля и реализовалось "сверхскольжение", аналогичное сверхпроводимости или сверхтекучести. Принципиальных препятствий для этого не существует, и в некотором смысле такие режимы уже найдены..." [2].

Определенное представление о диапазоне нанотехнологических исследований, в том числе фемтосекундных технологий, дано профессором Токийского Университета Наоя Кобаяси в работе [3].

Академик Б.В. Дерягин с сотрудниками в 1985 г. обнаружил явление механоэмиссии нейтронов из содержащих дейтерий кристаллических тел, которое интерпретировали как появление реакций холодного ядерного синтеза.

В 90-е годы сотрудники Б.В. Дерягина предложили гипотезу о том, что в веществах с водородными связями на однородной связи могут оказаться два ядра атомов водорода при расстоянии между ними менее одного ангстрема.

Водород — почти неизбежная примесь любого сплава. Малый диаметр атома водорода (в металлах колеблется от 0,056 до 0,092 нм) подразумевает большую подвижность водорода по сравнению с другими элементами, которая особенно заметна при низких температурах.

От всех других элементов водород отличается тем, что находясь в кристаллической решетке в ионизированном состоянии он образует протонный газ. Протон — ядро атома водорода размером около 1...10 Фм (1 Фм = 10^{-15} м, фемтометр — от датского femten — пятнадцать). Размеры атома примерно 0,1 нм. Установлено, что атом — основной строительный материал веще-

ства — представляет собой "атом пустоты" с отношением объема, занимаемого ядром, к объему атома примерно 10^{-15}.

Туннелирование дейтронов сквозь столь узкий барьер может происходить с большой вероятностью и при низких температурах.

Под холодным ядерным синтезом (ХЯС), который теперь предлагают заменить на термин "ядерные процессы, индуцированные кристаллической решеткой", понимаются аномальные с точки зрения вакуумных ядерных столкновений стохастические низкотемпературные ядерные процессы (слияние ядер с выделением нейтронов), существующие в неравновесных твердых телах, которые стимулируются трансформацией упругой энергии в кристаллической решетке при фазовых переходах, механических воздействиях, сорбции или десорбции водорода (дейтерия). ХЯС достоверно зафиксирован в целом ряде физических и физико-химических процессов с участием дейтерия.

Многие из таких процессов, но с участием природного водорода, имеют место и в естественных процессах. К их числу можно отнести: явление сорбции-десорбции водорода в металлах, окислительно-восстановительные воздействия на соединения водорода, механическое разрушение и измельчание водородосодержащих пород, трение.

Однако до сих пор не создано удовлетворительной количественной и даже качественной теории ХЯС, имеющей принципиальное значение как для фундаментальной науки, так и практического использования [4—5].

Цель работы — обеспечение условий управления трением на основе синтеза гелия в объемных и поверхностных слоях пар трения, а также на основе квантовой механики.

Использование пар трения с гелиевым изнашиванием, созданных на основе реализации углеродно-азотного и протон-протонного циклов ХЯС, в результате которых в зоне трения водород превращается в гелий, даст возможность управлять трением (за счет сверхтекучести гелия) в микротрибосистемах [4, 5].

Научное открытие (Диплом № 289). *"Закономерность аддитивности диффузионного магнитного последствия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов"* [*6*].

"Установлена неизвестная ранее закономерность аддитивности диффузионного магнитного последействия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов, заключающаяся в том, что в упругой и пластической областях твердых тел в зоне их фрикционного контакта происходит суммирование (аддитивность) диффузионных магнитных последствий, сопровождающих упругие и пластические последствия, определяющая поведение внедренных атомов углерода и азота и обусловленная направленным перемещением дислокаций, несущих внедренные атомы углерода и азота в зону фрикционного контакта из упругой и пластической областей пары трения и влияющих на структуру и подвижность доменных стенок".

Атомы внедрения углерода C и азота N (углеродно-азотный цикл) ответственны за синтез гелия в зоне трения [диплом № 289]:

$$^{12}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{13}N + \gamma; \quad {}^{14}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{15}O + \gamma;$$

$$^{13}N \rightarrow {}^{13}C + \beta^{+} + \nu; \quad {}^{15}O \rightarrow {}^{15}N + \beta^{+} + \nu;$$

$$^{13}C + {}^{1}H \rightarrow {}^{14}N + \gamma; \quad {}^{15}N + {}^{1}H \rightarrow {}^{12}C + {}^{4}He.$$

Углерод играет роль катализатора процесса слияния протонов. Протон, сталкиваясь с углеродом, превращается в радиоактивный изотоп ^{13}N. При этой реакции излучается γ-квант (фотон). Изотоп ^{13}N, претерпевая β-распад с испусканием позитрона и нейтрино, превращается в обычное ядро азота ^{14}N. При этой реакции также излучается γ-квант. Далее, ядро азота сталкивается с протоном, после чего образуется радиоактивный изотоп кислорода ^{15}O и γ-квант. Затем этот изотоп путем β-распада превращается в изотоп азота ^{15}N. Наконец, последний, присоединив к себе во время столкновения протон, распадается на обычный углерод и гелий. Вся цепь реакций представляет собой последовательное "утяжеление" ядра углерода путем присоединения протонов последующими β^{+}-распадами. Последним звеном этой цепи является восстановление первоначального ядра углерода и образование нового ядра гелия за счет четырех протонов, которые в разное время один за другим присоединились к ^{12}C и образующимся из него изотопам.

Научное открытие (Диплом № 302). *"Закономерность аддитивности водородного магнитного последействия в объемных и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов"* [*7*].

"Установлена неизвестная ранее закономерность аддитивности водородного магнитного последействия в объемных частях и поверх-

ностных слоях пар трения из ферромагнитных металлов и сплавов, заключающаяся в том, что в упругой и пластической областях твердых тел в зоне их фрикционного контакта происходит суммирование (аддитивность) водородных магнитных последействий, сопровождающих упругие и пластические последействия, обусловленная направленным перемещением дислокаций, несущих водород в зону контакта":

$$^{1}H + {}^{1}H \rightarrow {}^{2}D + \beta^{+} + \nu;$$

$$^{2}D + {}^{1}H \rightarrow {}^{3}He + \gamma;$$

$$^{3}He + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + 2{}^{1}H.$$

Сформулирован механизм ХЯС, возникающий в поверхностных слоях пар трения твердых тел вследствие суммирования (аддитивности) водородных магнитных последействий и обусловленный направленным перемещением дислокаций в кристаллических структурах металлов на основе реализации протон-протонного цикла, в результате которого водород превращается в гелий.

Выводы

1. Разработаны оригинальные теоретические (трибофизические) модели механизма ХЯС в кристаллических структурах поверхностных слоев пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов [4, 5].

2. Найдены "...условия, в которых трение упало бы до нуля и реализовалось "сверхскольжение", аналогичное сверхпроводимости или сверхтекучести...". Созданы трибофизические модели на основе реализации углеродно-азотного и протон-протонного циклов, в результате которых водород превращается в гелий.

3. Создание материалов с гелиевым изнашиванием на основе научных открытий [6, 7] обеспечивает возможность не только управлять трением в машинах и механизмах за счет сверхтекучести гелия в парах трения, но и даст возможность в перспективе получать неиссякаемый источник экологически чистой энергии на основе реализации ХЯС (синтеза из более легкого водорода более тяжелого гелия). Создан новый подход в конструировании технологических машин.

Библиографический список

1. **Компьютерное** моделирование аттосекундных нанотехнологий на основе НЭМС материалов / С.А. Безносюк и др. // Сб. тез. VII ежегодной конференции Нанотехнологического общества России. М.: НОР. С. 66—69.

2. **Головин Ю.И.** Введение в нанотехнику. М.: Машиностроение, 2007. 496 с.

3. **Кобаяси Н.** Введение в нанотехнологию / пер. с японск. М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2008. 134 с.

4. **Ивасышин Г.С.** Приложения квантовой механики. Научные открытия в области микро-, нано-, пико- и фемтотрибологии // Нанотехнологии: наука и производство. 2015. № 3. С. 15—24.

5. **Ивасышин Г.С.** Приложения квантовой механики. Научные открытия в области микро- и нанотрибологии // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2015. № 11. С. 45—48.

6. **Диплом № 289:** научное открытие. Закономерность аддитивности диффузионного магнитного последствия в объемных частях и поверхностных слоях пар трения из ферромагнитных материалов и сплавов / Г.С. Ивасышин. М.: РАЕН, МААНОиИ, 2005.

7. **Диплом № 302:** научное открытие. Закономерность аддитивности водородного магнитного последствия в объемных частях трения из ферромагнитных материалов и сплавов / Г.С. Ивасышин. М.: РАЕН, МААНОиИ, 2006.

УДК 629.423 + 06

Е.А. Чеботарев, П.В. Губарев, Д.В. Глазунов, *канд-ты техн. наук*
(Ростовский государственный университет путей сообщения)
E-mail: glazunovdm@yandex.ru

Повышение надежности тяговой зубчатой передачи грузовых электровозов

Приведен обзор технологических документов, охватывающий проблему проворотов и сползаний шестерен с вала якоря тягового электродвигателя электровоза при эксплуатации. Определено отсутствие четкой связи требуемой температуры нагрева и осевого натяга. В целях повышения надежности тяговой зубчатой передачи электровоза сформированы предложения по оптимизации технологии посадки шестерен при сборке колесно-моторного блока электровоза. Проведен комплекс исследований по выбору рациональной температуры нагрева шестерен тягового двигателя НБ—418К6 при посадке на вал якоря, показавший, что для обеспечения достаточного осевого натяга шестерни (с учетом остывания шестерен до окончательной посадки) необходимо нагревать шестерню до температуры 230...265 °С.

The review of technical documents covering the issue of cranking and slipping gears from the armature shaft of traction motor of electric locomotive during the operation is provided. Lack of a clear connection to the required heating temperature and axial tension is defined. With the aim of improving the reliability of the traction gear of the locomotive is formed proposals on optimization of the technology of landing gears during Assembly of the wheel-motor block locomotive. Conducted complex research on the rational choice of heating temperature of gears traction motor NB—418K6 when landing on the armature shaft, which showed that, to ensure sufficient axial preload of the gears (taking into account cooling of gears before the final planting) is necessary to heat the gear to a temperature of 230...265 °C.

Ключевые слова: сползание шестерни, тяговый двигатель, грузовой электровоз, тяговая зубчатая передача, температура нагрева шестерни, статистические данные, документация.

Keywords: slipping gears, traction motor, electric freight locomotive, traction gear temperature gear, statistics, documentation.

Проблема внепланового ремонта грузовых электровозов с выкаткой колесно-моторного блока с косозубой передачей по причине спрессовки (сползания) и проворота малой шестерни при эксплуатации электровоза многие годы наблюдается на ряде железных дорог России, массово — с 1963 г. Анализ захода локомотивов на неплановый ремонт за последние пять лет показал, что эта проблема существует и в настоящее время (рис. 1).

В локомотивных депо Северо-Кавказской железной дороги за 2015 г. было 8 случаев сползания шестерен при пробегах от 100 до 200 тыс. км после капитального и текущего ремонтов (ТР-3). Наибольшее число проворотов и сползаний шестерен с вала якоря тягового электродвигателя отмечено в декабре—марте, т.е. в период резких колебаний температуры окружающей среды:

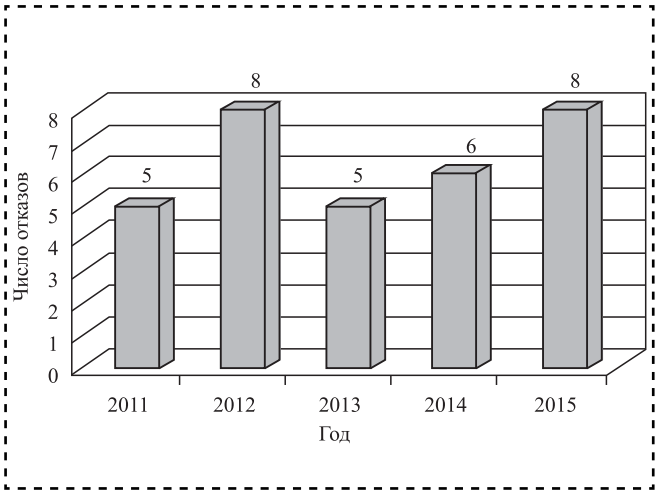

Рис. 1. Диаграмма отказов за пять лет (на примере Северо-Кавказской железной дороги)

Месяц	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII
Число спрессовок	1	2	1	0	0	0	0	1	0	0	1	2

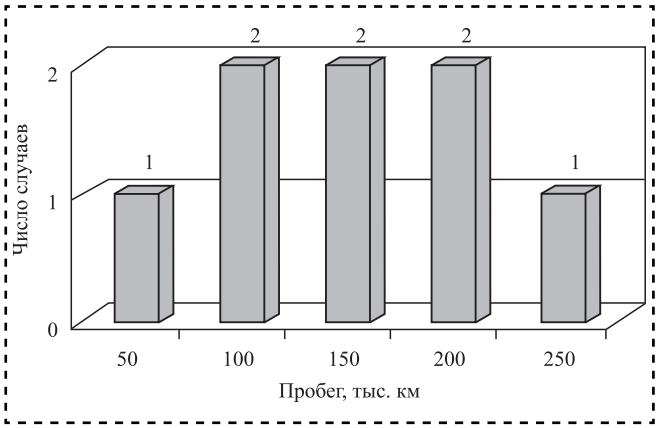

Рис. 2. Гистограмма спрессовки шестерен в зависимости от пробега

Влияние пробега на число спрессовок по данным локомотивных депо Северо-Кавказской железной дороги за 2015 г. приведено на рис. 2.

Сползание или проворот шестерен на валу якоря тягового электродвигателя происходит, как правило, из-за нарушения технологии сборки косозубой передачи колесно-моторного блока и низкого качества содержания электровозов в эксплуатации.

При ремонте колесно-моторных блоков в депо основными нарушениями являются:

— слабый натяг в результате недостаточного нагрева шестерен (часто контроль температуры нагрева определяется "на глаз");

— низкий процент прилегания посадочных поверхностей вала и шестерни;

— загрязнение и недостаточная очистка посадочных поверхностей;

— неправильность монтажа зацепления;

— многократные динамические нагрузки зацепления в момент боксования при несвоевременной подаче песка;

— перегрев шестерен при работе без смазки.

В технологической документации разных лет по рассматриваемому вопросу нет единого подхода к определению осевого натяга и необходимой для его осуществления температуры нагрева шестерни [1—4]. Проведенный анализ технических документов, разработанных Новочеркасским и Тбилисским электровозостроительными заводами, Институтом электровозостроения и ПКБ ЦТ МПС с 1970 по 2007 г. (табл. 1), показал следующее:

— в трех документах, включая и Правила ремонта электровозов, приведен только требуемый осевой натяг, а температура для его достижения не указана;

— относительные пределы отклонения натяга не соответствуют относительным пределам отклонения температуры: ТИ—187 (ПКБ ЦТ МПС, 1973 г.) для электровозов серии ВЛ8 предписывает температуру нагрева 180...200 °С (10,5 % отклонения от среднего значения); норма осевого натяга — 3,4...3,6 мм (5,7 % отклонения от среднего значения).

Таблица 1

Технологическая документация по нормам осевого натяга и температуры нагрева шестерен при посадке

Документация	Осевой натяг *H*, мм	Температура нагрева, °С
Правила заводского ремонта электровозов переменного тока: ЦТ/2631, 1970 г.	2,6...3,0	Нет указаний
Посадка шестерни на вал тягового двигателя: ЭЛ-69517. ВЭЛНИИ, 1973 г.	2,2...2,6	150...180
Технологическая инструкция на ремонт и сборку КМБ электровозов с косозубой передачей: ТИ—187, ПКБ ЦТ МПС, 1973 г., для электровозов:		
серии ВЛ80	3,4...3,6	180...200
серии ВЛ60	3,8...4,0	180...200
Правила среднего и капитального ремонта электровозов постоянного тока, ЦТ/3878, 1980 г.	2,8...3,0	Нет указаний
Технологический процесс сборки колесно-моторного блока: НЭВЗ, 1985 г.	2,2...2,6	180...200
Монтаж косозубой передачи тягового двигателя ТЛ2К: СТП 931.288.88. Тбилиси, 1988 г.	2,7...3,0	180...190
Указание ЦТЭР-12 от 14.04.1989 г. об увеличении осевого натяга для электровозов с тяговыми электродвигателями ТЛ2К: НБ-406	3,4...3,6	Нет указаний
Руководство по среднему и капитальному ремонту электровозов переменного тока: ОАО "РЖД", 2007 г.	2,7...3,0	210...245

Таким образом, технологи ремонтных заводов и локомотивных депо, а также непосредственные исполнители испытывают затруднения из-за отсутствия четкой связи требуемой температуры нагрева и осевого натяга (нет определенной температуры нагрева шестерни для получения требуемого осевого натяга).

Постоянное увеличение массы поездов и связанное с этим возрастание нагрузок на тяговые зубчатые передачи привели к резкому снижению их ресурса из-за больших статических и динамических сил, возникающих вследствие резко меняющихся скоростей движения. На электровозах ВЛ80С, 2ЭС6 "Синара" ведущие зубчатые колеса (шестерни) тяговых передач имеют ресурс 0,4...0,6 млн км, а установленный стандартом пробег должен быть 1,8 млн км. В эксплуатации бывают порчи, вызванные спрессовкой шестерен. Часто возникают затруднения со снятием шестерен с вала якоря тягового электродвигателя.

Для оптимизации технологии посадки шестерен при сборке колесно-моторного блока электровоза сформированы следующие предложения:

— для увеличения поверхности посадки шестерен на конус вала двигателя необходимо выпиливать поясок на валу якоря после притирки и на краю масляной канавки (при ее наличии) со стороны остова;

— целесообразно снимать пояски на малой шестерне после ее притирки вместо выпиливания вала, так как срок службы валов тяговых двигателей в несколько раз больше срока службы шестерен;

— обезжиривать посадочные поверхности бензином.

Правилами заводского ремонта электровозов переменного тока предусмотрен осевой натяг 2,6...3,0 мм. Для его обеспечения необходимо знание относительной температуры нагрева $T - T_в$.

Заданный натяг определяют по формуле

$$H = \frac{\alpha d \left(T - T_в\right)}{c},$$

где T — температура нагрева шестерни, °С;

$T_в$ — температура холодного вала, °С;

α — температурный коэффициент линейного расширения материала шестерни, $0{,}132 \cdot 10^{-4}$ °С$^{-1}$;

d — минимальный диаметр отверстия шестерни (рис. 3), мм;

c — конусность посадочной поверхности, $c = (d_{max} - d_{min})/2l$.

Температура нагрева, рассчитанная для натяга 2,6...3,0 мм, составляет 206...235 °С (без учета остывания шестерни в момент переноса от нагревателя к двигателю).

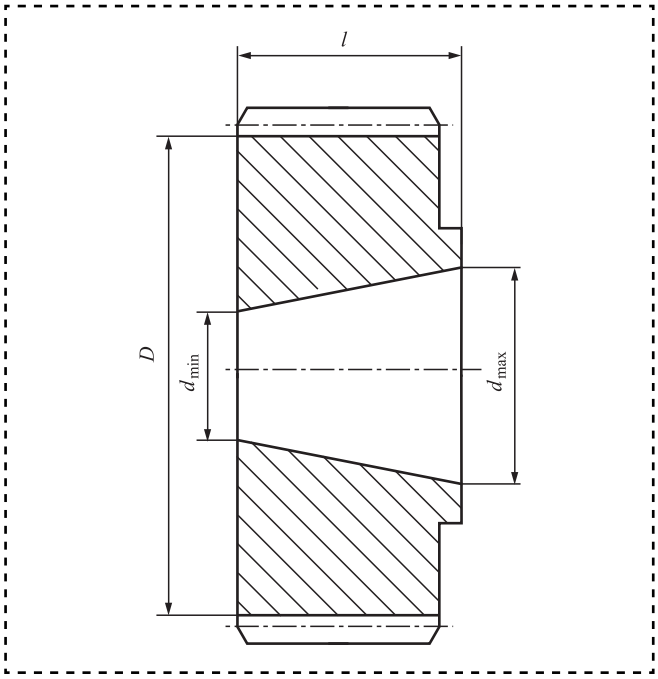

Рис. 3. Посадка шестерни на вал двигателя

Вместе с тем технология посадки шестерен, разработанная на Новочеркасском электровозостроительном заводе, требует нагревать шестерни до температуры 150...180 °С (см. табл. 1). Такой нагрев может создать осевой натяг 1,81...2,23 мм. Следовательно, соответствующие требования Правил заведомо невыполнимы.

В табл. 2 приведены результаты расчета температуры нагрева малой шестерни для некоторых серий электровозов по заданному значению натяга. Указан минимальный диаметр конической посадочной поверхности вала якоря и шестерни, поскольку именно этот диаметр ограничивает смещение нагретой шестерни относительно якоря (осевой натяг), и температуры шестерни непосредственно в момент посадки на вал якоря. Если принять $T_в$ = 20 °С, то шестерню следует нагревать до температуры 206...235 °С. Однако технологический процесс посадки шестерни на вал якоря при ремонте

Таблица 2

Результаты расчетов температуры нагрева шестерен

Серия электровоза	ВЛ10	ВЛ80С	2ЭС6
Минимальный диаметр, мм	129,1	105,48	105,48
Осевой натяг по правилам ремонта, мм	2,8...3,0	2,8...3,0	2,2...2,6
Расчетная температура, °С	184...196	206...235	150...180

предусматривает ряд операций, выполняемых после нагрева шестерен. Наблюдения в депо показали, что от конца нагрева в индукционном нагревателе до окончательной посадки шестерен на вал якоря проходит около одной минуты. За это время шестерня остывает на 25...30 °С (рис. 4).

Поэтому для обеспечения требуемого Правилами осевого натяга шестерни необходимо нагреть до большей температуры, чем предусмотрено технологией на 25...30 °С, т. е. до температуры 230...265 °С.

Типовой технологический процесс термической обработки шестерен из стали 20ХН3А, внедренный на Новомихайловском филиале РЭРЗ, предусматривает следующие операции: нормализацию, цементацию с глубиной науглероживания 2,2...2,8 мм, первую и вторую закалки, а также отпуск в течение 8 ч при температуре 150...200 °С. Окончательная твердость рабочей поверхности зубьев шестерни (58 ± 3) HRC.

Для оценки влияния температуры нагрева шестерни на твердость в лаборатории РЭРЗ проведено испытание на образцах из стали 20ХН3А, изготовленных Новомихайловским филиалом РЭРЗ и прошедших предусмотренную для шестерен тяговых передач термическую обработку. Проверяли твердость поверхностного (цементированного) слоя и сердцевины образцов до и после нагрева в термическом шкафу с выдержкой в течение 20 мин партиями по три образца от 200 до 320 °С с интервалом 20 °С. Нагрев шестерни вплоть до температуры 260 °С вызывает снижение твердости закаленного слоя не более чем на одну единицу HRC, что лежит в допустимых пределах:

Температура нагрева, °С	200	220	24	260	280	300	320
Снижение твердости, HRC	0	0,2	0,2	0,8	2,2	3,1	3,5

Влияние температуры нагрева на твердость стали 20ХН3А представлено на рис. 5. При этом зафиксировано наибольшее снижение средней твердости поверхностного (цементированного) слоя на 3,5, а сердцевины на 3,0 HRC.

Статистическая обработка данных кривой охлаждения позволяет определить температуру шестерни в любой момент времени (см. рис. 4). Это дает возможность прогнозировать температуру шестерни в момент ее посадки.

Для представления зависимости $T(t)$ в аналитическом виде воспользуемся методом математической статистики. С этой целью экспериментальным путем получим данные для обработки. Интервал замера температуры охлаждения шестерни принимаем равным 0,5 мин:

Время, мин	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0
Температура, °С	278	256	238	230	225	222	220

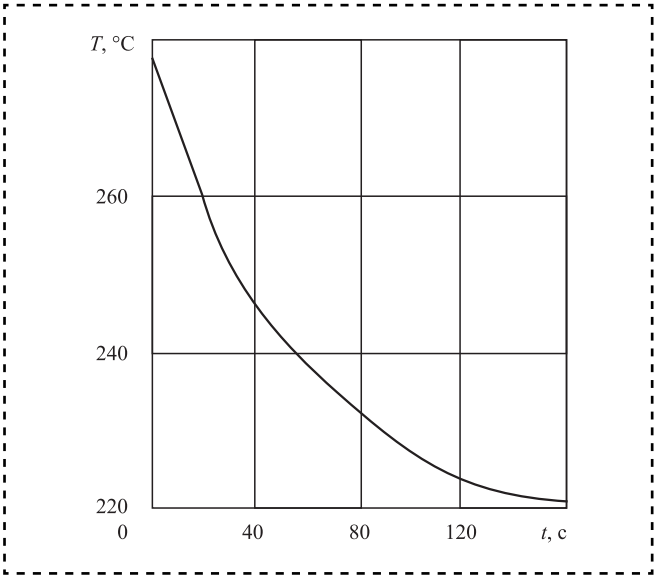

Рис. 4. Кривая охлаждения шестерни

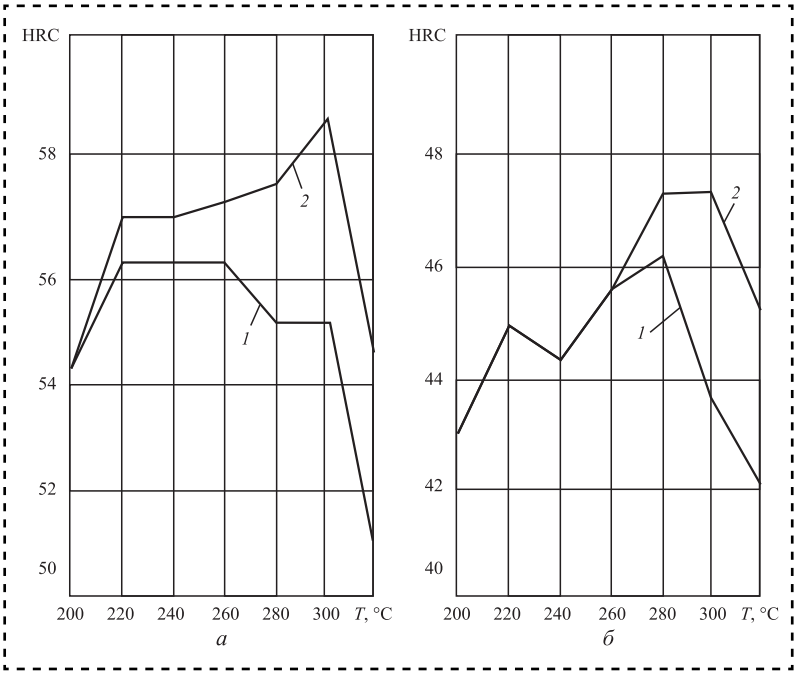

Рис. 5. Влияние температуры нагрева на твердость стали 20ХН3А до нагрева (*а*) и после нагрева (*б*):
1 — поверхностный слой; *2* — сердцевина

Таблица 3

Результаты расчетов

Зависимость	Формула	*A*	*B*	*r*
Квадратичная	$T^2 = A + Bt$	15,979	−0,4335153	−0,927619
Логарифмическая	$T = A + B \ln t$	239,96	−20,15	−0,990424
Экспоненциальная	$T = A \cdot e^{Bt}$	255,6	−0,0564861	−0,931381
Степенная	$T = t^B$	239,6	−0,0850199	−0,993749

Аналитическую зависимость $T(t)$ определяем в следующем виде:

$$T = A + B \ln t.$$

Результаты расчетов сведены в табл. 3.

Близость связи T с t в каждом из приведенных случаев можно оценить с помощью коэффициента корреляции r, который может меняться от 0 для независимых случайных величин до единицы (по модулю), если случайные величины связаны функциональной зависимостью. Близость коэффициента корреляции к единице означает, что выбранная зависимость хорошо согласуется с экспериментальными точками (в нашем случае это степенная зависимость).

Корреляционную зависимость между названными величинами определим по методике линейной корреляции.

Выводы

1. Проведен обзор технологических документов, охватывающий проблему проворотов и сползаний шестерен с вала якоря тягового электродвигателя электровоза при эксплуатации. Определено отсутствие четкой связи требуемой температуры нагрева и осевого натяга.

2. В целях повышения надежности тяговой зубчатой передачи электровоза сформированы предложения по оптимизации технологии посадки шестерен при сборке колесно-моторного блока электровоза.

3. Проведен комплекс исследований по выбору рациональной температуры нагрева шестерен тягового двигателя НБ-418К6 при посадке на вал якоря, показавший, что для обеспечения достаточного осевого натяга шестерни (с учетом остывания шестерен до окончательной посадки) необходимо нагревать шестерню до температуры 230...265 °С.

Библиографический список

1. **Руководство** по среднему и капитальному ремонту электровозов переменного тока. М.: ОАО "РЖД", 2007. 206 с.

2. **Правила** текущего ремонта и обслуживания электровозов переменного тока. М.: МПС РФ, 1999. 269 с.

3. **Николаев А.Ю., Сесявин Н.В.** Устройство и работа электровоза ВЛ80С: учеб. пособие / под ред. А.Ю. Николаева. М.: Маршрут, 2006. 512 с.

4. **Губарев П.В., Глазунов Д.В., Мищихина Е.С.** Анализ системы ремонта и диагностики локомотивов по фактическому состоянию // Труды междунар. научно-практич. конф. "Транспорт-2013". Р/нД.: Ростовский государственный университет путей сообщения. 2013. С. 143—144.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
Адрес электронной почты издательства: **mashpubl@mashin.ru**;
редакции журнала: **sborka@mashin.ru, http://www.mashin.ru.**
Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 268-48-97.
Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 08.06.2017. Подписано в печать 31.07.2017. Формат 60 × 88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз". Сайт: **www.aov.ru**
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.

ИнМаш

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

ИЗДАТЕЛЬСТВО ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ

107076, Россия, Москва,
Колодезный пер., 2а
Тел.: (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru

WWW.MASHIN.RU