

ЖУРНАЛ ВЫХОДИТ ПРИ СОДЕЙСТВИИ МЕЖДУНАРОДНОГО СОЮЗА МАШИНОСТРОИТЕЛЕЙ

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

2021 Том 22
10 (255)

СОДЕРЖАНИЕ

Технологичность конструкции

- Кутенкова Е.Ю., Ларина Т.В. Особенности обработки на технологичность изделия в сборе 435
- Фадюшин Д.В., Волков Г.Ю. Подводящие каналы в плане тарных роторных гидро- и пневмомашин, с числами в ольн центральных колес, отличающимися на единицу 438

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

- Барчуков Д.А., Зоренко Д.А., Афанасьев Л.Е. Моделирование температурных полей при газолазерной резке быстрорежущей стали 445
- Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В., Дьяков В.И. Анализ качественных свойств транспортных средств 448
- Дубовик Е.А. Контроль гильз блока цилиндров автомобиля КамАЗ-740 452
- Зарубин В.П., Иванов В.Е., Пучков П.В. Повышение надежности и долговечности деталей пожарных насосов методами упрочняющей обработки 458

Трение и смазка в машинах и механизмах

- Измайлов В.В., Новоселова М.В., Афанасьева Л.Е. Микрогеометрия поверхностного слоя изделия из сплава титана, синтезированного электронным лучом 461
- Шишкарев М.П. Анализ и синтез модернизированной адаптивной фрикционной муфты второго поколения 466
- Киселев В.В., Иванов В.Е. Повышение надежности и долговечности зубчатых колес главной передачи пожарных автомобилей за счет улучшения триботехнических характеристик трансмиссионных масел 475

В помощь конструктору, технологу

- Житников Ю.З., Житников Б.Ю., Золотарева О.В., Максимова М.И. Упрочнение поверхностного слоя при дробеструйном наклепе 478

Журнал распространяется по почте, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" — 84967) или непосредственно в издательстве
Тел.: 8 (499) 269-54-98, 269-54-96
E-mail: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>
Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Сборка в машиностроении, приборостроении", допускаются только с разрешения редакции и со ссылкой на источник информации.

Председатель редакционного совета

В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

В.И. ЛЫСАК, академик РАН

ИЖЕВСК

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

КАЗАНЬ

Р.И. АДГАМОВ, д.т.н., проф.

КОВРОВ

Ю.З. ЖИТНИКОВ, д.т.н., проф.

КОМСОМОЛЬСК-НА-АМУРЕ

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

НИЖНИЙ НОВГОРОД

С.В. ГОЛУБЕВ, инж.

ОРЕЛ

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

ОРЕНБУРГ

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

ПЕРМЬ

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

РОСТОВ-НА-ДОНУ

А.А. РЫЖКИН, д.т.н., проф.
И.В. КОЛЕСНИКОВ, д.т.н., проф.
А.П. СЫЧЕВ

РЫБИНСК

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

САМАРА

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

САНКТ-ПЕТЕРБУРГ

Е.В. ШАЛОБАЕВ, к.т.н., проф.

ТОМСК

А.В. КОЛУБАЕВ, д.ф.-м.н.
В.Е. ПАНИН, академик 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. БАСИНОК, 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.

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



IN MECHANICAL ENGINEERING AND INSTRUMENT-MAKING

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

2021 Vol. 22
10 (255)

CONTENTS

Manufacturability of a construction

- Kutenkova E.Yu., Larina T.V.** Features of testing for the manufacturability of the product in the assembly 435
- Fadyushin D.V., Volkov G.Yu.** Supply channels in planetary rotary hydraulic and pneumatic machines with central wheel wave numbers different by unit 438

Quality assurance. Testing. Monitoring

- Barchukov D.A., Zorenko D.A., Afanasieva L.E.** Simulation of temperature fields at gas-laser cutting of high-speed steel 445
- Dykov I.F., Moiseev Yu.V., Dyakov V.I.** Analysis of qualitative properties vehicles 448
- Dubovik E.A.** Control of the cylinder liners of the KamAZ-740 CAR 452
- Zarubin V.P., Ivanov V.E., Puchkov P.V.** Development of technical solutions for restoring the operability of pressure fire hoses 458

Friction & lubrication in machines and mechanisms

- Izmailov V.V., Novoselova M.V., Afanasieva L.E.** Microgeometry of the surface layer of the workpiece made of electron beam synthesized titanium alloy 461
- Shishkarev M.P.** Analysis and synthesis of the upgraded adaptive friction clutches of the second generation 466
- Kiselev V.V., Ivanov V.E.** Improving the reliability and durability of the gear wheels of the main transmission of fire trucks by improving the tribotechnical characteristics of transmission oils 475

Industrial and design engineer's aid

- Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu., Zolotareva O.V., Maksimova M.I.** Strengthening of the surface layer during shot blasting 478

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

Editors

MOSCOW

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

Regional editors

VLADIVOSTOK

Yu.N. KULSHIN
A.A. SUPONIA

VOLGOGRAD

V.I. LYSAK

IZHEVSK

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

KAZAN

R.I. ADGAMOV

KOVROV

Yu.Z. ZHITNIKOV

KOMSOMOLSK-ON-AMUR

B.N. MARJIN
A.M. SHPILEV

NIZHNY NOVGOROD

S.V. GOLUBEV

OREL

Yu.S. STEPANOV
G.A. KHARLAMOV

ORENBURG

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

PERM

S.M. BELOBORODOV
V.F. MAKAROV

ROSTOV-ON-DON

A.A. RYZHKIN
I.V. KOLESNIKOV
A.P. SYCHEV

RYBINSK

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

SAMARA

Yu.A. VASHUKOV
M.A. EVDOKIMOV

ST.-PETERSBURG

E.V. SHALOBAEV

TOMSK

A.V. KOLUBAEV
V.E. PANIN

TULA

A.A. MALIKOV
V.V. PREYS

KHABAROVSK

V.I. SCHPORT

Belarus

MINSK

V.L. BASINJUK
M.L. KHEIFETZ

GOMEL

V.E. STARZHINSKI

Ukraine

KIEV

A.S. ZENKIN
V.A. MATVINENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

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

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

Е.Ю. Кутенкова, Т.В. Ларина

(Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск)

E-mail: larina_t_v@mail.ru

Особенности отработки на технологичность изделия в сборе

Рассмотрены основные задачи, решаемые при отработке на технологичность изделия в сборе, а также количественные и качественные показатели технологичности, используемые в сборочном производстве.

Considered are the main tasks that are solved during testing for the manufacturability of the assembled product, as well as quantitative and qualitative indicators of manufacturability used in assembly production.

Ключевые слова: технологичность, отработка на технологичность, количественные и качественные показатели технологичности.

Keywords: manufacturability, testing for manufacturability, quantitative and qualitative indicators of manufacturability.

Задача обеспечения технологичности изделий на всех стадиях жизненного цикла относится к категории наиболее важных и сложных, которые необходимо постоянно решать в ходе изготовления продукции (рисунок) [1–3].

Выводы о технологичности изделия делаются на основе существующих качественных и количественных оценок.

Качественная оценка:

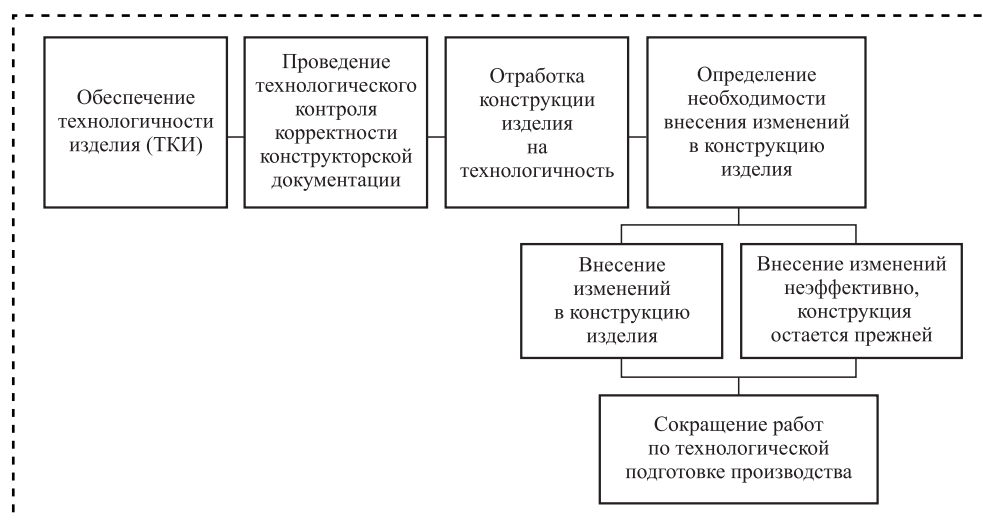
а) предшествует, входит в состав и подытоживает количественную оценку;

б) характеризует технологичность обобщенно, на основе опыта и соответствующих рекомендаций;

в) требует, прежде всего, глубоких практических знаний;

г) субъективна (зависит от квалификации специалиста, дающего оценку) и потому носит приближенный характер.

Примеры качественной оценки: "технологично — нетехнологично"; "лучше — хуже"; "рекомендуется — не рекомендуется", "рационально — нерационально" [4].



Задачи, решаемые при отработке изделия на технологичность



Кроме того, качественные показатели технологичности определяются при ответе на вопросы, касающиеся непосредственно производственных процессов сборки:

- возможен ли технологический процесс сборки при неизменном базировании;
- обеспечивает ли конструкция сборочной единицы (СЕ) применение механизированного сборочного инструмента;
- обеспечивает ли конструкция СЕ возможность применения автоматизированной сборки;
- расчленяется ли СЕ на рациональное число составных частей;
- возможно ли сборку с пригонкой заменить на более рациональный вид сборки;
- обеспечивает ли конструкция СЕ сборочный процесс без лишних разборок;
- возможно ли использовать высокопроизводительные методы сборки.

Количественная оценка технологичности была впервые предложена и обоснована в 1946 г. Н.А. Бородачевым. При этом рекомендовалось использовать как абсолютные (например, трудоемкость изготовления изделия, технологическая себестоимость изделия), так и относительные показатели (например, удельная материалоемкость, удельная себестоимость).

Количественная оценка:

а) рассчитывается по методикам, общепринятым для определенного круга специалистов, и потому объективнее, чем качественная оценка, так как меньше зависит от квалификации "оценщика";

б) достаточно точна, но трудоемка;

в) возможна автоматизация определения в отличие от качественной [1–4].

Рекомендации по расчету показателей для количественной оценки технологичности

Показатели технологичности и рекомендации по расчету показателей технологичности

Показатели	Стадии разработки				
	Эскизный проект	Технический проект	Рабочая документация для		
			опытного образца	установочной серии	серийного производства
Сухая масса изделия M , кг	0	0	0	•	•
Трудоемкость изготовления изделия T , чел.-ч	0	0	0	•	•
Технологическая себестоимость изделия C , руб.	0	0	0	•	•
Удельная трудоемкость изготовления изделия t , чел.-ч/ X^*	0	0	0	•	•
Удельная технологическая себестоимость изделия c , руб./ X^*	0	0	0	•	•
Удельная материалоемкость изделия $K_{у,м}$, кг/ X^*	0	0	0	•	•
Коэффициент использования материала $K_{и,м}$	0	0	0	•	•
Коэффициент унификации изделия K_y	—	—	•	•	•
Коэффициент повторяемости $K_{пов}$	—	0	•	•	•
Коэффициент унификации марок материала K_m	—	0	•	•	•
Коэффициент рационального формообразования заготовок $K_{р,ф}$	—	0	•	•	•
Коэффициент эффективности взаимозаменяемости $K_{в,з}$	—	0	•	•	•
Коэффициент регулировочных и юстировочных работ $K_{р,ю}$	—	0	•	•	•
Коэффициент сборности $K_{с,б}$	—	0	•	•	•
Коэффициент сложности настройки электрической схемы $K_{н,э}$	—	0	•	•	•

Примечания: X^* — размерность основного технического параметра изделия, которым называется один из его параметров, характеризующий наиболее существенные конструктивные и эксплуатационные свойства.
 Знак "•" означает, что определение показателя обязательно подробным расчетом, знак "0" — определение показателя укрупненным расчетом, знак "—" — для данной стадии разработки конструкторской документации не определяется значение показателя.



и обязательность определения показателей технологичности в зависимости от стадии разработки конструкторской документации приведены в таблице.

При отработке на технологичность изделия в сборе чаще всего рассчитывают следующие количественные показатели:

— трудоемкость сборки по нормативам времени;

— удельную трудоемкость сборки t , отнеся к основному параметру, например, к разрешающей способности объектива:

$$t = \frac{T}{P},$$

где T — трудоемкость сборки СЕ;

P — разрешающая способность объектива, например, 120 штрихов/мм;

— коэффициент унификации изделия K_y :

$$K_y = \frac{D_{ye} + E_y}{D + E},$$

где E_y — число унифицированных СЕ;

D_{ye} — число унифицированных деталей, не вошедших в унифицированные СЕ;

E — число СЕ в изделии;

D — число деталей в изделии;

— коэффициент повторяемости $K_{пов}$:

$$K_{пов} = \frac{e + d}{E + D},$$

где e — число наименований СЕ;

d — число наименований деталей;

— коэффициент эффективности взаимозаменяемости $K_{в.з}$:

$$K_{в.з} = 1 - \frac{E_{пр} + E_c}{E},$$

где $E_{пр}$ — число СЕ с пригоночными работами;

E_c — число СЕ, требующих селекции;

— коэффициент сборности $K_{сб}$:

$$K_{сб} = \frac{E}{E + D_c},$$

где D_c — число деталей, не вошедших в состав унифицированных СЕ [5].

Рассчитанные показатели необходимо сравнить с показателями прибора или СЕ аналога, и на основе этого сделать окончательный вывод о технологичности изделия и необходимости внесения корректировок в конструкцию и конструкторскую документацию, в случае, если это будет экономически целесообразно.

Библиографический список

1. **Панков Е.А., Ларина Т.В., Кутенкова Е.Ю.** Повышение технологичности конструкции транспортного самолета // Интерэкспо ГЕО-Сибирь-2016: XII Междунар. науч. конгр.: Междунар. науч. конф. "СибОптика-2016": сб. материалов в 2 т. Новосибирск: СГУГиТ, 2016. Т. 1. С. 100–104.
2. **Шлишевский Б.Э., Кутенкова Е.Ю.** Отработка на технологичность изделий, обрабатываемых на станках с ЧПУ, как элемент системного подхода // Инженерэкспо "ГЕО-Сибирь-2007" III Междунар. науч. конгр. Новосибирск: СГГА, 2007. Т. 4. Ч. 1. С. 118–122.
3. **Схема** решения технологической задачи как объект исследования / П.В. Петров, Е.Ю. Кутенкова // XLVI научно-техн. конф. преподавателей СГГА, посвящ. 30-летию опт. фак.: тез. докл. Новосибирск: СГГА, 1996. Ч. 1. С. 76.
4. **Петров П.В., Кутенкова Е.Ю.** Технология приборостроения. Отработка чертежей деталей на технологичность: метод. указ. по выполнению практ. работы. Новосибирск: СГУГиТ, 2020. 67 с.
5. **Кутенкова Е.Ю., Петров П.В.** Технология сборки оптических приборов. Сборка механических узлов: курс лекций. Новосибирск: СГУГиТ, 2017. 100 с.



Д.В. Фадюшин, Г.Ю. Волков, д-р техн. наук
(Курганский государственный университет)
E-mail: fadyushin_87@mail.ru

Подводящие каналы в планетарных роторных гидро- и пневмомашинах, с числами волн центральных колес, отличающимися на единицу*

Рассмотрены физические критерии, ограничивающие размеры каналов, в том числе условия, исключаящие перетекание среды между соседними камерами "под сателлитом". Проведено сравнение вариантов выполнения каналов: в торцовой стене эпицикла; в торцовой стене солнечной шестерни; в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни. Уточнены расчетные критерии, характеризующие относительные размеры каналов. Для любых планетарных роторных машин с числом волн N эпицикла, превышающим число волн M солнечной шестерни на два ($N - M = 2$), каналы следует располагать на торцах эпицикла, но с $N - M = 1$ относительные сечения каналов в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни получаются значительно больше, чем в торцовой стене эпицикла, поэтому для планетарных роторных машин с небольшим давлением среды, например вакуумных насосов, каналы целесообразно выполнять в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни.

The physical criteria limiting the size of the channels, including the conditions excluding the flow of the medium between adjacent cameras "under the satellite", are considered. The comparison of the variants of the channels execution is carried out: in the end wall of the epicycle; in the end wall of the sun gear; in the cylindrical toothed surface of the sun gear. The design criteria that characterize the relative sizes of the channels have been refined. For any planetary rotary machines with the number of waves N of the epicycle, which exceeds the number of waves M of the sun gear by two ($N - M = 2$), the channels should be located at the ends of the epicycle, but with $N - M = 1$ the relative cross-sections of the channels in the cylindrical toothed surface of the sun gear are much larger than in the end wall of the epicycle, therefore, for a planetary rotary machines with a low pressure of the medium, for example, vacuum pumps, it is advisable to make the channels in the cylindrical toothed surface of the sun gear.

Ключевые слова: планетарные роторные машины, подводящие каналы, некруглые зубчатые колеса.

Keywords: planetary rotary machines, supply channels, non-circular gears.

Введение

Планетарно-роторные машины (ПРМ) с плавающими сателлитами — это вид объемных гидро- и пневмомашин, не получивший пока широкого распространения из-за сложности изготовления некруглых зубчатых колес традиционными механическими методами. Развитие технологий делает актуальным более глубокое изучение таких машин.

Одна из схем ПРМ показана на рис. 1 [1]. Эта машина содержит некруглое центральное зубчатое колесо 1 с внешними зубьями (солнеч-

ную шестерню), некруглое центральное зубчатое колесо 2 с внутренними зубьями (эпицикл), а также взаимодействующие с ними плавающие сателлиты 3. Каналы 4 подвода и отвода рабочей среды выполнены в торцовой стенке, жестко связанной с эпициклом 2. При работе гидромашин в определенный момент они полностью перекрыты сателлитами. Число волн солнечной шестерни $M = 4$, а число волн эпицикла $N = 6$, т.е. $N - M = 6 - 4 = 2$. Схемы с разницей чисел волн $N - M = 2$ хорошо работают на несжимаемых рабочих средах (жидкостях). Эффективному использованию таких схем на газовых средах препятствуют большие остаточные объемы.

Меньшими остаточными объемами характеризуются схемы ПРМ с $N - M = 1$, например,

* Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ и правительства Курганской области в рамках научного проекта № 19-48-450001.

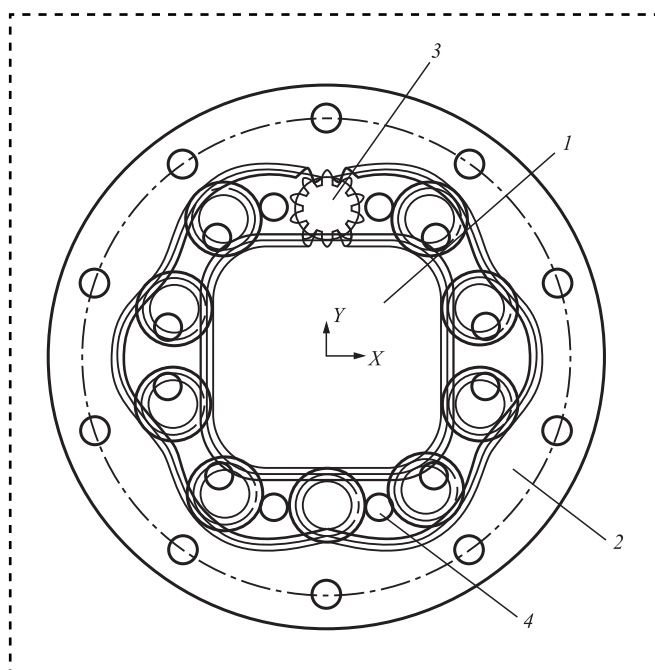


Рис. 1. ПРМ схемы 4-6 [1]

$3 - 2 = 1$ (рис. 2). Однако проблема в том, что в схемах $N - M = 1$ каналы в торцевых стенках эпицикла будут иметь существенно меньшую площадь сечения, чем в схемах $N - M = 2$.

Цель работы — проанализировать возможности улучшения коммутации рабочей среды в ПРМ и обеспечить достаточно большие каналы в схемах $N - M = 1$.

Относительные критерии размера каналов

Для того чтобы предметно говорить об эффективности коммутации рабочей среды, нужно

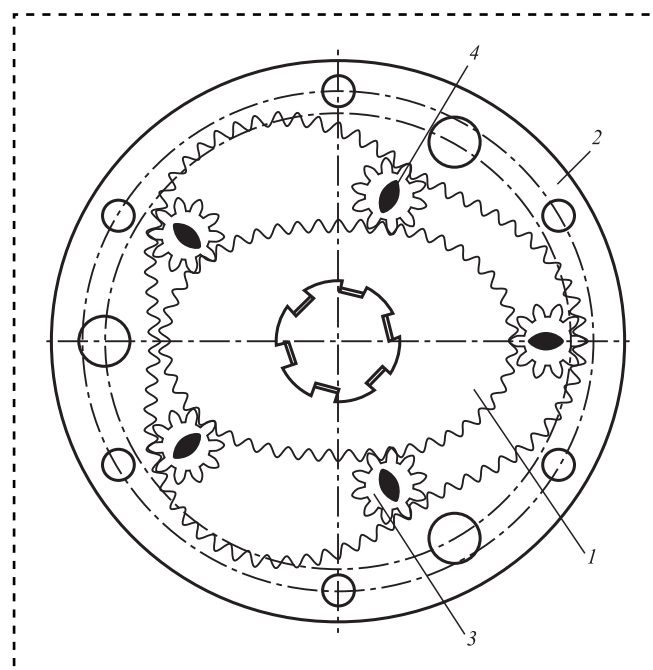


Рис. 2. ПРМ схемы 3-2:

1 — солнечная шестерня; 2 — эпицикл; 3 — сателлиты; 5 — каналы

располагать объективными количественными критериями. Один из таких критериев — безразмерный коэффициент $K_{SS} = S_{KiN}^P / S_{Wi}$ — отношение площади S_{KiN}^P сечения канала к полезной площади S_{Wi} рабочей камеры [2, 3].

Сравнение по этому критерию ПРМ схемы 6-4 (см. рис. 1) и схемы 3-2 (см. рис. 2) при характерных параметрах механизма: числе зубьев сателлита $Z_3 = 10$ и угле его "удержания" $\lambda_{1max} = 41^\circ$ — показывает, что во второй схеме относительная площадь сечения каналов в 14 раз (0,40/0,029) меньше, чем в первой [3]. Данные по другим схемам приведены в таблице.

Относительные показатели размера каналов ПРМ

Схема	Каналы в торце "N"				Каналы в цилиндре "M"
	K_{SS}	K_{WS}			
		$\psi_{bd} = 0,1$	$\psi_{bd} = 0,25$	$\psi_{bd} = 0,4$	K_{WS} при $Z_2 = 60...80$
6-4	0,40	0,25	0,62	0,99	—
6-5	0,10	0,99	2,5	4,0	0,61...0,81
5-4	0,086	1,16	2,9	4,6	0,88...1,17
4-3	0,065	1,55	3,9	6,2	1,37...1,83
3-2	0,029	3,48	8,7	14,0	2,44...3,25
2-1	0	∞	∞	∞	5,5...7,3

Недостаток критерия K_{SS} состоит в том, что он носит условный характер и годится только для сравнения между собой ПРМ с каналами на торцевой поверхности эпицикла (индекс N).

Более информативным является отношение объема W_i камеры к площади S_{Ki} сечения канала, через который происходит истечение среды. Объем W_i камеры, помимо полезной площади S_{Wi} ее сечения, зависит от ширины b этой камеры $W_i = S_{Wi}b$. Этот критерий имеет размерность длины. Чтобы перейти к безразмерному формату, разделим все на средний начальный диаметр D_{2W} эпицикла:

$$K_{WS} = \frac{S_{Wi}b}{S_{Ki}D_{2W}} = \frac{S_{Wi}\psi_{bd}}{S_{Ki}} = \frac{\psi_{bd}}{K_{SS}}, \quad (1)$$

где ψ_{bd} — коэффициент ширины камеры, $\psi_{bd} = b/D_{2W}$.

Условно-физический смысл критерия K_{WS} — это высота "столба" рабочей среды, сечение которого соответствует сечению канала, отнесенная к диаметру эпицикла. Значения критерия K_{WS} при $\psi_{bd} = 0,1; 0,25; 0,4$ приведены в таблице. Очевидно, что чем шире камера, тем больший объем рабочей среды должен пройти через сечение канала в торцевой стенке эпицикла за один цикл работы ПРМ.

Условия, ограничивающие размеры каналов

В некоторых работах предложено разместить каналы в торцевой стенке, жестко связанной с солнечной шестерней, и выполнить их шире сателлитов (рис. 3) [4]. Очевидно, что подобным образом можно было бы поступить и в случае схем $N - M = 1$. Однако анализ показывает, что такое техническое решение не работоспособно.

Рассмотрим принципиальные моменты, накладывающие ограничения на параметры подводящих каналов ПРМ.

1. Если речь идет о несжимаемых средах (жидкостях), то не должно быть замкнутых объемов, когда оба канала — подводящий и отводящий среду к камере — одновременно закрыты. Для газообразных сред выполнение данного условия не обязательно.

2. Как для жидкостей, так и для газов недопустимо, чтобы в одну рабочую камеру одновременно были открыты и входной и выходной каналы. Выполнение этого условия зависит от углового расстояния δ между граничными

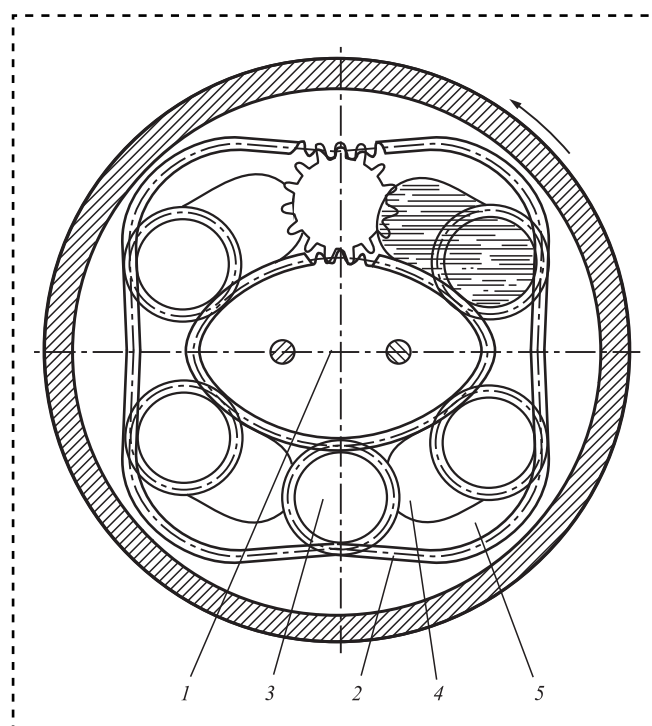


Рис. 3. Роторная гидромашинa схемы 4-2 [4]:

1 — солнечное колесо с внешними зубьями; 2 — солнечное колесо с внутренними зубьями; 3 — сателлиты; 4 — диски; 5 — камеры

положениями сателлитов (точками A и B на рис. 4) [2]. Угол δ равен разности угла γ между каналами и угла τ между соседними сателлитами:

$$\delta = \gamma - \tau = \pi \left(\frac{1}{G} - \frac{2}{N + M} \right), \quad (2)$$

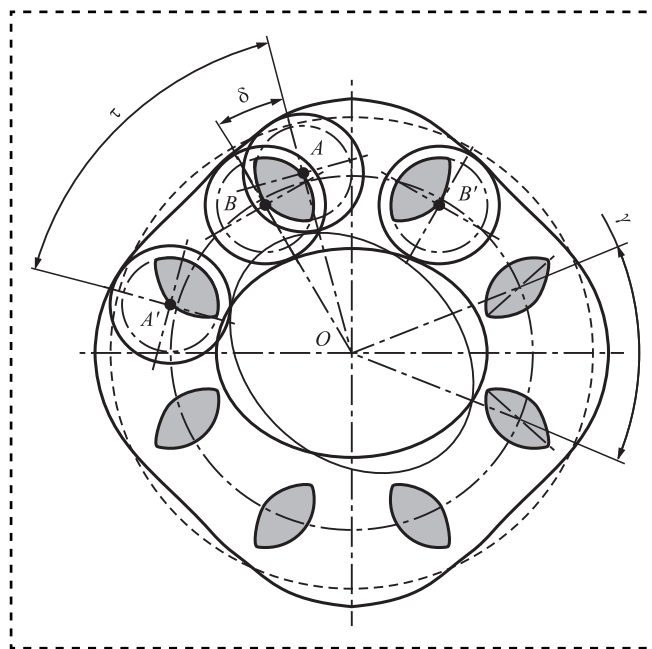


Рис. 4. К расчету размеров каналов



где G — число волн (N или M) того центрального колеса, на котором выполнены каналы.

Если каналы выполнены в торцевой стенке эпицикла, то $\gamma < \tau$, т.е. $\delta < 0$. При этом окружная протяженность канала всегда меньше диаметра сателлита (см. рис. 4). Таким образом, при расположении каналов в торцевой поверхности, связанной с эпициклическим колесом, величина угла δ ограничивает размеры каналов, а одновременное открытие входного и выходного каналов в одну камеру автоматически исключено.

В случае выполнения каналов в торце, жестко связанном с солнечной шестерней, $\delta > 0$. При этом исключение одновременного открытия входного и выходного каналов в одну камеру не препятствует сделать каналы существенно большей длины (см. рис. 3).

Однако существует еще одно ограничение размера каналов, которое ранее не учитывалось авторами работ, посвященных исследованию ПРМ.

3. Опасность перетекания рабочей среды между соседними камерами через каналы. В момент прохождения сателлита над каналом (рис. 5, *a*), не перекрываемым полностью этим сателлитом, жидкость или газ могут перетекать из камеры высокого давления в камеру низкого давления "под сателлитом" — в этом ошибка автора работы [4]. Таким образом, каналы шире сателлитов (см. рис. 3) исключают одновременное открытие входного и выходного каналов из-за перетекания рабочей среды. Фактически, канал в торце, жестко связанном с солнечной шестерней, не может быть шире, чем диаметр впадин сателлита (рис. 5, *б*). Впрочем, и по другим причинам выполнение каналов в торцевой поверхности, жестко связанной с солнечной шестерней, — это на самое лучшее техническое решение. Оно влечет существенные усложнение конструкции и ухудшение компоновки.

Из патентно-технической литературы известны конструкции ПРМ, в которых каналы выполнены не в торцевых, а в цилиндрических поверхностях зубчатых колес (рис. 6, 7) [5, 6].

Очевидно, что в гидромашинах, представленных на рис. 6 и 7, через канал, не перекрытый полностью сателлитом, рабочая среда перетекает между соседними камерами, подобно тому, как показано на рис. 5, *a*. Для того чтобы эти ПРМ были работоспособны, необходимо

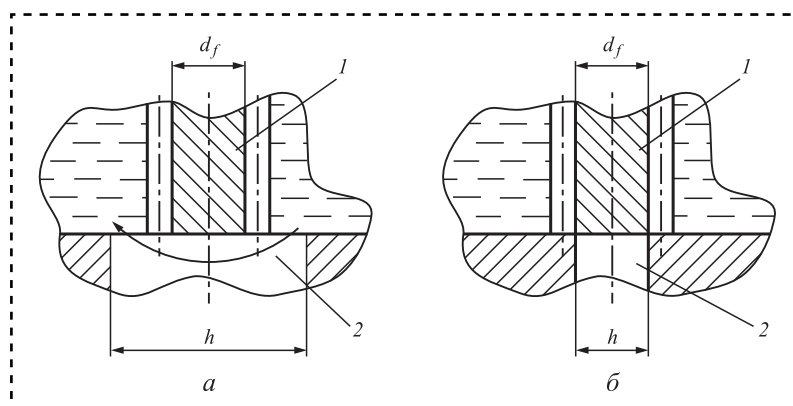


Рис. 5. Размеры каналов, выполняемых в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни:

1 — сателлит; 2 — канал

здать дополнительные параметрические ограничения.

Используем только такие каналы, которые распространяются не на всю ширину колеса, т.е. в некоторых сечениях колеса, перпендикулярных его оси, зубья сохраняются. Тогда характер движения сателлита относительно данного колеса в результате выполнения канала не изменяется.

Рассмотрим зацепление сателлита с круглым колесом, имеющим внешние зубья. Число зубьев сателлита $Z_3 = 10$, а число зубьев колеса $Z_1 = 60$ (рис. 8, *a*). При этом коэффициент смещения у сателлита $X_3 = +0,3$; а у колеса $X_1 = 0$. При удалении одного зуба колеса зубья сател-

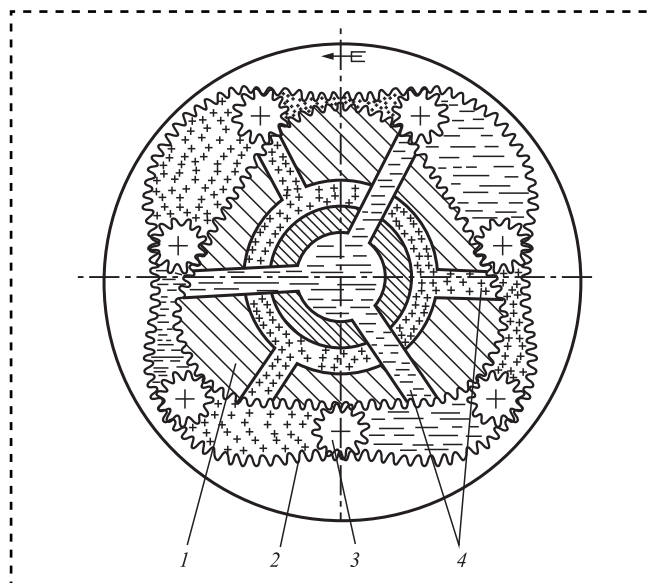


Рис. 6. Объемный роторный двигатель схемы 4-3 [5]:

1 — кулачок; 2, 4 — камеры натяжения; 3 — планетарные шестерни

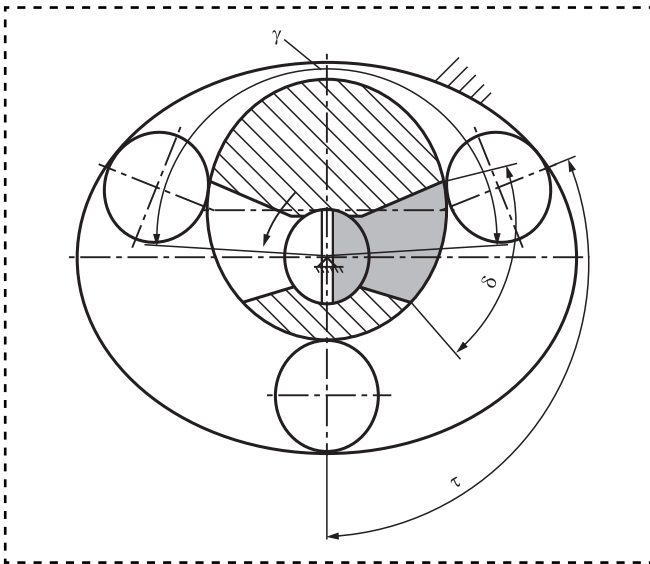


Рис. 7. ПРМ схемы 2-1 с каналами в цилиндрической части солнечной шестерни [6]

лита целиком перекрывают сектор щели: линия зацепления mn пересекает рабочую поверхность зуба сателлита (рис. 8, а). Если, сохранив прочие параметры зацепления, ввести достаточно большой положительный коэффициент смещения солнечной шестерни, например, $X_1 = +1$ (рис. 8, б), то перекрытие щели происходит не в полной мере (линия зацепления mn проходит вне вершины зуба сателлита). Присутствующий при этом зазор между зубьями сателлита и колеса весьма мал (и в ряде практических случаев им можно пренебречь).

Изменение чисел зубьев и коэффициентов смещения солнечной шестерни ПРМ и сателлита, а также то обстоятельство, что солнечная шестерня не является круглой, существенно не

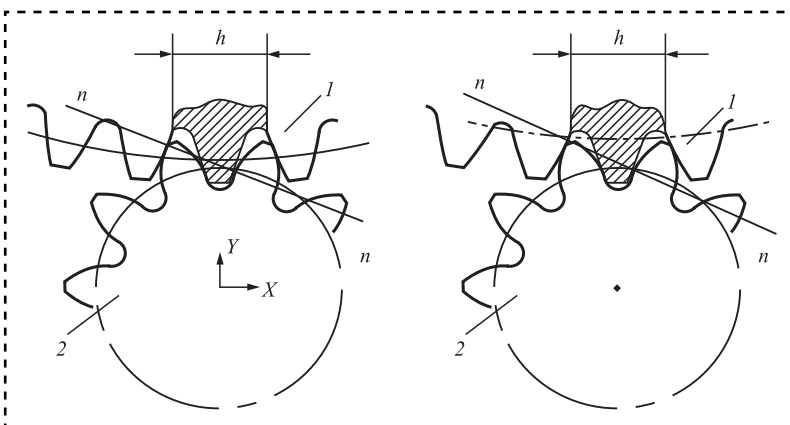


Рис. 8. "Щель", полученная удалением одного зуба колеса (солнечной шестерни):

а — $X_1 = 0$; б — $X_1 = +1$; 1 — солнечная шестерня; 2 — сателлит

вливают на условия перекрытия "щели", полученной путем удаления одного зуба.

В итоге можно считать, что канал, выполненный в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни (имеющей внешние зубья), полученный путем удаления именно одного зуба, обеспечивает достаточную герметичность рабочих камер, а канал шириной h в два зуба или более приведет к нарушению герметичности камер.

Фактически ширина канала h может захватывать обе впадины, прилежащие к "удаляемому" зубу, и быть несколько больше одного шага зубьев. Для приближенных расчетов примем: $h = 4m$, где m — модуль зуба. Канал на цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни занимает не всю ширину камеры, а например, ее половину $b/2$. Получаем площадь сечения канала $S_{Ki} = 2bm$.

Перейдем к безразмерному критерию K_{WS} :

$$K_{WS} = \frac{S_{Wi}b}{S_{Ki}D_{2W}} = \frac{S_{Wi}}{2mD_{2W}}$$

Приближенно примем начальный диаметр $D_{2W} = Z_2m$, тогда

$$K_{WS} = \frac{S_{Wi}}{2Z_2m^2}$$

Используем результаты определения относительной полезной площади S_{Wi}^1 рабочей камеры $S_{Wi} = \pi D^2 S_{Wi}^1 / 4$ [3]:

$$K_{WS} = \frac{\pi D^2 S_{Wi}^1 b}{4 \cdot 2bmD_{2W}} = \frac{\pi D S_{Wi}^1}{8m} = \frac{Z_2 S_{Wi}^1 \pi}{8} = 0,394 Z_2 S_{Wi}^1 \quad (3)$$

Для характерного диапазона чисел зубьев $Z_2 = 60 \dots 80$ результаты расчета показателя K_{WS} приведены в таблице. В случае ПРМ схемы 3-2 этот показатель составил $K_{WS} = 2,4 - 3,2$. Таким образом, выполнив каналы в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни, при относительной ширине рабочей камеры $\psi_{bd} = 0,4$ можно увеличить пропускную способность каналов (по сравнению с каналами в торце эпицикла) в 5 раз (рис. 9).

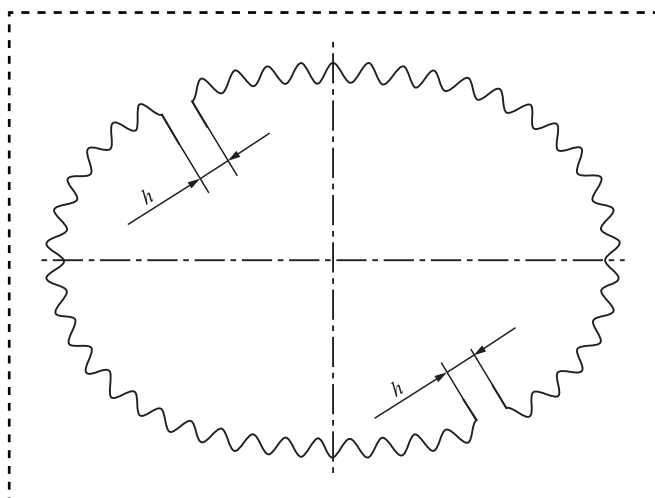


Рис. 9. Солнечная шестерня ПРМ схемы 3-2 с каналами в цилиндрической зубчатой поверхности

Расположение каналов на цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни

Рассмотрим вопрос о том, где именно должны располагаться каналы на цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни.

Найдем центральную точку C_1 канала, который выполнялся бы на торцевой поверхности, принадлежащей солнечной шестерне (рис. 10). Она находится на окружности радиуса a_w [3], при этом смещена относительно минимума циклической кривой, являющейся траекторией центра сателлита, на половину угла γ между каналами.

Через точку C_1 проводим нормаль mn к центроиде солнечной шестерни. Угол наклона λ_1 этой нормали к межосевой прямой OC_1 можно

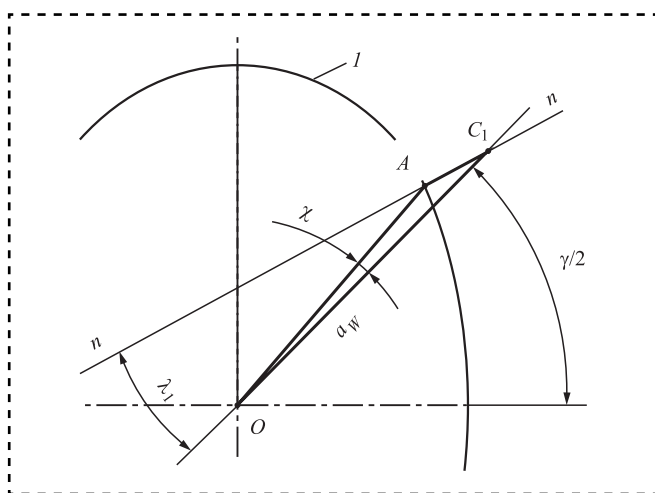


Рис. 10. Определение расположения центральной точки канала на зубчатом венце солнечной шестерни

найти через угол удержания сателлита λ_{\max} , который задается при проектировании механизма. Пренебрегая разницей между значениями углов и их тангенсами, получаем:

$$\lambda_1 \approx \frac{M\lambda_{\max}}{(M+N)}. \quad (4)$$

Точка A пересечения нормали mn с центроидой I — это искомый центр канала, выполненного на зубчатом венце солнечной шестерни, а отрезок AC_1 — начальный радиус r_{wC1} сателлита. Рассматривая треугольник AOC_1 , получаем:

$$\frac{\sin \chi_1}{r_c} = \frac{\sin(\lambda_1 + \chi_1)}{a_0}.$$

Угол χ_1 соответствует поправке, которую нужно добавить к углу $\gamma/2$ при нахождении центральной точки канала на венце солнечной шестерни. Пренебрегая разницей между значениями малых углов с их синусами, получаем:

$$\chi_1 \approx \frac{\lambda_1 r_c}{a_1 - r_c}. \quad (5)$$

Таким образом, центральная расчетная точка A канала на венце солнечной шестерни будет находиться на луче, повернутом относительно минимума траектории центра сателлита на угол $\gamma/2 + \chi_1$.

По условию невыхода двух каналов в одну полость для солнечной шестерни угол $\delta > 0$ [2, 3]. Положение реальной центральной точки A может варьироваться в пределах угла δ . Это обстоятельство будет учитываться при решении вопроса — какой именно зуб на солнечной шестерне целесообразно удалить для создания канала. Как правило — это зуб ближайший к расчетной точке A . В примере на рис. 9 центр удаляемого зуба смещен относительно расчетной точки A на расстояние, близкое к половине шага.

Заключение

Гипотетические преимущества предлагаемых некоторыми авторами схем ПРМ с каналами в торцевых стенках, жестко связанных с солнечной шестерней, нереализуемы, а по компоновочным показателям эти схемы проигрывают другим, поэтому такое расположение каналов наименее перспективно.



Для ПРМ, характеризующихся соотношением $N - M = 2$, которые используются при больших давлениях среды (например, гидромоторов), каналы следует располагать на торцах эпицикла.

Для любых ПРМ при $N - M = 1$ относительные сечения каналов в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни значительно больше, чем в торцевой стенке эпицикла. Поэтому для ПРМ с $N - M = 1$, работающих при небольших давлениях среды (например, для вакуумных насосов), каналы следует выполнять именно в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни.

Для ПРМ со средними давлениями (в частности компрессоров) следует выбирать вариант подачи рабочей среды в зависимости от конкретных условий. Возможна комбинация: на 1-й ступени — каналы в цилиндрической зубчатой поверхности солнечной шестерни; на 2-й ступени (где давления выше), чтобы не снижать прочность и жесткость зубчатого венца солнечной шестерни, каналы целесообразно располагать на торцевой поверхности эпицикла.

Библиографический список

1. Patent US 6230823 E21B 4/02; F03C 2/08; F04B 47/08; F04C 2/14. Downhole motor / Dariusz Sieniawski. Filing data 03.11.1998; publ. data 15.05.2001. 8 p.
2. Волков Г.Ю., Смирнов В.В. Повышение производительности планетарных роторных гидромашин путем последовательной сборки однотипных секций // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 5. С. 195—200.
3. Смирнов В.В. Обоснование выбора кинематических схем и совершенствование метода геометрического расчета механизмов планетарных роторных гидромашин с плавающими сателлитами: дис. ... канд. техн. наук: 05.02.02. Челябинск, 2021. 181 с.
4. Пат. 2149281 РФ, МПК F04C 2/08. Роторная гидромашинка Ан И-Кан № 19980120533; заявл. 13.11.1998; опубл. 20.05.2000; 5 с.
5. Patent US 3852002 F03C 2/08; F03C 2/22; F04C 18/10; F04C 2/10; F01C 1/42; F03C 3/00; F04C 1/16. Gyating-cam engine, particularly as a hydraulic engine / Sieniawski B. Filing data 28.11.1972; Publ data 03.12.1974. 5 p.
6. Пат. SU 861734 СССР: МПК F04C 2/06. Шестеренная гидромашинка внутреннего зацепления / Костиков Н.И., Назаров И.И., Доронин Н.Ф.; заявл. 09.01.1978; опубл. 07.09.1981. Бюл. № 33. 4 с.



ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"СБОРКА В МАШИНОСТРОЕНИИ, ПРИБОРОСТРОЕНИИ"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2

Тел.: 8 (495) 785-60-69

e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

Д.А. Барчуков, Д.А. Зоренко, канд.-ты техн. наук, Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: ludmila.a@mail.ru

Моделирование температурных полей при газолазерной резке быстрорежущей стали

Представлены результаты CAE-моделирования температурных полей при газолазерной резке с продувкой азотом. Проведена экспериментальная проверка результатов моделирования на образцах быстрорежущей стали. Показано, что проведенные исследования могут быть востребованы для оптимизации режимов газолазерной резки быстрорежущей стали.

The results of CAE-modeling of temperature fields during gas-laser cutting with nitrogen purge are presented. An experimental verification of the simulation results on high-speed steel samples is carried out. It is shown that the research carried out can be useful for optimizing the modes of gas-laser cutting of high-speed steel.

Ключевые слова: газолазерная резка, температурное поле, метод конечных элементов, быстрорежущая сталь, расчетная модель.

Keywords: gas laser cutting, temperature field, finite element method, high-speed steel, calculation model.

Введение

Газолазерная резка — одна из распространенных технологических операций заготовительного производства благодаря ряду достоинств: возможности разделения материалов независимо от их твердости, получения узких резов с небольшой зоной термического влияния, высокой производительности, автоматизации, контроле процесса и др. [1–7].

Под действием лазерного излучения происходит локальный нагрев, плавление и удаление расплава газовой струей. Процесс удаления расплава при газолазерной резке сложен и требует создания моделей, учитывающих законы газодинамики, гидродинамики, теплофизики, физики твердого тела, оптики [1–5]. Несмотря на широкое практическое использование большинство ученых считает, что технология газолазерной резки далека от полного понимания. Не существует единой модели, позволяющей учесть все особенности процесса. В связи с этим важное практическое значение имеет

моделирование различных этапов газолазерной резки, позволяющих оптимизировать технологические режимы разделения материала.

Цель работы — моделирование тепловых процессов газолазерной резки быстрорежущей стали с продувкой азотом.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Математическое моделирование выполняли с помощью системы вычислительной аэрогидродинамики FlowVision 3.8, разработанной компанией ТЕСИС. Программный комплекс работает на основе метода конечных элементов. Исходные данные: температура нагрева поверхности стали лазерным лучом 1600 °С, диаметр сфокусированного луча 0,3 мм, диаметр струи азота 2 мм, давление струи азота 0,81 МПа, толщина разрезаемой стали 5 мм, зазор между сталью и торцом сопла 3 мм.

Для проверки результатов моделирования выполняли газолазерную резку серии образ-

цов из быстрорежущей стали марки Р6М5 (ГОСТ 19265–73) размерами 120×40×5 мм, предварительно упрочненных с помощью объемной закалки и трехкратного отпуска при температуре 560 °С. Газолазерную резку выполняли на технологическом лазерном комплексе BySprint 3015 компании Bystronic на режимах: мощность излучения — 1800...3100 Вт; скорость резки — 0,017 м/с; давление вспомогательного газа азота — 0,81 МПа.

Микроструктуру стали в зоне лазерного воздействия изучали с помощью оптического микроскопа Carl Zeiss Axio Vert.A1MAT. Измерение микротвердости выполняли на приборе ПМТ-3 (ГОСТ 9450–76).

Согласно современным представлениям о процессе газолазерной резки на участке воздействия излучения металл нагревается до первоначальной температуры разрушения — температуры плавления $T_{пл}$. При дальнейшем поглощении излучения в объем материала начинает перемещаться фазовая граница плавления, возможно значительное повышение температуры расплава, его кипение и испарение [1]. Следовательно, в центральной части газолазерного реза расплавленный металл может быть нагрет до температур, значительно превышающих $T_{пл}$, однако с помощью динамического воздействия вспомогательного газа происходит удаление образовавшегося расплава и формирование поверхности реза с характерной бороздчатой структурой. Качество газолазерной резки зависит от характера распыления жидкого расплава и процесса его удаления [6]. Температурное влияние луча лазера на поверхность и давление струи газа — основные воздействующие факторы при разделении материала.

На рис. 1, а (на стр. 3 обложки) представлены результаты моделирования распределения температуры при первоначальном контакте луча с поверхностью заготовки, на рис. 1, б при заглаблении луча лазера на 3 мм. Временной интервал резки равен 1 с. Полученная модель позволяет отслеживать основные параметры и их временные изменения, приближенно описывать процесс без проведения сопряженных вычислений.

На рис. 2 показано расчетное изменение температуры нагрева в зоне лазерного воздействия от поверхности реза ($l = 0$) с указанием положения критической точки Ac_1 , при которой в стали происходит фазовое превращение, свя-

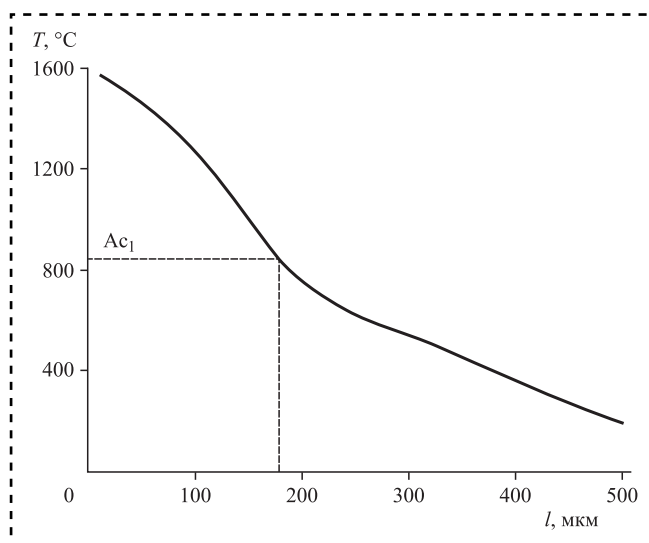


Рис. 2. Расчетное распределение температуры в зоне лазерного воздействия

занное с формированием аустенитной структуры. Для стали марки Р6М5 температура точки $Ac_1 = 815$ °С. Участок металла, испытывающий нагрев от $T_{пл}$ до точки Ac_1 во время газолазерной резки повторно подвергается закалке.

Для оценки достоверности результатов моделирования выполнены металлографические исследования образцов из быстрорежущей стали в зоне лазерного воздействия. На рис. 3 представлено изображение микроструктуры стали, полученное с помощью оптического микроскопа. При нагреве стали в интервале от $T_{пл}$ до точки Ac_1 первичные и вторичные карбиды начинают растворяться в аустените, при этом повышается концентрация углерода и легирующих компонентов в Fe_γ . Зона повторной закалки на фотографии выглядит светлой, так как отличается от основного металла стойкостью к действию травителя. По данным металлогра-

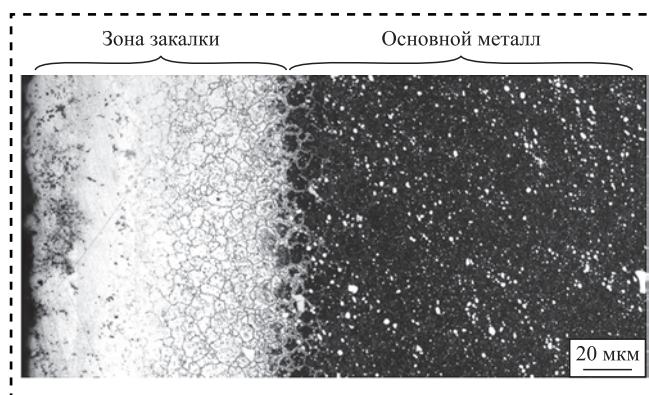


Рис. 3. Микроструктура стали в зоне лазерного воздействия



фического анализа протяженность зоны закалки зависит от режимов газолазерной резки и на исследуемых образцах составляла 120...170 мкм. Сопоставление экспериментальных данных с результатами расчетов показали хорошее соответствие с точностью 5...10 %, что достаточно для практического использования при оценке протяженности зоны лазерного воздействия.

В области закалки сталь имеет повышенную микротвердость $HV_{0,2} = 10\,400 \pm 200$ МПа. Твердость закаленной области в зоне лазерного воздействия превышает твердость стали, закаленной обычным способом [1]. Для конструктивных сталей этот факт снижает пластичность заготовки и при дальнейших технологических операциях, например гибке, кромка реза может разрушаться. Поэтому в большинстве случаев проводят слесарные операции по удалению металла из зоны лазерного воздействия [8].

При газолазерной резке быстрорежущих сталей формируется закаленная зона, обладающая улучшенным комплексом свойств. Благодаря растворению первичных карбидов в металлической матрице появляется возможность эффективнее использовать легирующие компоненты вольфрам и молибден для формирования высокой твердости и теплостойкости при дисперсионном твердении. Поверхность реза обладает более высокой износостойкостью по сравнению со сталью, упрочненной по стандартной технологии — закалке и трехкратному отпуску [9, 10]. Исключается преждевременный выход из строя инструмента из-за выкрашивания крупных карбидов в режущей кромке. Повышая точность и качество поверхности реза, технологию газолазерной резки можно использовать не только как разделительную, но и упрочняющую операцию для рабочих поверхностей инструмента. Следовательно, возрастает важность применения математического моделирования для оптимизации режимов газолазерной резки быстрорежущей стали.

Заключение

Проведенные исследования показали хорошую корреляцию результатов моделирования

тепловых полей при газолазерной резке быстрорежущей стали с реальным строением зоны лазерного воздействия. Отечественный комплекс расчетной аэрогидродинамики FlowVision фирмы ТЕСИС позволяет успешно решать задачи моделирования такого сложного процесса, как газолазерная резка быстрорежущей стали, и может быть востребован для оптимизации режимов разделительной и упрочняющей обработки рабочих поверхностей инструментов.

Библиографический список

1. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки. М: Изд-во МГТУ, 2006. 664 с.
2. Parandoush P., Hossain A. A review of modeling and simulation of laser beam machining // International journal of machine tools and manufacture. 2014. Vol. 85. P. 135–145.
3. Sharma A., Yadava V. Experimental analysis of Nd-YAG laser cutting of sheet materials—A review // Optics & Laser Technology. 2018. Vol. 98. P. 264–280.
4. Petring D., Molitor T., Schneider F., Wolf N. Diagnostics, modeling and simulation: Three keys towards mastering the cutting process with fiber, disk and diode lasers // Physics Procedia. 2012. Vol. 39. P. 186–196.
5. Моделирование фронта плавления и разрушения пленки расплава при газолазерной резке металлов / О.Б. Ковалев и др. // Прикладная механика и техническая физика. 2004. Т. 45. № 1. С. 162–172.
6. Микроструктура поверхности и особенности моделирования физико-химических процессов при кислородной лазерной резке конструктивных сталей / Н.Б. Пугачева и др. // Физика и химия обработки материалов. 2010. № 1. С. 15–22.
7. Газодинамика лазерной резки толстых металлических пластин непрерывным CO₂-лазером / А.В. Зайцев и др. // Вычислительные технологии. 2006. Т. 11. № S1. С. 74–83.
8. Зоренко Д.А. Моделирование лазерного раскроя стального проката // Вестник Тверского государственного технического университета. Серия "Технические науки". 2021. № 3 (11). С. 63–68.
9. Раткевич Г.В., Афанасьева Л.Е., Смолякова И.А., Новоселова М.В. Абразивная износостойкость быстрорежущей стали Р6М5 после лазерного плавления и отпуска // Трение и износ. 2019. Т. 40. № 5. С. 516–520.
10. Афанасьева Л.Е., Измайлов В.В., Новоселова М.В. Микротопография и микроструктура поверхности быстрорежущей стали после газолазерной резки // Поверхность. Рентгеновские, синхротронные и нейтронные исследования. 2021. № 5. С. 68–75.



И.Ф. Дьяков, д-р техн. наук

(Ульяновский государственный технический университет),

Ю.В. Моисеев, канд. экон. наук (ЗАО "Безопасность", г. Москва),

В.И. Дьяков, канд. техн. наук (ООО "Евроизол", г. Ульяновск)

E-mail: i.dyakov@ulstu.ru

Анализ качественных свойств транспортных средств

Рассмотрены вопросы качества сборки и ремонта транспортного средства на основе шумовых и энергетических характеристик. Уровень качества сборки и ремонта зависит от стабильности геометрических размеров и используемого материала, постоянства припусков, смещения центров цилиндрических деталей и других дефектов; возможности выполнения некоторых технологических операций при одной установке изделия; распределения технологического процесса на отдельные операции при обеспечении примерно равной производительности на каждой из них; синхронизации технологических операций. Приведены результаты измерений деталей, плотности сопряжений элементов двигателя внутреннего сгорания. Дан оценочный показатель качества сборки и ремонта транспортного средства.

The issues of the quality of assembly and repair of the vehicle on the basis of noise and energy characteristics are considered. The level of assembly and repair quality depends on the stability of the geometric dimensions and the material used, the constancy of allowances, the displacement of the centers of cylindrical parts and other defects; the possibility of performing some technological operations with one installation of the product; the distribution of the technological process into separate operations, ensuring approximately equal productivity on each of them; synchronization of technological operations. The results of measurements of parts, the density of interfaces of internal combustion engine elements are presented. An estimated indicator of the quality of assembly and repair of the vehicle is given.

Ключевые слова: сборочная единица, точность сборки, виброакустические колебания, внешний и внутренний шум, степень допуска, качество технологического процесса.

Keywords: assembly unit, assembly accuracy, vibroacoustic vibrations, external and internal noise, degree of tolerance, quality of the technological process.

В процессе проектирования транспортных средств приходится рассчитывать качественные свойства сборочных единиц на прочность, размерные цепи, поле допусков, обеспечивая точность сборки. Точность сборки транспортного средства характеризуется величиной размерных цепей, образуя замкнутый контур в определенной последовательности при сборке агрегатов. Для того чтобы агрегаты выполняли свое служебное назначение как звенья цепей кинематических, размерных и определяющих энергетических показателей, их подвергают испытанию в лабораторных и дорожных условиях. Если ускорения точек тела в процессе движения меняют свое направление по отношению к частицам тела, то можно исследовать возникновения колебаний, приводящие в условиях резонанса к увеличению деформаций и напряжений.

Все транспортные средства создают различные виброакустические колебания со своими

свойствами. При движении транспортного средства возникают как внешние шумовые характеристики от устанавливаемых вспомогательных агрегатов: вентилятора, компрессора, трансмиссии, шин, неровностей дорожной поверхности, так и внутренние. Возмущение от внутренних источников вызвано следующими условиями технологического процесса:

сгоранием топлива в цилиндрах двигателя; взаимодействием кинематических пар, обусловленных трением;

неуравновешенностью вращающихся деталей (валов, зубчатых колес, подшипников) в агрегатах.

Внешний и внутренний шум транспортного средства связан с техническим уровнем качества подготовки производства, недостаточным обоснованием технологии сборки деталей между собой. Технологический уровень качества изготовления и сборки агрегатов включает комплекс производственных структур:



проектирование технологического процесса;
подбор оснастки со специальными инструментами;

изготовление и внедрение;

обеспечение компетенции контролеров технологического процесса, включая обеспечение стабильности геометрических размеров и качества материалов, постоянство припусков, недопустимость смещения центров отверстия, торцов и других дефектов;

возможность выполнения некоторых технологических операций при одной установке изделия;
распределение технологического процесса на отдельные операции, при обеспечении примерно равной производительности на каждом из них;
синхронизация технологических операций путем изменения режимов обработки;
регулярный контроль за технологическим оборудованием.

Критерием оценки качества изготовления, сборки могут служить затраты энергии. Чем качественнее изготовлены детали и выполнена сборка, тем меньше энергозатраты на привод механизмов.

Один из показателей технологического процесса — точность и комплексность обработки. Отклонение геометрии от номинального размера обработанной детали выражают через степень допуска [1–13]:

$$k_d = \frac{\delta}{\Delta} 100 \%,$$

где δ — поле возможных отклонений, мкм;

Δ — абсолютный геометрический параметр обрабатываемой детали, мкм.

Если поле допуска превышает 75 %, то точность считают удовлетворительной. Комплексность технологического процесса определяют по коэффициенту в виде:

$$k_k = \frac{z_n}{z} 100 \%,$$

где z_n — число операций технологического процесса;

z — число операций, необходимых для полной обработки детали (узла).

На рис. 1 приведены результаты измерения после шлифовки коленчатого вала. Поле допуска геометрических размеров находилось в пределах 60 %, что не обеспечивает по запасу точности качественные свойства коленчатого вала.

Если рассматривать после сборки агрегатов (двигателя внутреннего сгорания) по выходно-

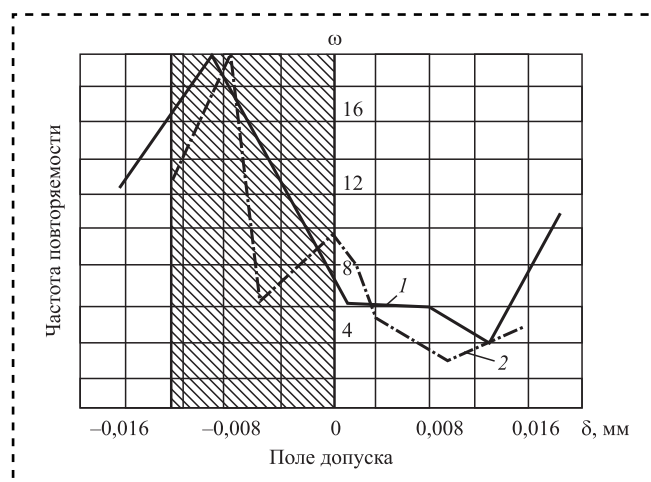


Рис. 1. Изменение частоты повторяемости поля допуска после шлифования коленчатого вала:

1 — шатунные шейки; 2 — коренные шейки

му параметру, например, плотность цилиндро-поршневой группы новых двигателей и после капитального ремонта, измеренную прибором К-69 М-НИИАТ, то из 30 проверенных двигателей около 60 % по своим характеристикам находились в допустимых пределах, остальные не укладывались в поле допуска (рис. 2).

На начальном этапе проектирования двигателя решают частные задачи с заданными шумовыми характеристиками отдельных источников. Генерируемый шум двигателя обычно разделяют на две составляющие: шум процесса сгорания и ме-

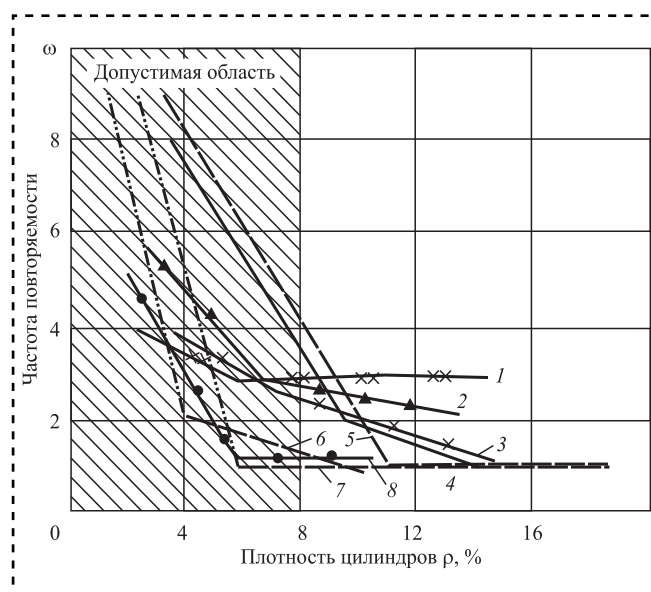


Рис. 2. Изменение частоты повторяемости в зависимости от плотности цилиндро-поршневой группы:

1 — ЗИЛ-130; 2 — УАЗ-3303; 3 — ГАЗ-52; 4 — Урал-3759, 5–8 — после капитального ремонта

ханический шум. С увеличением нагрузки уровень шума двигателя возрастает на 6...8 дБ(А). Для определения качественных свойств двигателя по пороговому уровню шума w_i используют эмпирические зависимости по отдельным источникам [14]:

— бензиновый двигатель с вентилятором

$$w_{дв} = 57 + 10 \lg(n_{ном}/P_{ном}) + 30 \lg(n_{дв}/n_{ном}),$$

где $n_{ном}$ — номинальная частота вращения коленчатого вала;

$P_{ном}$ — номинальная мощность двигателя;

$n_{дв}$ — частота вращения коленчатого вала двигателя в момент измерения;

— вентилятор на стенде

$$w_{всн} = 57 + 20 \lg \left[(1 - \eta_{всн}) \frac{Q}{D_{всн}} \frac{H}{100} \right],$$

где $\eta_{всн}$ — КПД вентилятора;

Q — расход воздуха;

$D_{всн}$ — диаметр вентилятора;

H — напор воздушного потока;

— впуск-выпуск отработавших газов двигателя без вентилятора

$$w_{г} = 60 \lg \eta_{V} V_h \left(\frac{n_i}{60\tau} \right) / A_{в} + 20 \lg d + 33,$$

где η_{V} — коэффициент наполнения цилиндров рабочей смесью;

V_h — объем двигателя;

n_i — частота вращения коленчатого вала;

τ — тактность двигателя;

$A_{в}$ — площадь поперечного сечения впускного трубопровода;

d — диаметр трубы выпускных газов.

Чтобы изучить качественные характеристики транспортного средства, возникающие вследствие неравномерного движения, целесообразнее всего воспользоваться энергозатратами двигателя [14, 15]. Энергия, создаваемая двигателем транспортного средства:

$$J_e = \int P_e dt,$$

где P_e — эффективная мощность двигателя;

t — время работы двигателя.

Алгоритм функционирования предлагаемого устройства показан на рис. 3.

При эксплуатации на дорогах повышенной категоричности рекомендуемый расход энергии на 1 км пробега для автомобиля ЗИЛ-

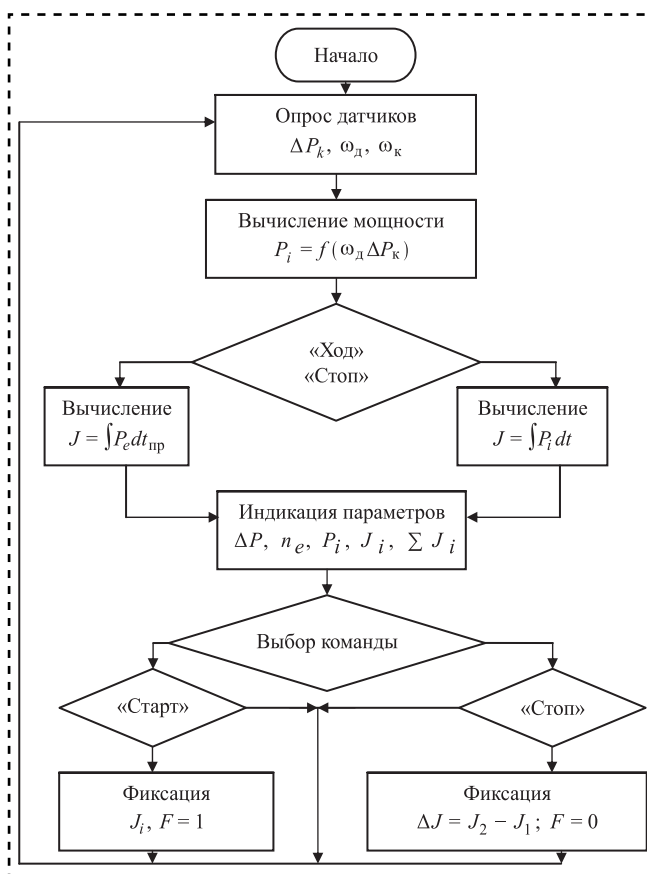


Рис. 3. Алгоритм компоновки прибора для измерения энергозатрат двигателя в дорожных условиях

433360 — 10,977 кВт·ч, ГАЗ-3307 — 8,642 кВт·ч; УАЗ-3303 — 0,837 кВт·ч при скорости движения 40 км/ч. Коэффициенты корреляции энергозатрат имеют разброс в пределах 10...15 %. Топливо при горении совершает механическую работу на установившемся режиме работы движения [3].

Двигатель в полной комплектации испытывают на стенде. Транспортное средство в целом оценивают в дорожных условиях или на полигоне по мощности двигателя. Мощность двигателя находится в тесной связи с нагрузочными режимами (сила трения трущихся частей, вибрация вращающихся деталей, качество сборки). В целом для транспортного средства можно определить потребные энергозатраты по уточненному выражению вида

$$J_s = L \left[(m_n \eta_{\sigma} k_{\gamma} \beta + \sum F_i) g \frac{\delta_{вп}}{g} j \right] \eta_{тп} 2,73 \cdot 10^{-6},$$

где L — путь пробег транспортного средства;

m_n — номинальная грузоподъемность транспортного средства;

η_{σ} — коэффициент использования собственной массы транспортного средства;



Результаты испытаний качественных свойств автомобиля

Наименование автомобиля с двигателем	Уровень звуковой мощности при $n = 1500 \text{ мин}^{-1}$, дБ(А), после		Энергетический показатель, кВт·ч на 1 км пробега, после		Показатель качества*
	сборки	ремонта	сборки	ремонта	
Автомобиль УАЗ-3303 Двигатель в сборе УМЗ-4178.10	68,4 95,3	70,1 98,7	0,837 0,462	0,848 0,474	0,448 0,439
Автомобиль УАЗ-31512 Двигатель в сборе УМЗ-4278.10	67,7 97,2	71,1 99,3	0,724 0,485	0,751 0,516	0,309 0,312
Автомобиль УАЗ-39094 Двигатель в сборе УМЗ-4218.10	66,4 96,6	73,2 98,4	1,176 0,790	1,223 0,583	0,328 0,523
Автомобиль УАЗ-3153 Двигатель в сборе УМЗ-4218.10	66,3 94,1	72,5 97,5	0,761 0,464	0,809 0,476	0,390 0,411

* В числителе указаны качества после сборки, в знаменателе — после ремонта.

k_γ, β — коэффициенты использования грузоподъемности и пробега соответственно;

$$\sum F_i = F_w, F_{\text{тр}}, \sum_{i=1}^n F_f, F_j, F_h, F_{\text{вз}}$$
 — силы:

аэродинамические, трения трущихся частей, дорожного сопротивления движению; инерции вращающихся и движущихся масс, сопротивление подъему соответственно;

n — число колес;

$F_{\text{вз}}$ — сила тяжести водителя и число мест в кабине;

$2,73 \cdot 10^{-6}$ — переводной коэффициент с Н·м на кВт·ч;

$\delta_{\text{вр}}$ — коэффициент, учитывающий вращающиеся массы.

По данному выражению можно оценивать состояния качества проектирования, изготовления и сборки транспортного средства, а также отдельных узлов и агрегатов на стенде и в дорожных условиях. Показатель качества после технологических процессов имеет вид

$$k_k = \frac{J_s - J_e}{J_s}$$

В таблице приведены результаты стендовых и дорожных испытаний основных источников внутреннего шума транспортного средства УАЗ.

Наиболее качественным по показателям оказался автомобиль УАЗ-31512; чем меньше значение k_k , тем качество сборки и ремонта транспортного средства выше, так как энергозатраты при движении на трансмиссию меньше. В числителе значения показателя качества технологического процесса можно отнести к заводу-изготовителю, в знаменателе к потребителю или ремонтному заводу.

В связи с тем, что как автомобиль, так и двигатель после сборки или ремонта должны пройти обкаточный период, то пороговые значения звуковой мощности и энергозатраты могут иметь отклонения. Более точная оценка качества

сборки или ремонта транспортного средства возможна по энергетическому показателю.

Библиографический список

1. **Справочник** металлиста. В 5-ти т. Т. 5 / под ред. Богуславского. М.: Машиностроение 1978. 613 с.
2. **ГОСТ 33555—2015**. Автомобильные транспортные средства. Шум внутренний. Допустимые уровни и методы испытания. М.: Стандартинформ, 2016. 22 с.
3. **Постановление** главного государственного санитарного врача РФ от 23.03.2005 № 10 "О мерах по усилению надзора за автотранспортом и уменьшением влияния его на здоровье населения.
4. **Генуит К.** Применение анализа бинаурального пути передачи к звуку. Задачи качества. Европейская конференция по шуму и вибрации автомобиля. Лондон, 2000. С. 241—250.
5. **Krebbler Y., Gerlich H.W.** Acoustic feed beck system for Tual Vehicles. "ATA" Florenz, 1997. No. 97A1045.
6. **Neu G., Mommertz E., Schmitz A.** Untersuchungen zur Richtungsstreuung Schallwiedergabebei Darbietung von Kopfbezogenen Abnahmen überz wei Lautsprecher // *Acustica*. 1992. No. 76. P. 183—191. No. 77. P. 153—161.
7. **ИСО 3740:2000**. Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума. Руководство по применению основополагающих стандартов.
8. **ИСО/ПМС 9614-3:2000**. Акустика. Определение уровней звуковой мощности источников шума по интенсивности звука. Точный метод при измерениях сканированием.
9. **ИСО 11202:95**. Акустика. Шум, излучаемый машинами и оборудованием. Измерение уровней звукового давления излучения на рабочем месте и в других заданных контрольных точках. Ориентировочный метод для измерений в условиях эксплуатации.
10. **Разумовский М.А.** Прогнозирование шумовых характеристик поршневых двигателей. Минск: Вышэйшая школа, 1981. 40 с.
11. **Купер Д.Х., Баук Дж.Л.** Перспективы трансауральной записи // *J. of the audio. Engineering Society*. 1989. Т. 37. № 1—2. С. 3—19.
12. **Береснов А.П., Береснов М.А.** Виброакустические методы диагностики двигателя внутреннего сгорания // *Мехатроника, автоматизация*. 2010. № 6. С. 27—32.
13. **Желлов Л.Ф.** Виброакустика колесных машин. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана. 2013. 170 с.
14. **Дьяков И.Ф., Моисеев Ю.В.** Методы оценки технологичности транспортного средства // *Автоматизация. Современные технологии*. 2020. Т. 74. № 4. С. 152—160.
15. **Дьяков И.Ф.** Энергия — основа учета показателей автотранспорта // *Вестник СГТУ*. 2014. С. 14—17.



Е.А. Дубовик

(Донской государственной технической университет, г. Ростов-на-Дону)

E-mail: dubovik1982@list.ru

Контроль гильз блока цилиндров автомобиля КамАЗ-740

Описано общее устройство блока цилиндров гильз, входящего в состав кривошипно-шатунного механизма. Рассмотрена дефектация гильз блока цилиндров, когда деталь имеет признаки явных дефектов или брака. Предложены технические средства контроля гильз цилиндров двигателя автомобиля КамАЗ-740.

The general arrangement of the cylinder block of sleeves, which is part of the crank mechanism, is described. The defect of cylinder liners is considered when the part has signs of obvious defects or defects. Technical means of control of cylinder liners of the engine of the KamAZ-740 car are offered.

Ключевые слова: блок цилиндров, гильза, дефектация, износ, контроль.

Keywords: cylinder block, sleeve, defect, wear, control.

Кривошипно-шатунный механизм (КШМ) — основной механизм двигателя КамАЗ-740 служит для восприятия давления газов в такте рабочего хода и преобразования возвратно-поступательного движения поршней во вращательное движение коленчатого вала.

КШМ КамАЗ-740 состоит из блока цилиндров, гильз и головок цилиндров, поршней с кольцами и поршневыми пальцами, шатунов, коленчатого вала, коренных и шатунных подшипников и маховика.

Блок цилиндров КамАЗ-740 представляет собой жесткую моноблочную V-образную конструкцию, отлитую из легированного серого чугуна. Высокая жесткость блока КамАЗ-740 обеспечивается разделением картерного пространства на отдельные отсеки поперечными перегородками с силовым ребрением и низким расположением плоскости разъема верхней половины картера с масляным поддоном (значительно ниже оси коленчатого вала). В верхней части блока цилиндров КамАЗ-740 под углом 90° расположены два ряда цилиндровых гнезд и вставные "мокрые" гильзы с привалочными поверхностями под головки цилиндров.

Цилиндр большинства современных двигателей жидкостного охлаждения, выполнен в виде "мокрой" гильзы, омываемой снаружи охлаждающей жидкостью, либо в виде "сухой"

гильзы, устанавливаемой по всей длине цилиндра или в верхней его части, где наблюдается максимальный износ (рис. 1).

Гильзы цилиндров двигателей КамАЗ-740 съемные. После установки гильз цилиндров в блок между стенками гнезд цилиндров и внутренними стенками блока цилиндров образуется водяная рубашка, поэтому гильзы цилиндров называют "мокрыми" (рис. 2). От гильз цилиндров ЯМЗ-238 они отличаются диаметром цилиндра (КамАЗ-740 — 120 мм; ЯМЗ-238 — 130 мм) и массой (гильза цилиндров КамАЗ-740 — 5 кг, ЯМЗ-238 — 8 кг).

Гильзы цилиндра КамАЗ-740 изготавливают из серого специального чугуна с перлитной структурой твердостью 42...50 HRC, упрочненного объемной закалкой, их отличает уменьшенная (по высоте) зона отпуска бурта от термообработки гильз.

После обработки плосковершинным хонингованием зеркало гильзы представляет собой редкую сетку впадин и площадок под углом к оси гильзы. При работе двигателя масло удерживается во впадинах, что улучшает прирабатываемость деталей цилиндропоршневой группы.

Центрирование гильзы в гнездах блока осуществляется при помощи верхнего и нижнего наружных обработанных поясов. В верхней части гильза КамАЗ-740 имеет упорный бурт с вы-

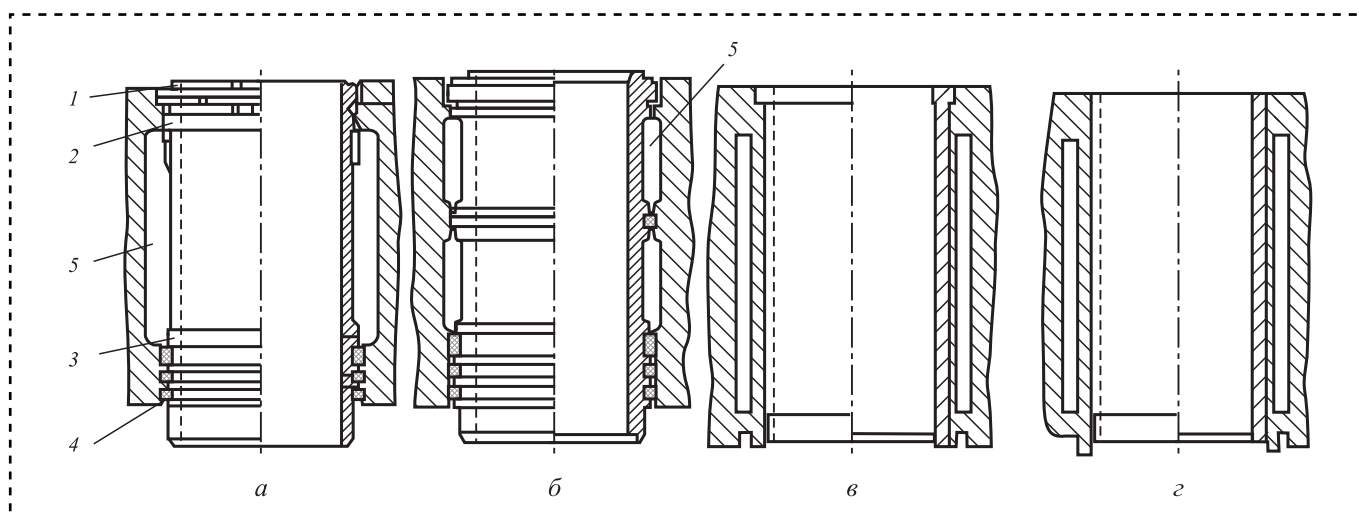


Рис. 1. Гильзы блока цилиндров:

a, б — "мокрые"; *в, г* — "сухие"; 1 — буртик; 2, 3 — верхний и нижний пояс; 4 — уплотнительные кольца; 5 — рубашка охлаждения

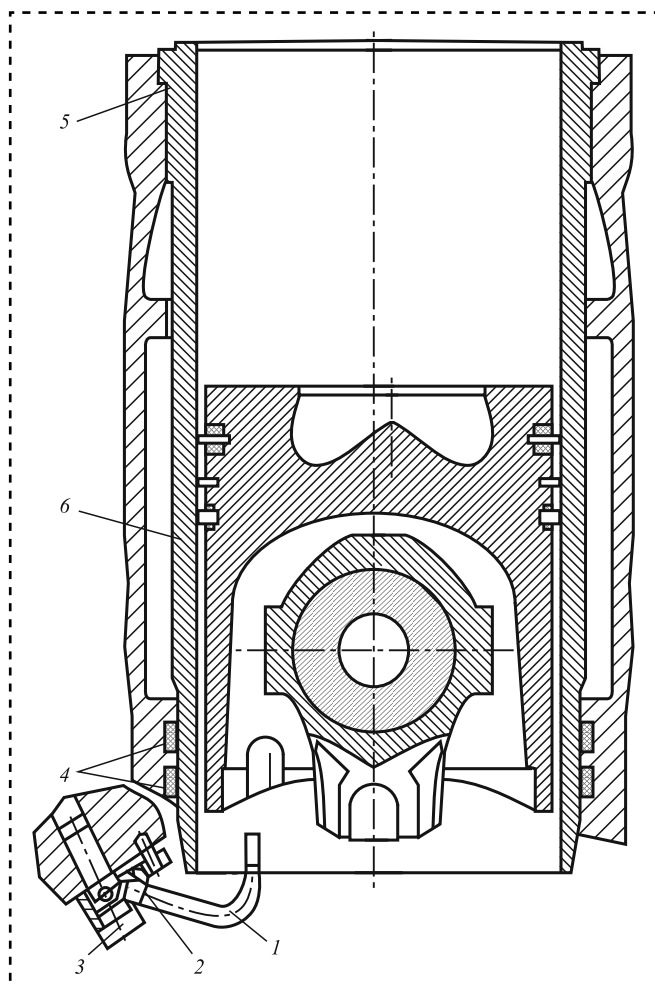


Рис. 2. Схема установки гильзы и форсунки охлаждения в корпусе блока цилиндра:

1 — труба; 2 — корпус форсунки; 3 — корпус клапана; 4 — кольца уплотнительные нижние; 5 — кольцо уплотнительное верхнее; 6 — гильза

ступами для установки на упорный торец блока цилиндров и надежного уплотнения газового стыка с головкой цилиндра. Водяная полость между блоком и гильзой уплотнена резиновыми кольцами круглого сечения: в верхней части установлено одно кольцо под буртом в проточке гильзы, в нижней части — два кольца в проточках блока.

Гильза занимает среди теплонапряженных деталей двигателя особое место как по выполняемым функциям, так и по предъявляемым к ней требованиям.

Гильза цилиндров относится к классу "полые стержни". Гильзы цилиндров КамАЗ-740 являются тонкостенными оболочками, т.е. эти детали имеют тонкие стенки (13,5 мм), большие диаметры (120 мм) и длину. Масса гильзы 5,098 кг.

На рис. 3 показан чертеж гильзы цилиндра КамАЗ-740.

Износ внутренней поверхности цилиндров.

Гильзы цилиндров изнашиваются неравномерно. Наибольший износ по окружности наблюдается в плоскости качения шатуна, а вдоль оси цилиндра — в зоне расположения компрессионных колец при положении поршня в верхней мертвой точке.

Во время работы двигателя в верхней части цилиндров сгорает рабочая смесь. Горение сопровождается выделением продуктов окисления — оксидов углерода и азота, углекислого газа и сернистого газов, паров воды и других веществ.

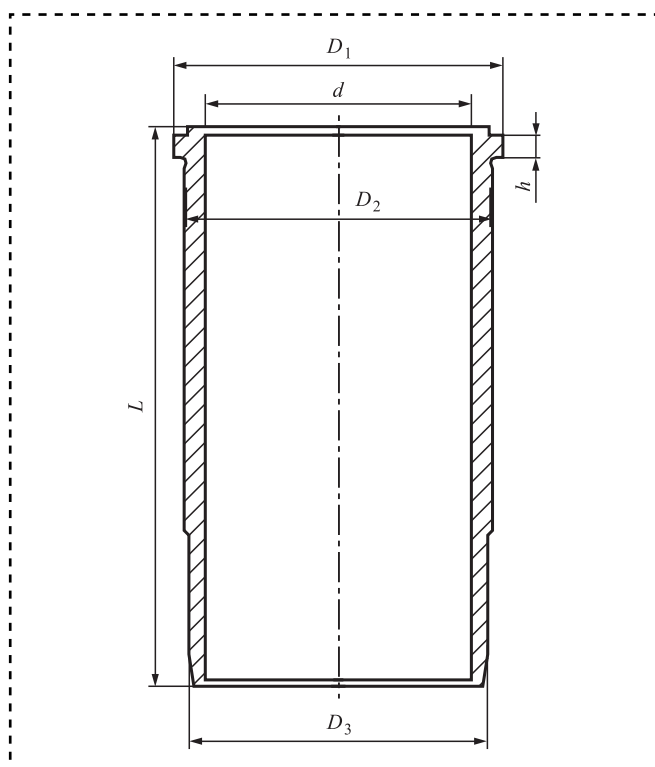


Рис. 3. Гильза цилиндра КамАЗ-740:

$d = 120^{+0,21}$; $L = 224 \pm 0,5$; $D_1 = 146_{-0,15}$; $D_2 = 137,5_{-0,09}^{-0,05}$;
 $D_3 = 134_{-0,09}^{-0,05}$; $h = 10,3_{-0,03}$

При работе двигателя с пониженными температурами (50...60 °С) охлаждающей жидкости и масла часть продуктов окисления и особенно пары воды конденсируются на стенках цилиндров. Они растворяют продукты окисления и образуют кислоты, вызывающие коррозию цилиндров. Кроме того, разрушается масляная пленка и увеличивается износ цилиндров и поршневых колец.

Абразивное и механическое изнашивание деталей происходит не только в механизмах двигателя, но и в различных механизмах автомобиля. Кроме износа по длине также наблюдается износ в направлении, перпендикулярном к оси коленчатого вала, т.е. овализация гильз.

Овализация гильз цилиндров вызывается как неравномерностью изнашивания, так и остаточными деформациями, возникающими от сил давления газов и бокового усилия поршня. Наибольшая овальность гильзы происходит в верхнем поясе в зоне расположения верхнего поршневого кольца при положении поршня в верхней мертвой точке.

Долговечность гильзы цилиндра зависит от качества ремонта и технической культуры эксплуатации двигателя, а также от выпол-

нения правил запуска и прогрева холодного двигателя.

Кавитационное изнашивание в дизельных двигателях наблюдается в случае вибрации гильз цилиндров, которая возникает при переходе поршня двигателя через верхнюю мертвую точку, т.е. при перемещении (перекладке) его от одной стороны цилиндра к другой. Между поршнем и зеркалом цилиндра есть зазор, и перемещение поршня происходит с ударом. При этом изменяется давление на стенки цилиндра. Вибрация цилиндра вызывает его кавитационное изнашивание. Избежать кавитационного разрушения можно уменьшением вибрации гильз цилиндров, поддержанием нормального температурного режима двигателя и т.д. Износ цилиндра для большинства двигателей в этом случае не должен превышать 0,3...0,35 мм. В блоке цилиндров двигателя имеется округлое гладкое углубление, так называемое седло буртика. Оно аксиально фиксирует гильзу в блоке. Буртик должен сидеть точно в углублении таким образом, чтобы гильза полностью прилегла по всему периметру седла.

Причиной появления трещин в деталях являются ненормальные условия их работы, а именно, сильный перегрев, быстрое охлаждение, ударные нагрузки и т.д. Трещины могут возникать также вследствие нарушения технологии ремонта.

Износ посадочных поясков частично связан с кавитационным изнашиванием и коррозией. Признаком дефекта гильз являются глубокие раковины на поверхности поясков.

Рабочая (внутренняя) поверхность гильзы изнашивается наиболее интенсивно, так как на нее попадают абразивные частицы из топливно-воздушной смеси и из масла. Детали сопряжения системы гильза—поршень—поршневые кольца работают при высоких температурах, затрудненной смазке, повышенном давлении, в агрессивной среде, что также является причиной интенсивного износа внутренней поверхности гильз. Коррозионные и кавитационные разрушения бывают весьма значительными. Обычно гильзы при определении технического состояния выбраковывают в случае наличия трещин, глубоких задиров и рисок на внутренней поверхности, сколов, износе внутренней рабочей поверхности более 0,4 мм и опорного бурта по высоте более 0,3 мм.

При дефектации гильза цилиндра вначале подвергается внешнему осмотру в целях обна-



ружения явных дефектов (коррозия, трещины, вмятины и т.д.), а также дефектов с признаками окончательного брака (поломки, сколы, пробоины и т.п.). Затем ее проверяют на специальных приспособлениях и приборах для выявления микротрещин, определения степени смещения поверхностей относительно друг друга, измерения твердости, упругости и т.д. Выполняют обмер рабочих поверхностей гильзы цилиндра. Такая последовательность дефектации позволяет избежать лишней работы в тех случаях, когда деталь имеет признаки явных дефектов или брака.

Основными дефектами являются износы, задиры, кольцевые риски на трущихся поверхностях, сколы или трещины любого размера, износ зеркала гильзы, износ верхнего или нижнего посадочного пояса, потеря натяжения вставки гильзы. Причины появления: неправильный износ рабочей поверхности, внутреннее напряжение, остаточная деформация, коррозионные повреждения в результате электрохимических воздействий внешней среды, изменение физико-химических свойств материала возникающих в процессе нагрева рабочей поверхности детали до температур, превышающих температуры термообработки детали и проявляющихся в снижении плотности и упругости материала детали.

По величине износа внутренней поверхности гильзы сортируют на три группы: первая — с внутренним диаметром в пределах допуска на новую гильзу; вторая — с внутренним диаметром, превышающим номинальный не более чем на 0,2 мм; третья — с внутренним диаметром, превышающим номинальный на 0,15...0,2 мм, но не более чем на 0,4 мм.

Основные возможные дефекты и способы ремонта и восстановления дефектов представлены в табл. 1.

Таблица 1

Перечень возможных дефектов гильз цилиндров

Возможные дефекты	Рекомендуемые способы ремонта детали
Износ внутренней рабочей поверхности	Растачивание, запрессовка пластины, хонингование
Конусообразность	—
Некруглость	—
Задиры	Браковать при наличии глубоких задигов
Риски на внутренней рабочей поверхности	Браковать при наличии глубоких рисков
Износ посадочных поясков и опорных буртов	Вибродуговая наплавка или контактная приварка ленты
Кавитационные разрушения на наружной поверхности	Нанесение эпоксидной композиции
Коррозия	Растачивание, запрессовка пластины, хонингование
Трещины	Браковать

В табл. 2 представлена карта дефектации гильзы цилиндра.

Основные дефекты — трещины и износ цилиндров определяют следующим образом (рис. 4). Измеряют штангенциркулем диаметр верхнего неизнашивающегося пояса цилиндра; подбирают в соответствии с диаметром верхней кромки цилиндра сменный стержень 1 индикаторного нутромера, вставляют его в тройник 2 и закрепляют гайкой; устанавливают микрометр на размер, равный диаметру цилиндра по верхней кромке, плюс 1 мм; штифты индикаторного нутромера устанавливают между пяткой и шпинделем микрометра, закрепляют сменный стержень и подводят ноль шкалы к стрелке индикатора 3; измеряют цилиндр в плоскости, перпендикулярной оси

Таблица 2

Карта дефектации гильзы

Дефект	Номинальный размер, мм	Допустимый безремонтный размер, мм	Допустимый ремонтный размер, мм	Заключение
Износ зеркала гильзы	120 ^{+0,06}	—	<120,06	Расточить до ремонтного размера при размере менее 101,56 мм
Износ нижних посадочных поясков	132 ^{-0,04}	131,96	—	Оставлять при размере более 124,96 мм
Износ верхних посадочных поясков	135 ^{-0,04}	134,96	—	Оставлять при размере более 121,96 мм

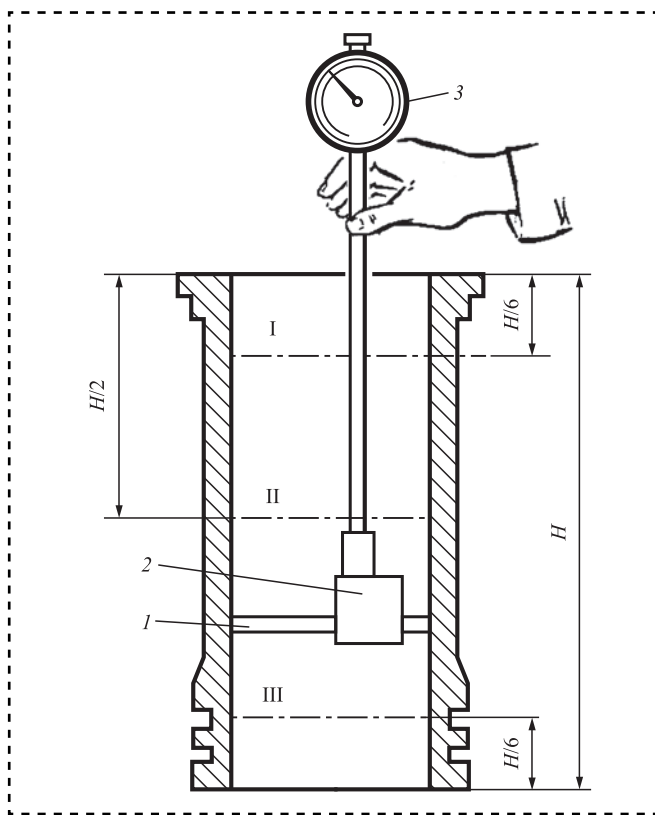


Рис. 4. Схема измерения диаметра гильзы цилиндра

коленчатого вала, в трех сечениях I, II и III, на расстояниях $H/6$ и $H/2$ (H — высота гильзы); измеряют цилиндр в плоскости, параллельной оси коленчатого вала, в трех сечениях.

Пользуясь приведенными ниже формулами, определяют диаметр цилиндра, износ его по сечениям, а также максимальную овальность и конусность цилиндра.

Износы цилиндра, мм, в перпендикулярной I_1 и параллельной I_{II} плоскостях:

$$I_1 = D_1 - D_2; \quad (1)$$

$$I_{II} = D_{II} - D_2, \quad (2)$$

где D_1 и D_{II} — диаметры цилиндра в плоскостях перпендикулярной и параллельной оси коленчатого вала и в соответствующих сечениях, мм;

D_2 — диаметр цилиндра по верхнему пояску, мм.

Максимальная конусность, мм:

$$K = D_{\max} - D_{\min}, \quad (3)$$

где D_{\max} и D_{\min} — максимальный и минимальный диаметры цилиндра в одной плоскости, но в разных сечениях соответственно, мм.

Максимальная овальность в миллиметрах определяется по формуле:

$$O = D_{\max} - D_{\min}, \quad (4)$$

где D_{\max} и D_{\min} — максимальный и минимальный диаметры цилиндра в одном сечении, но в разных плоскостях соответственно, мм.

Результаты замеров заносят в карту измерения и контроля блока цилиндров.

Овальность и конусность отверстия определяются замером в двух сечениях, отстоящих от галтелей на расстоянии 10...15 мм. В каждом поясе измеряют в двух перпендикулярных плоскостях: параллельной и перпендикулярной плоскости колена.

Глубину раковин определяют с помощью приспособления, изготовленного на базе индикаторного глубиномера или калибром.

При дефектации гильз наряду с обычным мерительным инструментом (штангенциркулями, нутромерами, микрометрами, калибрами, скобами и т. д.) применяют специальные приспособления, позволяющие с высокой точностью и производительностью контролировать размеры гильз.

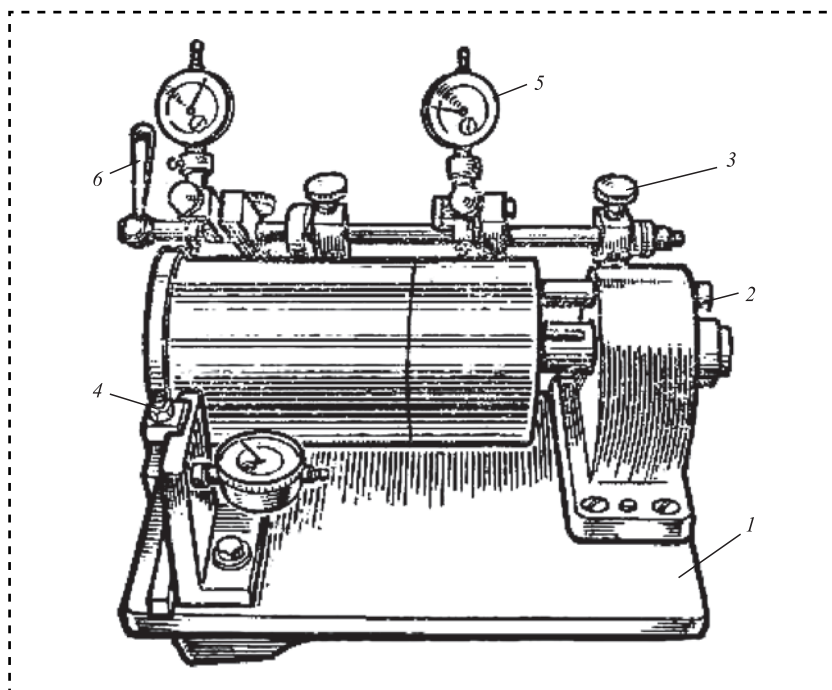


Рис. 5. КИ-3343-ГОСНИТИ:

1 — плита; 2, 3 — стойки; 4 — упор; 5 — индикатор; 6 — рукоятка



Для проверки диаметра и овальности посадочных поясков гильз при дефектации и входном контроле применяют приспособление КИ-3343-ГОСНИТИ (рис. 5).

Высоту опорного бурта проверяют штангенциркулем, скобой, а допустимое биение опорного торца бурта и наружных посадочных поясков относительно внутренней поверхности — приспособлением КИ-3340-ГОСНИТИ.

Приспособление настраивают поворотом рукоятки, подводом мерительных штанг индикаторов к посадочным поясам и установкой индикаторов в нулевое положение. Затем, вращая гильзу, проверяют биение по показаниям

индикаторов. Погрешность измерения не превышает 0,012 мм.

Твердость внутренней поверхности гильз цилиндров контролируют твердомером модели ТР-2018, предназначенным для измерения твердости на внутренних поверхностях гильз по методу Роквелла.

Библиографический список

1. Кузнецов А.С. Техническое обслуживание и ремонт автомобиля. В 2 ч. Ч. 1. М.: Издательский центр "Академия", 2017. 368 с.

2. Жомиру В.Н., Амарей В.И. Справочник технического состояния автомобилей. Кишнев: Картя Молдлвеняскэ, 1989. 228 с.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

За последние 40 лет впервые издан совершенно новый Справочник технолога. В его написании приняли участие 69 докторов и кандидатов технических наук из 17 регионов Российской Федерации. В книге приведен справочный материал, необходимый технологу при разработке технологических процессов изготовления деталей и сборки узлов. Последовательность изложения справочного материала соответствует методологии технологической подготовки производства. Изложен справочный материал по производству заготовок, назначению припусков, базированию, технологическим способам обработки заготовок, обеспечению качества деталей и сборочных единиц, методике разработки технологических процессов, обработке заготовок, в том числе на станках с ЧПУ и обрабатывающих центрах, и сборке изделий машиностроения и авиадвигателестроения.

Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

Для инженерно-технических работников промышленных предприятий, студентов, аспирантов и преподавателей технических вузов.

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU



В.П. Зарубин, В.Е. Иванов, П.В. Пучков, канд-ты техн. наук
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново)
E-mail: vitaliyivanov@yandex.ru

Повышение надежности и долговечности деталей пожарных насосов методами упрочняющей обработки

Затронут один из актуальных вопросов теории и методов обеспечения надежности объектов машиностроения, в частности работоспособности узлов и агрегатов пожарной техники. Особое внимание уделяется надежности и долговечности деталей пожарных насосов. Рассмотрены методы упрочняющей обработки, применение которых может положительно повлиять на продление срока службы рабочих деталей насосов. Предложен к выбору в качестве оптимального метода упрочняющей обработки — метод алмазного выглаживания. Исследовано влияние алмазного выглаживания на геометрические параметры поверхностей деталей и их коррозионную стойкость.

One of the topical issues of the theory and methods of ensuring the reliability of mechanical engineering objects is touched upon, in particular, the operability of fire equipment. Special attention is paid to the reliability and durability of fire pump parts. Methods of hardening treatment are considered, the use of which can positively affect the prolongation of the service life of working pump parts. Proposed to choose the diamond hardening method as the optimal method of hardening treatment. The influence of diamond hardening on the geometric parameters of the surfaces of parts and their corrosion resistance are presented.

Ключевые слова: надежность, долговечность, упрочнение, деталь, алмазное выглаживание, коррозионная стойкость.

Keywords: reliability, durability, hardening, detail, diamond hardening, corrosion resistance.

Узлы и агрегаты пожарной техники подвергаются воздействию агрессивной среды, особенно это влияние сказывается на пожарных насосах. Пожарный насос — один из основных агрегатов, при помощи которого подается огнетушащее вещество к месту горения. Анализ статистики выхода из строя машин и механизмов позволяет сделать заключение, что одной из основных причин является повышенный износ поверхностей контактирующих деталей. За счет износа нарушается геометрия деталей, увеличивается зазор между соприкасающимися деталями, возрастают вибрации, нарушается плотность соединений. Это приводит к снижению подачи огнетушащих веществ и отрицательно сказывается на результате выполнения боевой задачи подразделением пожарной охраны. Анализ следов износа на деталях пожарных насосов дает возможность сделать вывод, что имеет место не только механический износ поверхности трения, но и ее разрушение в результате коррозии металла деталей (рис. 1 на стр. 3 обложки).

Цель работы — повышение эксплуатационных характеристик пожарных насосов за счет применения упрочняющей обработки деталей, подвергающихся трению. Разработать практические рекомендации для применения методов упрочняющей обработки поверхностей трения деталей пожарных насосов при их производстве или капитальном ремонте.

Сегодня существует множество способов упрочнения поверхности деталей пожарных насосов. Проведенный аналитический обзор выявил несколько основных способов, которые применяют в пожарно-спасательных подразделениях при капитальном ремонте агрегатов. На рис. 2 на стр. 3 обложки представлены основные способы по восстановлению и упрочнению валов пожарных насосов, каждый из них имеет свои преимущества и недостатки. Например, напрессовка на изношенный участок вала предварительно нагретой втулки с последующей обработкой возможна в случае значительного повреждения поверхности вала



и необходимости восстановления нескольких миллиметров по диаметру. В случае небольшого износа применение такого способа невозможно. При этом поверхность после восстановления не изменяет своих свойств в направлении увеличения прочности и износостойкости, поэтому необходимо применить к данной втулке один из методов упрочнения поверхности. Газопламенное напыление позволяет восстановить поверхность в достаточно широком диапазоне по диаметру, однако требует большого нагрева детали с возможным изменением свойств ее материала. Также применение данного способа требует дорогостоящего оборудования. Схожими характеристиками обладает и наплавка поверхности с помощью электродуговой сварки.

Указанные выше способы восстановления позволяют восстановить геометрию поверхности детали, но на ее прочностные параметры они влияют в меньшей степени и зависят от вида и качества применяемых материалов. Принцип упрочнения поверхности деталей с помощью гальванического покрытия основан на нанесении тонкого слоя защитного металла на поверхность восстанавливаемой или новой детали. Этот способ достаточно энергозатратный и требует специального оборудования. Его применение в небольших мастерских невозможно. Ультразвуковое упрочнение и алмазное выглаживание схожи между собой по принципу действия. Основное их назначение заключается в выравнивании микронеровностей поверхности деталей не за счет срезания, а за счет пластической деформации. Из этих двух способов меньших затрат на оборудование требует алмазное выглаживание. Для его осуществления достаточно использовать токарный станок и специальный инструмент.

Инструмент для проведения алмазного выглаживания возможно изготовить самостоятельно или приобрести в специализированных магазинах. Основным рабочим элементом выглаживателя является подпружиненный индентор, установленный в корпусе-державке. При контакте с поверхностью детали за счет упругости пружины и регулировочного винта создаются необходимая сила прижатия и рабочая глубина обработки. Сила прижатия и глубина обработки поверхности детали, а также скорость обработки зависят от геометрических параметров детали и от материала, из которого она изготовлена. Материал

индентора позволяет обрабатывать широкий спектр конструкционных материалов с различной твердостью. Проведенный ряд лабораторных исследований подтвердил возникновение положительного эффекта от упрочняющей обработки. На рис. 3, а представлены изменения микротвердости поверхности обрабатываемой детали после различных упрочняющих методов. Заметно увеличение показателя микротвердости в зависимости от применяемого метода упрочнения. Лучшие показатели имеет комплекс обработки детали с термообработкой и алмазным выглаживанием. Микротвердость увеличивается в 1,5–2 раза, обеспечивая более плотную структуру поверхностного слоя.

Применение термообработки в совокупности с алмазным выглаживанием для обработки деталей из стали 12Х18Н10Т значительно повышает показатели микротвердости поверхности данных деталей. Аналогичные исследования были проведены с образцами, выполненными из стали 40Х13 и стали 45. Проведенные исследования позволили определить наиболее оптимальный способ упрочнения для деталей пожарных насосов, это применение термообработки с последующим алмазным выглаживанием. Дополнительно проведены экспериментальные исследования на коррозионную стойкость с применением образцов, выполненных из тех же самых сталей, что и в предыдущем исследовании (рис. 3, б).

Наиболее эффективные способы упрочняющей обработки — точение с последующим алмазным выглаживанием и термообработка с последующим алмазным выглаживанием. Применение данных методов для обработки деталей пожарных насосов значительно повысит показатели их надежности и долговечности, так как повышается коррозионная стойкость поверхности данных деталей.

Для определения, какой из данных методов позволит повысить износостойкость поверхности к трению, были проведены исследования на машине трения СМТ-1. На рис. 3, в представлена зависимость износа поверхности детали от способа обработки.

В результате экспериментальных исследований установлено, что закалка с последующим алмазным выглаживанием позволяет снизить интенсивность изнашивания более чем в 1,5 раза.

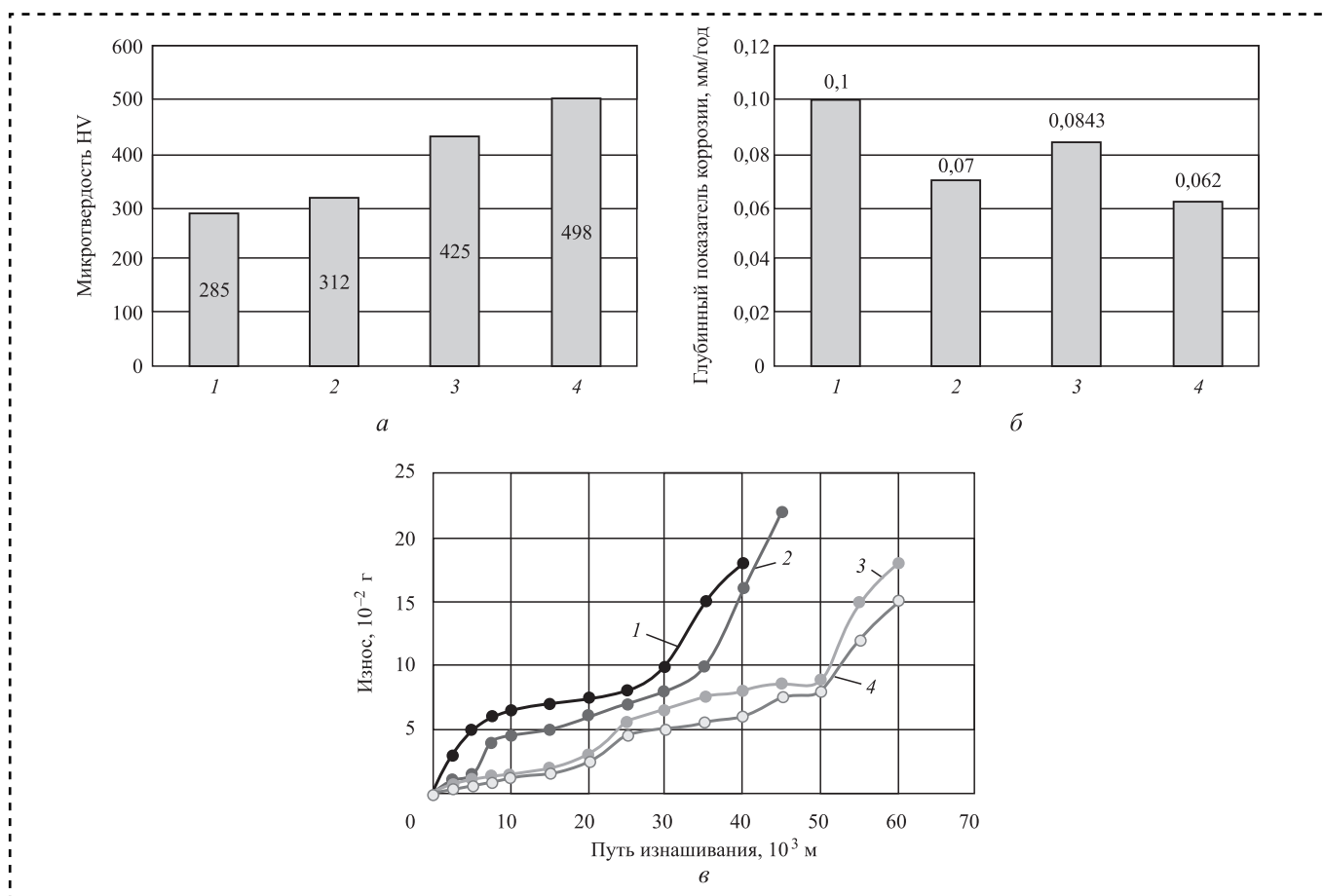


Рис. 3. Диаграммы изменения микротвердости HV (а), глубинного показателя скорости коррозии (б) и износ поверхности детали (в) в зависимости от способа обработки стали 12Х18Н10Т:

1 — точение без термообработки; 2 — точение + алмазное выглаживание; 3 — термообработка; 4 — термообработка + алмазное выглаживание

Заключение

Использование способов упрочнения рабочих деталей пожарных насосов положительно отражается на их долговечности и надежности. Их применение при изготовлении новых деталей значительно расширит ресурс работы агрегата, а при проведении ремонтных операций позволит вернуть насосу прежнее состояние, близкое к новому. Термообработка деталей с последующим алмазным выглаживанием поверхности, наиболее эффективный из рассмотренных способов.

Библиографический список

1. Пучков П.В., Иванов В.Е. Повышение долговечности соединительных рукавных головок напорных рукавов // Актуальные вопросы совершенствования инженерных систем обеспечения пожарной безопасности объектов: материалы IV Всероссийской научно-практической конференции, посвященной Году гражданской обороны. Иваново: Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, 2017. С. 186—188.

2. Полетаев В.А., Пучков П.В. Повышение качества поверхностей трения деталей электронасосов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2015. Т. 81. № 9. С. 74—76.

3. Восстановление деталей пожарных насосов нанесением металлизированных покрытий / В.А. Полетаев и др. // Пожарная и аварийная безопасность: материалы IX Международной научно-практической конференции. 2014. С. 150—153.

4. Полетаев В.А., Никитина С.А., Пучков П.В., Киселев В.В. Исследование поверхностного слоя деталей пожарных насосов // Пожарная и аварийная безопасность: материалы IX Международной научно-практической конференции. 2014. С. 154—159.

5. Полетаев В.А., Пучков П.В. Исследование механических свойств деталей с гальванопокрытием // Состояние и перспективы развития электро- и теплотехнологии. Материалы международной научно-технической конференции: XVIII Бенардосовские чтения. 2015. С. 315—319.

6. Мальцев А.Н., Топоров А.В., Иванов В.Е. Технология восстановления валов пожарных насосов // Пожарная и аварийная безопасность: материалы X Международной научно-практической конференции, посвященной 25-летию МЧС России / под общей ред. И.А. Малого. 2015. С. 158—159.

В.В. Измайлов, д-р техн. наук, **М.В. Новоселова**, канд. техн. наук,
Л.Е. Афанасьева, канд. физ.-мат. наук
(Тверской государственный технический университет)
E-mail: iz2v2@tvcom.ru

Микрогеометрия поверхностного слоя изделия из сплава титана, синтезированного электронным лучом

Представлены результаты исследования микрорельефа поверхностей образцов из титанового сплава, синтезированного электронным лучом. Профилограммы исследованных поверхностей свидетельствуют о наличии двух видов отклонений поверхности от геометрической формы: волнистости и шероховатости. Определены высотные и шаговые параметры шероховатости и волнистости в двух направлениях: параллельно движению электронного луча и перпендикулярно ему. Показано, что параметры шероховатости исследованных поверхностей сопоставимы с аналогичными параметрами поверхностей деталей после штамповки, литья, прокатки, электроискровой обработки.

The results of a study of the microrelief of the surfaces of samples of titanium alloy synthesized by an electron beam are presented. Profilograms of the investigated surfaces indicate the presence of two types of surface deviations from the geometric shape: waviness and roughness. The height and space parameters of roughness and waviness in two directions are determined: parallel to the movement of the electron beam and perpendicular to it. It is shown that the roughness parameters of the investigated surfaces are comparable with the analogous parameters of the surfaces of parts after stamping, casting, rolling, and electric spark machining.

Ключевые слова: шероховатость, волнистость, поверхность, титановый сплав, технология синтеза изделий электронным лучом.

Keywords: roughness, waviness, surface, titanium alloy, technology for the synthesis of products by an electron beam.

Введение

Разработка новых технологий модифицирования свойств металлических изделий — одно из приоритетных направлений развития современного производства. Принципиально новые возможности в этой области открывает использование концентрированных потоков энергии, и прежде всего, электронно-лучевой синтез [1, 2].

В основу технологии синтеза изделий электронным лучом (СИЭЛ) положена операция последовательного плавления слоя гранул в вакууме, что особенно важно для химически активных металлов, в частности для сплавов титана. Одновременно с синтезом изделия происходит послойное формирование его структуры. Технология СИЭЛ открывает новые возможности по созданию материалов из гранул с програм-

мированной структурой и заранее прогнозируемыми свойствами [3—5].

Цель работы — изучение микрогеометрии поверхности образца из сплава титана ВТ6, полученного по технологии СИЭЛ.

Результаты исследования микроструктуры и триботехнических свойств указанного материала приведены в работах [6—8].

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Опытный образец получен из гранул сплава титана Ti—6Al—4V шаровидной формы со средним диаметром 60...100 мкм путем послойного электронно-лучевого синтеза [8].

Для исследования микрогеометрии поверхности образца записывали профилограммы

с помощью профилографа-профилометра на длине оценивания 7...8 мм в двух направлениях: продольном (по направлению движения электронного луча) и поперечном (перпендикулярно направлению движения электронного луча) (рис. 1).

На профилограммах, записанных в направлении, перпендикулярном движению электронного луча, выделены два вида отклонений поверхности от геометрической формы, или две спектральные составляющие профиля как случайного процесса: длинноволновая и коротковолновая. Первая традиционно трактуется как волнистость поверхности, вторая — как шероховатость. Для волнистости характерна большая величина отношения шага волны к ее высоте более 50, для шероховатости — менее 50.

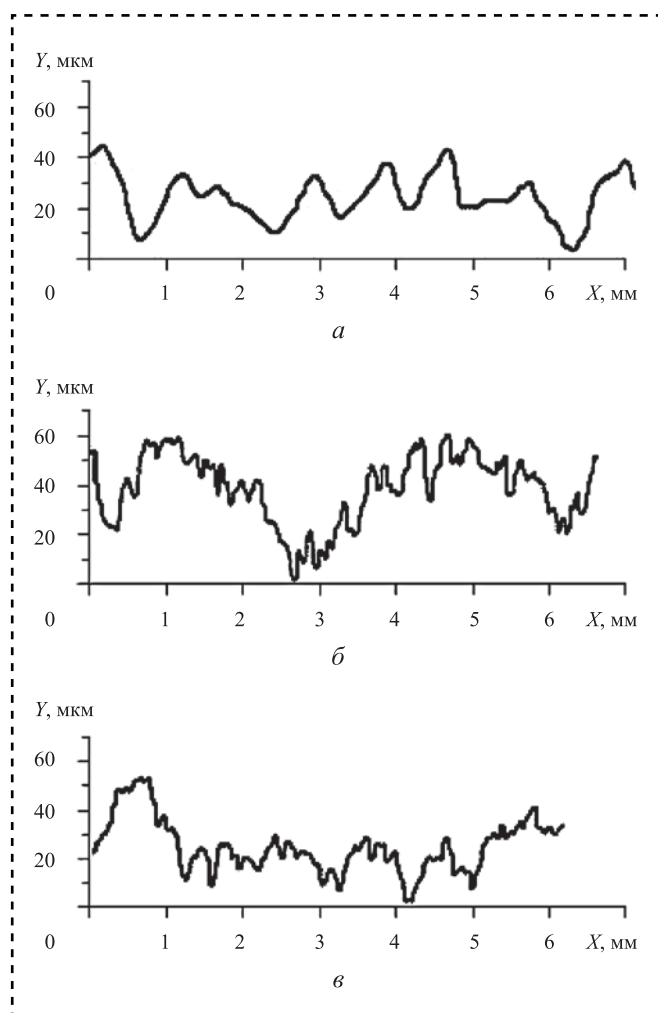


Рис. 1. Типичный вид профилограмм поверхности образца: *a* — в продольном направлении; *б* и *в* — в поперечном направлении

На основании обработки профилограмм определены высотные и шаговые параметры шероховатости и волнистости Rt , Rz , Rc , Rp , Ra , RSm , Wt и WSm согласно ГОСТ Р ИСО 4287—2014 (табл. 1). Параметр R_{10z} (ранее обозначавшийся просто Rz) — высота неровностей профиля по 10 точкам — широко используется для характеристики шероховатости и приведен в многочисленных справочных изданиях для самых различных технических поверхностей, поэтому было решено использовать его для исследованных поверхностей в целях сравнения их шероховатости с шероховатостью поверхностей после типичных видов обработки.

Параметр Rt определяется на длине оценки, остальные параметры шероховатости — на базовой длине.

Шероховатость поверхности исследованных образцов, полученных по технологии СИЭЛ, сравнима с шероховатостью поверхностей деталей, полученных такими типичными способами изготовления, как штамповка, литье, прокатка (рис. 2) [9]. Такие поверхности, как правило, подвергают последующей чистовой обработке для повышения качества и уменьшения шероховатости.

В табл. 2 приведены некоторые соотношения параметров шероховатости и волнистости для исследованных образцов в сравнении с типичными величинами аналогичных соотношений из литературных источников для самых различных технологических методов обработки поверхностей деталей.

Соотношения высотных параметров Rz , Rp , Ra , R_{10z} для исследованных образцов хорошо согласуются с известными величинами аналогич-

Вид обработки	Параметр шероховатости Ra , мкм				
	0,8	1,6	3,2	6,3	12,5
Электроискровая обработка					
Холодная прокатка					
Штамповка					
Литье					
СИЭЛ					

Рис. 2. Сравнение параметров шероховатости поверхностей после СИЭЛ и механической обработки



Параметры шероховатости и волнистости

Параметр микрогеометрии	Направление	
	Продольное	Поперечное
<i>Шероховатость</i>		
Общая высота профиля Rt , мкм	46	56
Максимальная высота профиля Rz , мкм	46	20...30
Средняя высота элементов профиля Rc , мкм	23,7	10,5...17,4
Максимальная высота пика профиля Rp , мкм	20	9...14
Арифметическое среднее отклонение профиля Ra , мкм	7,1	3,7...4,4
Высота неровностей профиля по десяти точкам R_{10z} , мкм	29,4	14,4...22,6
Средняя ширина элементов профиля RSm , мм	1,27	0,22...0,52
<i>Волнистость</i>		
Общая высота профиля Wt , мкм	—	42
Средняя ширина элементов профиля WSm , мм	—	3,6

Таблица 2
Корреляционные соотношения параметров шероховатости и волнистости

Параметры	Направление		Типичные значения
	Продольное	Поперечное	
<i>Шероховатость</i>			
Rz/Ra	6,5	5,4...6,8	5...7
Rp/Ra	2,8	2,4...3,2	2,5...3,0
R_{10z}/Ra	4,1	3,9...5,1	4...5
Rc/R_{10z}	0,8	0,73...0,77	—
RSm/Rz	27,6	11...17	<50
<i>Волнистость</i>			
WSm/Wt	—	85	>50

ных соотношений, несмотря на принципиально различные по физической природе методы обработки поверхностей.

Соотношение параметров Rc/R_{10z} представляет интерес с той точки зрения, что новый параметр Rc выступает в известной мере эквивалентом прежнего весьма широко распространенного параметра R_{10z} (или просто Rz в прежних обозначениях). Ожидаемо величина этого отношения оказалась несколько меньше единицы, так как параметр R_{10z} определен усреднением высот пяти самых высоких выступов и пяти самых глубоких впадин, тогда как параметр Rc рассчитан на основании усреднения высот всех элементов профиля на базовой длине.

Величины соотношений высотных и шаговых параметров RSm/Rz и WSm/Wt , приведенные в табл. 2, подтверждают обоснованность деления спектральных составляющих профиля на длинноволновую и коротковолновую, т.е. на шероховатость и волнистость.

Первоначально деление отклонений поверхности от правильной геометрической формы

на шероховатость и волнистость возникло применительно к поверхностям, полученным механическими методами обработки. Шероховатость в этом случае связана со следами воздействия обрабатывающего инструмента на обрабатываемую деталь, а волнистость — с колебаниями обрабатывающего инструмента, возникающими в результате недостаточной жесткости его крепления. В случае технологии СИЭЛ волнистость, очевидно, связана с периодическим характером движения электронного луча (сканированием поверхности), а шероховатость возникает как результат теплофизических процессов, протекающих на площадке контакта электронного луча с обрабатываемой поверхностью за счет кинетической энергии электронов. В любом случае с математической точки зрения профиль поверхности можно рассматривать как реализацию случайного процесса, поэтому приведенное в табл. 2 сравнение соотношений параметров рельефа поверхности вполне обоснованно.

Еще одним весьма информативным параметром, характеризующим рельеф поверхности, является кривая коэффициента смятия профиля, или кривая Эббота—Файрстоуна (ГОСТ Р ИСО 4287—2014), которую чаще называют опорной кривой. Опорная кривая наглядно показывает распределение материала по высоте шероховатого слоя и является, по сути, интегральной функцией распределения ординат профиля. Примеры опорных кривых для исследу-

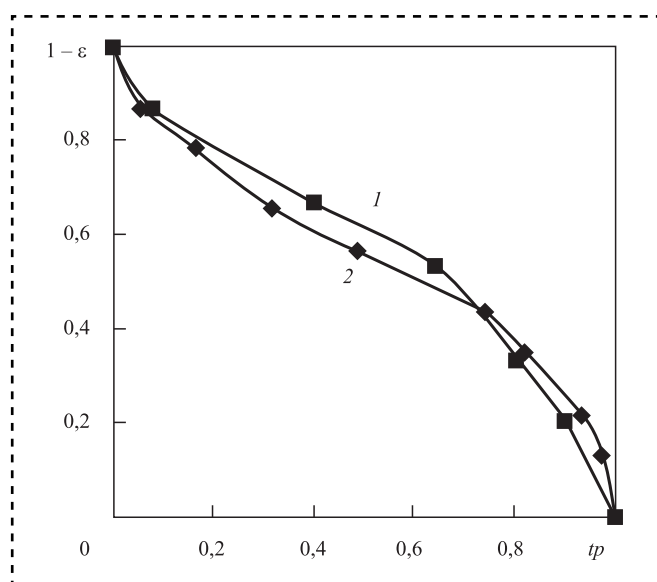


Рис. 3. Опорные кривые для поперечной (1) и продольной (2) шероховатости

дованных поверхностей представлены на рис. 3 в относительных координатах, где $\varepsilon = p/Rz$; p — уровень сечения профиля (расстояние между линией выступов профиля и линией, пересекающей профиль эквидистантно линии выступов), tp — относительная опорная длина профиля (отношение суммарной длины отрезков, отсекаемых на заданном уровне p в материале профиля линией, эквидистантной средней линии, к базовой длине или длине оценки).

Опорные кривые для продольной и поперечной шероховатостей практически совпадают и имеют типичную форму, характерную для аналогичных кривых практически всех технических поверхностей после самых различных по технологии методов обработки. Сходство опорных кривых для различных по происхождению технических поверхностей еще раз подтверждает обоснованность использования единых методов и количественных параметров для характеристики их качества.

Заключение

Микрорельеф поверхностей деталей, полученных по технологии СИЭЛ, характеризуется двумя видами отклонений от правильной геометрической формы, которые традиционно расцениваются как шероховатость и волнистость. При этом волнистость наблюдается в направлении, перпендикулярном движению электронного луча. В количественном отношении шероховатость исследованных поверхностей довольно значительна и сравнима с верхними значениями диапазона параметров шероховатости поверхностей деталей, полученных литьем, штамповкой, прокаткой. В некоторых случаях такие поверхности могут использоваться без последующей обработки, но чаще всего они подвергаются той или иной финишной обработке.

Несмотря на различные физические принципы технологий механической обработки поверхности и технологии СИЭЛ, характерные соотношения параметров микрорельефа поверхностей, полученных с помощью указанных технологических методов, весьма близки. Это объясняется тем, что микрорельеф любой технической поверхности можно рассматривать как случайное поле, а профиль такой поверх-



ности — как реализацию случайного процесса, и использовать для их описания общие параметры и соотношения.

Библиографический список

1. **Рыкалин Н.Н., Углов А.А., Зуев И.В., Кокора А.Н.** Лазерная и электронно-лучевая обработка материалов: справочник. М.: Машиностроение, 1985. 496 с.
2. **Соколов Ю.А., Скворцов И.В.** Установка "ЭЛУ-27": новые возможности электронно-лучевых технологий // Технология и оборудование электронно-лучевой сварки — 2011. Материалы второй междунар. науч.-техн. конф. СПб.: ООО Агенство "ВиТ-Принт", 2011. С. 194—202.
3. **Соколов Ю.А.** Особенности моделирования процесса послойного синтеза изделий с помощью электронного луча // Металлообработка. 2013. № 4. С. 44—49.
4. **Соколов Ю.А.** Получение композиционных материалов с программируемой структурой из гранул различного химического состава методом послойного электронно-лучевого синтеза // Металлообработка. 2013. № 3. С. 47—51.

5. **Полькин И.С., Никитин И.С., Бураго Н.Г.** Получение деталей из титана с "Тэйлор"-структурой и свойствами // Титан. 2012. № 4 (38). С. 37—41.

6. **Лукьянов А.А., Соколов Ю.А.** Механические свойства композиционных материалов, полученных методом синтеза электронным лучом // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 4 (207). С. 174—180.

7. **Соколов Ю.А., Афанасьева Л.Е., Новоселова М.В., Гречишкин Р.М.** Триботехнические свойства сплава титана, полученного по технологии синтеза изделий электронным лучом // Механика и физика процессов на поверхности и в контакте твердых тел, деталей технологического и энергетического оборудования: межвуз. сб. науч. тр. Тверь: ТвГТУ, 2014. С. 118—123.

8. **Микроструктура** и свойства сплава титана Ti—6Al—4V, полученного по технологии послойного электронно-лучевого синтеза / Ю.А. Соколов и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2015. № 6 (720). С. 45—50.

9. **Уайтхауз Д.** Метрология поверхностей. Принципы, промышленные методы и приборы. Долгопрудный: Издательский Дом "Интеллект", 2009. 472 с.

ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ:

Анисимова М.А., Кичанова А.А., Родионова Е.Н. Моделирование поверки средств измерений сборочного производства

Поляков П.А. Распределение температурного поля по толщине тормозного диска

Шишкарёв М.П. Модернизация адаптивной фрикционной муфты второго поколения

Иванов В.Е., Пучков П.В. Исследование технического состояния объектов машиностроения на основе компьютерного моделирования на примере разработки зажимов для устранения неисправностей пожарных рукавов



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

Анализ и синтез модернизированной адаптивной фрикционной муфты второго поколения

Показано, что при меньшем, чем у ведущей пары, среднем радиусе поверхностей трения ведомых пар основной фрикционной группы адаптивной фрикционной муфты с дифференцированными парами трения точность срабатывания муфты повышается при увеличении среднего радиуса поверхностей трения ведомых пар. Доказано, что с ростом отношения значений средних радиусов поверхностей трения ведомых и ведущей пар трения основной фрикционной группы повышается номинальная нагрузочная способность муфты.

It is shown that with less than the leading pair, the average radius of the friction surfaces of the driven friction pairs of the main group of adaptive frictional clutch with different friction pairs, the accuracy of the coupling increases with increasing average radius of the friction surfaces of the driven pairs. It is proved that with the increase in the ratio of the values of the average radii of the friction surfaces of the driven and leading friction pairs of the main friction group, the nominal load capacity of the coupling increases.

Ключевые слова: адаптивная фрикционная муфта, второе поколение, модернизация, анализ, синтез, точность срабатывания.

Keywords: adaptive friction clutch, second generation, modernization, analysis, synthesis, accuracy of operation.

Введение

Для адаптивной фрикционной муфты (АФМ) второго поколения характерно наличие дополнительной фрикционной группы (ДФГ), которая не охвачена отрицательной обратной связью [1]. Благодаря этому вращающий момент ДФГ прямо пропорционален изменяющемуся в процессе работы коэффициенту трения и более эффективно действует на нажимной диск. Увеличенный вращающий момент на нажимном диске создает более высокую распорную силу, отжимающую друг от друга пары трения основной фрикционной группы (ОФГ), что приводит к повышению точности срабатывания муфты по сравнению с АФМ первого поколения [2, 3].

В ряде случаев практического применения АФМ второго поколения (базовый вариант) она не обеспечивает эффективную защиту от перегрузок элементов привода машины вследствие ограниченной точности срабатывания. Это обусловлено, прежде всего, конечной макси-

мальной величиной коэффициента усиления (КУ) управляющего устройства (УУ) обратной связи [4], которую можно назначать исходя из условия функционирования отрицательной обратной связи в интервале изменения коэффициента трения $f_{\min} \dots f_{\max}$ (где f_{\min} и f_{\max} — минимальный и максимальный коэффициенты трения соответственно).

Если упомянутая величина КУ будет превышена, то при определенном значении коэффициента трения, таком, что $f_i < f_{\max}$ (где f_i — текущий коэффициент трения), распорная (отжимная) сила УУ при наступлении перегрузки превысит силу пружины, замыкающей пары трения ОФГ, в результате чего АФМ будет работать в режиме положительной обратной связи.

Это приведет к появлению дополнительной осевой деформации замыкающей пружины и прогрессирующему увеличению момента сил трения между парами трения ДФГ, вследствие чего уменьшится точность срабатывания муфты [5].

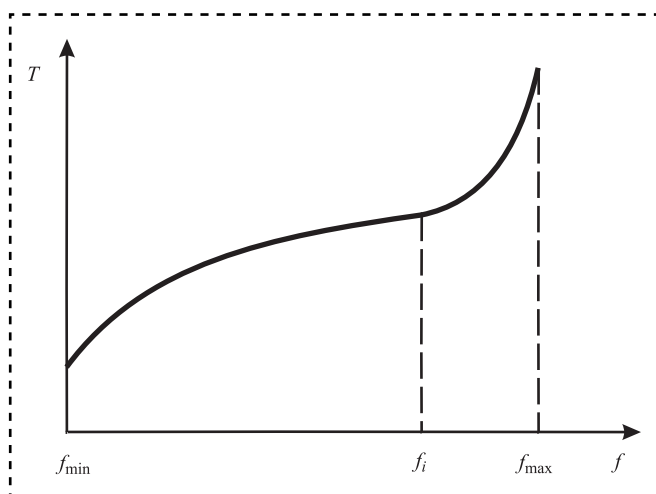


Рис. 1. Нагрузочные характеристики АФМ второго поколения для режимов отрицательной и положительной обратной связи

На рис. 1 участок кривой, соответствующий интервалу значений коэффициента трения $f_{\min} \dots f_i$, характеризует работу муфты в адаптивном режиме: кривая нагрузочной характеристики является вогнутой относительно оси абсцисс. Наоборот, на участке кривой, соответствующей интервалу $f_i \dots f_{\max}$, работа муфты происходит в режиме положительной обратной связи: кривая нагрузочной характеристики выпуклая относительно оси абсцисс.

В работе [6] для повышения точности срабатывания базового варианта АФМ второго поколения использован прием, основанный на уменьшении величины вращающего момента ДФГ. Благодаря этому возможно увеличение КУ обратной связи, что и является основной причиной повышения точности срабатывания муфты.

Цель работы — исследование влияния геометрических параметров фрикционных групп базового варианта АФМ второго поколения на ее точность срабатывания.

Предварительно провели модернизацию АФМ первого поколения с дифференцированными парами трения фрикционной группы, которая заключалась в изменении среднего радиуса поверхностей трения ведущей и ведомой фрикционных групп таким образом, что отношение величин средних радиусов не было равно единице [7].

Исследование показало, что при определенных значениях указанного отношения точность срабатывания модернизированной АФМ повышалась по сравнению с базовым вариантом, в котором средние радиусы поверхностей трения ведущих и ведомых фрикционных пар одинаковы.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Предмет исследования — базовый вариант АФМ второго поколения, принципиальная схема которого показана на рис. 2. Полумуфты 1 и 2 связаны между собой с помощью пакета фрикционных дисков 3 и 4, а также фрикционного диска 5 и нажимного диска 6.

Диски 3, 4 и 6 образуют ОФГ, а диски 5 и 6 — ДФГ.

Нажимной диск 6 лишен кинематической связи в окружном направлении со ступицей полумуфты 1.

Крайний левый фрикционный диск 4 имеет механический контакт с упорным диском 7, жестко закрепленным на ступице полумуфты 1.

Диск 3 связан со ступицей нажимного диска 6 посредством шлицевого соединения, обеспечивающего их взаимную подвижность в осевом направлении. Диски 4 и 5 аналогичным способом соединены с барабаном полумуфты 2.

Отжимной стабилизирующий механизм — управляющее устройство (УУ) муфты состоит из тел качения 8, которые размещены в скошенных гнездах, выполненных на взаимообра-

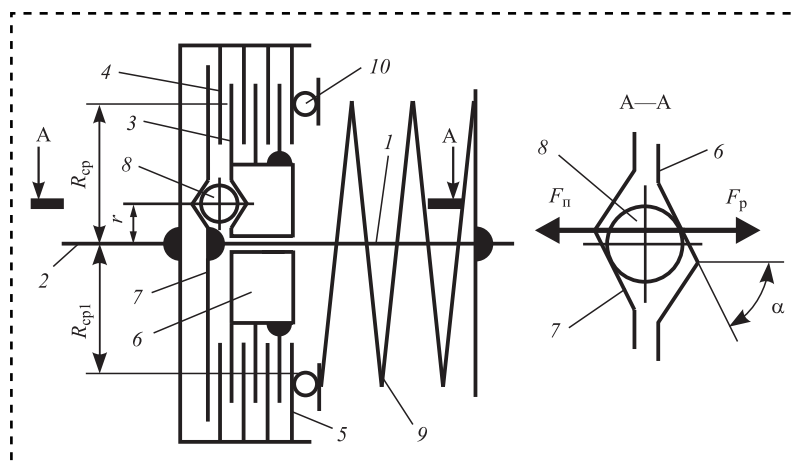


Рис. 2. Принципиальная схема модернизированной АФМ второго поколения



щенных торцевых поверхностях нажимного 6 и упорного 7 дисков (рис. 2, сечение А—А).

Силовое замыкание пакета фрикционных дисков осуществляется посредством нажимной пружины 9, поставленной в муфту с предварительным натяжением. Усилие пружины передается через упорный подшипник 10.

Для установления зависимости вращающего момента АФМ от коэффициента трения между фрикционными дисками 3, 4, 5 и 6 учитываем, что нагрузка в муфте передается по трем параллельным силовым потокам:

- парой трения 4—7;
- парами трения 3—4—6;
- парой трения 5—6.

В соответствии с этим запишем равенство:

$$T_{\Pi} = T_1 + T_2 + T_3, \quad (1)$$

где T_{Π} — полный вращающий момент АФМ;

- T_1 — момент сил трения пары 4—7;
- T_2 — момент сил трения пар 3—4—6;
- T_3 — момент сил трения пары 5—6.

Пары трения 4—7 и 3—4—6 в процессе эксплуатации работают в одинаковых условиях, между ними действует одинаковое замыкающее усилие, однако для исследования АФМ вращающие моменты T_1 и T_2 разделены, поскольку далее будут использованы различные значения средних радиусов поверхностей трения этих пар.

На пары трения 4—7 и 3—4—6 действует кроме силы пружины 9 распорная (отжимная) сила F_p , возникающая между телами качения 8 и контактирующими с ними элементами 6 и 7 в результате передачи нажимным диском вращающего момента. Этот момент складывается из суммы моментов T_2 и T_3 , поэтому распорную силу вычисляем по формуле:

$$F_p = \frac{T_2 + T_3}{r} \operatorname{tg} \alpha, \quad (2)$$

где α — угол скоса гнезда под тело качения 8 (рис. 2, сечение А—А);

r — радиус окружности, на которой расположены тела качения 8.

Выражения для вычисления вращающих моментов T_1 , T_2 и T_3 запишем в следующем виде:

$$T_1 = R_{\text{ср1}} f_i (F_{\Pi} - F_p); \quad (3)$$

$$T_2 = z_1 R_{\text{ср1}} f_i (F_{\Pi} - F_p); \quad (4)$$

$$T_3 = F_{\Pi} R_{\text{ср}} f_i, \quad (5)$$

где $R_{\text{ср}}$ — средний радиус поверхностей трения дисков 4 и 7;

f_i — коэффициент трения между фрикционными дисками 4, 5, 6 и 7;

F_{Π} — сила натяжения замыкающей пружины 9;

z_1 — число пар трения фрикционных дисков 3—4—6;

$R_{\text{ср1}}$ — средний радиус поверхностей трения фрикционных дисков 3—4—6.

Формула (2) не позволяет непосредственно вычислить величину распорной силы, используя данные о геометрических и силовых параметрах АФМ, поэтому, подставив в эту формулу правые части выражений (4) и (5), найдем F_p после решения составленного уравнения:

$$F_p = F_{\Pi} C f_i \frac{1 + z_1 n}{1 + z_1 n C f_i}, \quad (6)$$

где C — КУ обратной связи, $C = \frac{R_{\text{ср}}}{r} \operatorname{tg} \alpha$;

n — коэффициент,

$$n = \frac{R_{\text{ср1}}}{R_{\text{ср}}}. \quad (7)$$

Подставляя правую часть соотношения (6) в выражения (3) и (4) и учитывая соотношение (5) в формуле (1), находим:

$$T_{\Pi} = F_{\Pi} R_{\text{ср}} f_i \frac{z_1 n + 2 - C f_i}{1 + z_1 n C f_i}. \quad (8)$$

Значение коэффициента точности АФМ [8] вычисляем как отношение максимального вращающего момента к минимальному моменту с учетом соотношения (8):

$$K_{\Gamma} = \frac{f_{\max} (z_1 n + 2 - C f_{\max}) (1 + z_1 n C f_{\min})}{f_{\min} (z_1 n + 2 - C f_{\min}) (1 + z_1 n C f_{\max})}, \quad (9)$$

где f_{\min} , f_{\max} — минимальный и максимальный коэффициенты трения соответственно.

Для того чтобы найти зависимость коэффициента точности от коэффициента n , необходи-



мо установить ограничение сверху величины C . Для базового варианта АФМ второго поколения, имеющего одинаковые средние радиусы поверхностей трения обеих фрикционных групп [1], данное ограничение имеет следующий вид:

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}. \quad (10)$$

Здесь и выше число пар трения ДФГ принято равным единице, так как принято максимальное значение КУ C , что обеспечивает наибольшую точность срабатывания муфты [9].

При установлении упомянутого ограничения для рассматриваемой АФМ решим уравнение $F_p = F_{\text{п}}$ при максимальном значении коэффициента трения, которое соответствует наибольшей распорной силе (см. выражение (6)):

$$C \leq \frac{1}{f_{\max}}.$$

Полученное ограничение величины C в данном случае идентично ограничению (10). Следовательно, средний радиус поверхностей трения ведомых пар ОФГ не влияет на ограничение величины C .

Далее принимаем ограничение КУ в форме равенства, поскольку для АФМ, в которой действует одноконтурная отрицательная обратная связь, точность срабатывания увеличивается по мере роста C .

Подставляя принятое ограничение в выражение (9), получаем:

$$K_T = \frac{f_{\max}(f_{\max} + z_1 n f_{\min})}{f_{\min}(z_1 n f_{\max} + 2f_{\max} - f_{\min})}. \quad (11)$$

Для установления характера функции $K_T(n)$ согласно выражению (11) преобразуем последнее, введя коэффициент ширины интервала изменения коэффициента трения:

$$m = \frac{f_{\max}}{f_{\min}}.$$

В результате этого выражение (11) примет вид:

$$K_T = m \frac{m + z_1 n}{z_1 m n + 2m - 1}. \quad (12)$$

Найдем первую производную функции (12):

$$(K_T)'_n = 2z_1 m - z_1 - z_1 m^2. \quad (13)$$

Производная (13) записана без учета постоянного множителя m в выражении (12) и знаменателя производной, не влияющего на ее знак.

Точность срабатывания АФМ будет повышаться (а коэффициент точности уменьшаться) в функции коэффициента n , если производная (13) отрицательная. С учетом этого действительное множество решений квадратного неравенства относительно неизвестного m запишем как

$$m \in (-\infty; 1) \cup (1; +\infty); \\ m \in R,$$

где R — множество действительных чисел.

Таким образом, при любом реальном интервале изменения коэффициента трения точность срабатывания АФМ повышается при уменьшении коэффициента n .

Представление о количественном изменении K_T в зависимости от коэффициента n и соотношении K_T с величиной коэффициента точности АФМ при $n = 1$ можно получить из графика, показанного на рис. 3. График построен по вы-

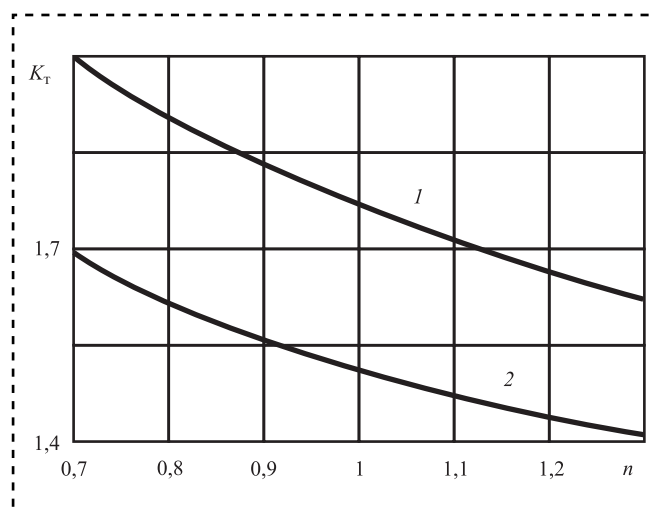


Рис. 3. Зависимости коэффициента точности АФМ от коэффициента n



ражению (12) с исходными данными: $m = 8$, $z_1 = 6$ (кривая 1).

В целях проверки влияния параметра z_1 на величину K_T построена кривая 2 при $z_1 = 10$.

Анализ графиков показывает следующее:

— точность срабатывания исследуемой АФМ уменьшается по мере уменьшения коэффициента n ;

— с увеличением числа ведомых пар трения ОФГ точность срабатывания АФМ повышается, однако в пределах одного значения z_1 уменьшение точности срабатывания муфты при уменьшении коэффициента n (кривая 1) не столь значительно, по сравнению с $z_1 = 6$ (кривая 1);

— абсолютная величина снижения точности срабатывания АФМ составляет: при $z_1 = 6$ — в 1,12 раза, при $z_1 = 10$ — в 1,11 раза, т.е. практически одинаковая.

Снижение точности срабатывания АФМ в результате уменьшения коэффициента n объясняется снижением значения вращающего момента, передаваемого ведомыми парами трения ОФГ и парой трения ДФГ. В результате этого уменьшается распорная сила.

Повышение точности срабатывания АФМ, обусловленное увеличением числа ведомых пар трения ОФГ (рис. 3, кривая 2), является следствием увеличения вращающего момента, передаваемого этими парами, и увеличения распорной силы.

Выше проанализированы части графиков 1 и 2, построенные при $n \leq 1$ (см. рис. 3). При этом имеется в виду, что средний радиус поверхностей трения ведомых пар меньше, чем ведущей пары трения ОФГ или равен ему. Рассмотрим вариант АФМ, в котором средний радиус поверхностей трения ведомых пар ОФГ больше, чем аналогичный размер ведущей пары трения. При этом, во избежание увеличения радиальных габаритов муфты, изменение коэффициента n может быть достигнуто за счет среднего радиуса поверхностей трения ведущей пары трения ОФГ при фиксированном среднем радиусе поверхностей трения ведомых пар.

Идея увеличения коэффициента n больше единицы для повышения точности срабатывания АФМ основана на следующих рассуждениях. Точность срабатывания исследуемой АФМ по-

вышается при увеличении коэффициента n (см. рис. 3). Физическая картина данного явления заключается в том, что с увеличением коэффициента n возрастает распорная сила, увеличение которой должно быть больше, чем в АФМ с $n \leq 1$. Это обусловлено тем, что в связи с уменьшением среднего радиуса поверхностей трения ведущей пары ОФГ увеличивается та часть вращающего момента, которую передают ведомые пары (при постоянном вращающем моменте АФМ). Следовательно, это должно отразиться на абсолютной величине распорной силы и на динамике ее изменения.

Графики функции (12) при $n > 1$ на рис. 3 показывают, что принятая гипотеза верна — это подтверждает более высокая, чем при $n \leq 1$, точность срабатывания АФМ.

В работе [8] предложена и исследована АФМ второго поколения, в конструкции которой пара трения ДФГ имеет средний радиус поверхностей трения, меньший, чем у пар трения ОФГ. Это позволяет повысить точность срабатывания АФМ. Эффект повышения точности срабатывания основан на том, что закономерность изменения распорной силы при уменьшении среднего радиуса поверхностей трения ДФГ приближается к аналогичному закону "идеальной" АФМ.

В связи с этим исследуем вариант АФМ, в которой неодинаковыми будут средние радиусы поверхностей трения обеих фрикционных групп.

Используя принятое выше соотношение между величинами средних радиусов поверхностей трения ведущей и ведомых пар трения ОФГ, запишем выражение:

$$n_1 = \frac{R_{cp2}}{R_{cp}}, \quad (14)$$

где R_{cp2} — средний радиус поверхностей трения ДФГ.

Тогда вращающий момент, передаваемый ДФГ:

$$T_3 = n_1 F_{п} R_{cp} f_i. \quad (15)$$

Подставляя правую часть соотношения (15) в формулу (2) и учитывая в ней правую часть



выражения (4), получаем формулу для вычисления распорной силы:

$$F_p = F_n C f_i \frac{z_1 n + n_1}{1 + z_1 n C f_i}. \quad (16)$$

Используя правую часть соотношения (16) в формулах (3) и (4), а последние — в равенстве (1), находим выражение для вычисления вращающего момента АФМ:

$$T_n = F_n R_{cp} f_i \frac{1 + n_1 + z_1 n - C n_1 f_i}{1 + z_1 n C f_i}. \quad (17)$$

Полученный результат (правая часть соотношения (17)) отличается от правой части выражения (8). Можно предположить, что и закономерность изменения вращающего момента T_n в данном случае будет отличаться от закономерности изменения момента T_n при $n = 1$.

На основании соотношения (17) формула для вычисления коэффициента точности АФМ имеет следующий вид:

$$K_T = \frac{f_{\max} (1 + n_1 + z_1 n - C n_1 f_{\max}) (1 + z_1 n C f_{\min})}{f_{\min} (1 + n_1 + z_1 n - C n_1 f_{\min}) (1 + z_1 n C f_{\max})}. \quad (18)$$

Для определения качественной и количественной характеристик функции (18) установим ограничение сверху величины C для рассматриваемого случая. Приравняем к F_n правую часть соотношения (16) — это будет соответствовать предельному адаптивному режиму работы АФМ при максимальном значении коэффициента трения. Имеем:

$$C \leq \frac{1}{n_1 f_{\max}}. \quad (19)$$

Полученный результат соответствует ранним данным и подтверждает, что ограничение величины C зависит только от геометрических параметров пары трения ДФГ.

Принимая соотношение (19) в форме равенства, что соответствует максимальной точности срабатывания АФМ, и используя его в формуле (18), получаем выражение для вычисления коэффициента точности муфты, не содержащее в явном виде параметр C :

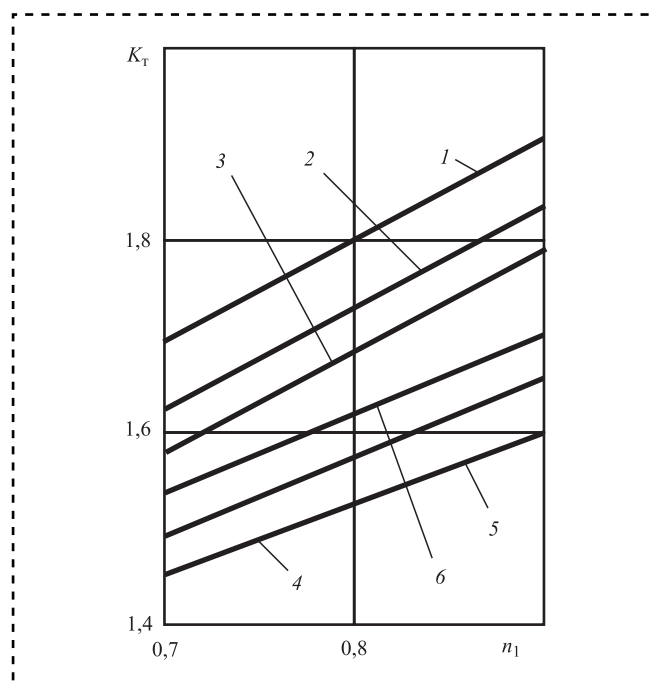


Рис. 4. Зависимости коэффициента точности от коэффициента n_1

$$K_T = \frac{f_{\max} (n_1 f_{\max} + z_1 n f_{\min})}{f_{\min} [f_{\max} (1 + n_1 + z_1 n) - f_{\min}]}. \quad (20)$$

Графики функции $K_T(n_1)$, построенные при различных коэффициентах n с учетом выражения (20), приведены на рис. 4. Исходные данные: $f_{\min} = 0,1$; $f_{\max} = 0,8$; $z_1 = 6$. Кривая 1 построена при $n = 0,7$, кривые 2 и 3 — при $n = 0,8$ и $n = 0,9$ соответственно.

Графики 1—3 на рис. 4 показывают следующее:

- с увеличением коэффициента n_1 точность срабатывания АФМ уменьшается при фиксированном значении коэффициента n ;

- с увеличением коэффициента n точность срабатывания АФМ повышается, а при постоянном значении коэффициента n — уменьшается при увеличении коэффициента n_1 (кривые 2 и 3);

- сопоставление кривых 1—3 на рис. 4 и кривой 1 на рис. 3 показывает, что при $n_1 < 1$ точность срабатывания АФМ увеличивается, причем значительно — при меньших коэффициентах n_1 (2,0 и 1,7 соответственно).

Оценим влияние коэффициента n на точность срабатывания АФМ при значениях этого коэффициента, превышающих единицу, в абсолютных величинах коэффициента точности.

Это представляет интерес, поскольку выше установлено увеличение точности срабатывания АФМ с $n_1 = 1$ и при $n > 1$. На это же указывают и данные графиков на рис. 4. Кривая 4 построена при $n = 1,1$, кривая 5 — при $n = 1,2$. Для сравнения на рис. 4 показан график зависимости (20), построенный при $n = 1$ (кривая б).

Графики показывают следующее:

- при фиксированном значении коэффициента n точность срабатывания АФМ уменьшается с увеличением коэффициента n_1 ;

- с увеличением коэффициента n точность срабатывания АФМ повышается при фиксированном значении коэффициента n_1 (рис. 4, кривые 4 и 5);

- точность срабатывания АФМ при значениях $n > 1$ выше, чем при $n = 1$ (рис. 4, кривые 4–6).

Указанное изменение точности срабатывания АФМ объясняется тем, что с увеличением коэффициента n возрастает средний радиус поверхностей трения ведомых пар ОФГ (см. соотношение (7)) и, соответственно, момент сил трения этих пар. В результате этого увеличивается распорная сила, что при неизменной величине C приводит к повышению точности срабатывания.

Исследование нагрузочной способности муфты

Выше показано, что увеличение коэффициента n приводит к повышению точности срабатывания АФМ. Одновременно с этим уве-

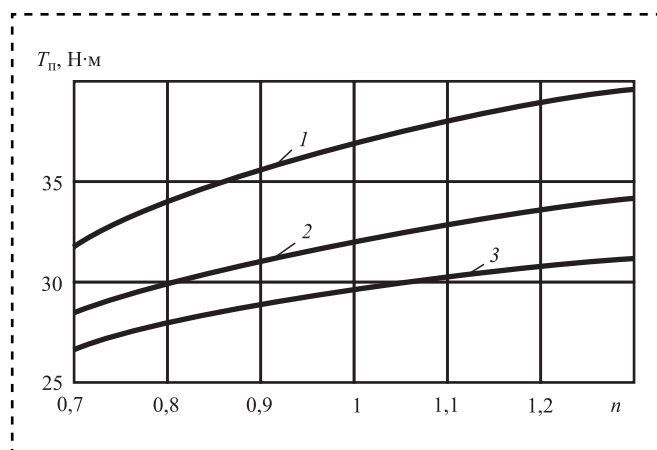


Рис. 5. Зависимости вращающего момента АФМ от коэффициента n

личение распорной силы ведет к уменьшению момента сил трения всех пар ОФГ.

Следовательно, из предыдущего этапа исследования неясно, как будет изменяться вращающий момент АФМ при изменении коэффициента n .

График зависимости $T_{\text{п}}(n)$, построенный по соотношению (17), показан на рис. 5 (кривая 1). Исходные данные: $F_{\text{п}} = 800$ Н, $R_{\text{ср}} = 0,1$ м, $z_1 = 6$, $f_i = f_{\text{мин}} = 0,1$, $n_1 = 1$. Таким образом, кривая 1 отражает график нагрузочной способности АФМ.

Кривые 2 и 3 на рис. 5 отражают графики зависимости $T_{\text{п}}(n)$ и построены соответственно при $n_1 = 0,8$ и $n_1 = 0,7$. Остальные исходные данные сохранены прежними.

Анализ графиков показывает:

- с увеличением коэффициента n наблюдается рост номинального вращающего момента АФМ, независимо от коэффициента n_1 (кривые 1–3);

- с уменьшением коэффициента n_1 уменьшается номинальный вращающий момент АФМ, независимо от коэффициента n (кривые 1–3);

- абсолютный прирост номинального вращающего момента АФМ в пределах изменения коэффициента n наибольший при максимальном значении коэффициента n_1 (кривая 1);

- при увеличении коэффициента n свыше единицы номинальный вращающий момент АФМ превышает аналогичный показатель муф-

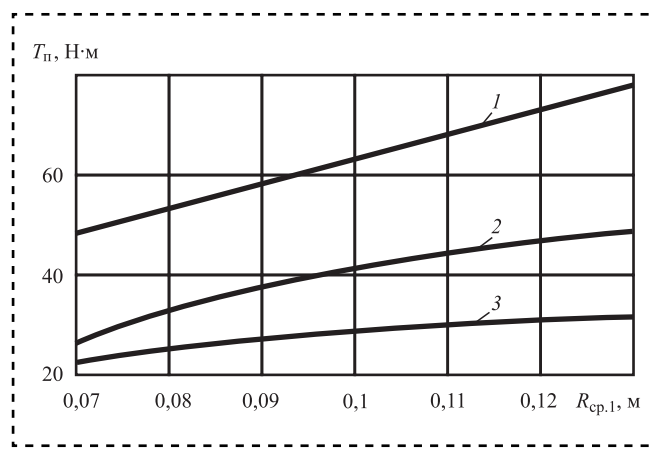


Рис. 6. Зависимости вращающего момента АФМ от среднего радиуса поверхностей трения ОФГ



ты при исходных значениях коэффициентов $n = n_1 = 1$ (кривая 1).

Следовательно, при росте коэффициента n вращающий момент АФМ увеличивается быстрее в функции среднего радиуса поверхностей трения ведомых пар ОФГ, чем происходит его уменьшение в функции распорной силы.

Для подтверждения этого предположения аналитическим способом запишем:

$$T_{\Pi} = F_{\Pi} f_{\min} (2R_{\text{ср}1} + z_1 R_{\text{ср}1}). \quad (21)$$

Соотношение (21) отражает вращающий момент АФМ без учета распорной силы F_p .

График функции $T_{\Pi}(R_{\text{ср}1})$, построенный с учетом выражения (21), показан на рис. 6. Кривая 1 построена по тем же исходным данным, что и графики, изображенные на рис. 5. Принято $n_1 = 1$.

Для установления зависимости $T_{\Pi}(F_p)$ представим F_p через параметр $R_{\text{ср}1}$ в формуле (6), воспользовавшись для этого выражением (7):

$$F_p = F_{\Pi} C f_{\min} \frac{z_1 R_{\text{ср}1} / R_{\text{ср}} + 1}{1 + z_1 R_{\text{ср}1} / R_{\text{ср}} C f_{\min}}. \quad (22)$$

Подставляя правую часть соотношения (22) в формулы (3) и (4) и используя также формулу (5) в равенстве (1), получаем:

$$T'_{\Pi} = F_{\Pi} f_{\min} \times \left[(z_1 R_{\text{ср}1} + R_{\text{ср}}) C f_{\min} \times \frac{z_1 R_{\text{ср}1} / R_{\text{ср}} + 1}{1 + z_1 R_{\text{ср}1} / R_{\text{ср}} C f_{\min}} + R_{\text{ср}} \right]. \quad (23)$$

Выражение (23) получено для вычисления момента сил трения АФМ, возникающего в результате действия распорной силы F_p на пары трения ОФГ.

График функции $T_{\Pi}(R_{\text{ср}1})$, построенный по выражению (23) при тех же исходных данных, что и прямая 1 (рис. 6), приведен на рис. 6 (кривая 2).

Графики, изображенные на рис. 6, показывают следующее:

— функции (21) и (23) — возрастающие по аргументу $R_{\text{ср}1}$;

— функция (21) возрастает быстрее, чем функция (23), о чем свидетельствует кривая 3, изображенная на рис. 6 и построенная по формуле

$$\Delta T = T_{\Pi} - T'_{\Pi}, \quad (24)$$

где T_{Π} и T'_{Π} — вращающие моменты, вычисляемые по выражениям (21) и (23) соответственно.

Формула (24) получена и кривая 3 (см. рис. 6) построена на основании того, что вращающий момент T'_{Π} является условно "отрицательным" по отношению к моменту T_{Π} , поскольку распорная сила F_p по знаку противоположна (имеет отрицательный знак) силе F_{Π} (см. выражения (3) и (4)).

Кривая 3 подтверждает увеличение разности ΔT вращающих моментов.

Заключение

Исследование показало, что положительная разность между средними радиусами поверхностей трения ведомых и ведущих пар ОФГ способствует повышению точности срабатывания АФМ. Увеличение положительной разности между средними радиусами поверхностей трения ведущих пар ОФГ и пар ДФГ также приводит к повышению точности срабатывания муфты.

Результаты исследования могут быть использованы при расчетах и конструировании модифицированного варианта АФМ второго поколения с измененной величиной среднего радиуса поверхностей трения ведомых пар ОФГ по сравнению с аналогичным параметром ведущих пар для повышения точности срабатывания и нагрузочной способности муфты.

Выводы

Основной недостаток базового варианта АФМ второго поколения — ограниченная нагрузочная способность и относительно невысокая точность срабатывания, обусловленные соответственно повышенной распорной силой УУ обратной связи и ограниченным значением КУ.

Если ведомые пары трения ОФГ АФМ с дифференцированными парами трения имеют средний радиус поверхностей трения, меньший, чем у ведущей пары трения, точность срабатывания



муфты повышается при увеличении среднего радиуса поверхностей трения ведомых пар.

Точность срабатывания модернизированной АФМ слабо зависит от числа ведомых пар трения ОФГ.

Идея повышения точности срабатывания модернизированной АФМ на основе увеличения отношения между средними радиусами поверхностей трения ведомых и ведущей пар трения ОФГ основана на увеличении вращающего момента, передаваемого ведомыми парами, при постоянной нагрузочной способности АФМ.

При фиксированном отношении значений средних радиусов поверхностей трения ведомых и ведущей пар трения ОФГ увеличение среднего радиуса поверхностей трения ДФГ приводит к уменьшению точности срабатывания АФМ.

Точность срабатывания модернизированной АФМ ограничена ростом отношения значений средних радиусов поверхностей трения ДФГ и ведущей пары трения ОФГ свыше единицы.

С ростом отношения значений средних радиусов поверхностей трения ведомых и ведущей пар трения ОФГ повышается нагрузочная способность АФМ.

Нагрузочная способность модернизированной АФМ снижается по мере уменьшения отношения средних радиусов поверхностей трения ДФГ и ведущей пары трения ОФГ.

Библиографический список

1. **Шишкарёв М.П.** Компоновка базового варианта адаптивной фрикционной муфты второго поколения

// Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 7. С. 16—20.

2. **Шишкарёв М.П.** Повышение нагрузочной способности и точности срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2010. № 5. С. 18—24.

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

4. **Шишкарёв М.П.** Особенности процесса срабатывания адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2004. № 4. С. 3—7.

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

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

7. **Шишкарёв М.П.** Оптимизация коэффициента усиления адаптивных фрикционных муфт первого поколения с дифференцированными парами трения // Тракторы и сельхозмашины. 2010. № 4. С. 36—39.

8. **Шишкарёв М.П.** Анализ переходного периода адаптивных фрикционных контактов в условиях положительного прироста коэффициента трения // Изв. вузов. Машиностроение. 2000. № 3. С. 14—17.

9. **Шишкарёв М.П.** Уровень перегрузки при срабатывании адаптивных фрикционных муфт // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 13—15.

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



В.В. Киселев, В.Е. Иванов, канд-ты техн. наук
(Ивановская пожарно-спасательная академия ГПС МЧС России, г. Иваново)
E-mail: vitaliyivanov@yandex.ru

Повышение надежности и долговечности зубчатых колес главной передачи пожарных автомобилей за счет улучшения триботехнических характеристик трансмиссионных масел

Рассмотрены вопросы повышения надежности и долговечности пожарных автомобилей за счет применения высокоэффективных смазочных материалов в узлах трения машин, улучшения противоизносных свойств гипоидных масел, применяемых для смазки зубчатых колес главной передачи в трансмиссиях пожарных автомобилей. Предложена противоизносная присадка на основе стеаратов мягких металлов. Приведены результаты триботехнических испытаний разработанной противоизносной присадки, которые указывают на эффективность ее применения.

The issues of increasing the reliability and durability for fire trucks the use of highly coefficient lubricants in friction units of machines, improving the antiwear properties of hypoid oils used to lubricate the gear wheels of the main drive in transmissions of the trucks are considered. An antiwear additive based on soft metal stearates is proposed. The results tribotechnical tests of the developed antiwear additive, which indicate the effectiveness of its application, are presented.

Ключевые слова: смазка, пожарная техника, интенсивность изнашивания, коэффициент трения, присадка, наполнитель.

Keywords: lubricant, fire fighting equipment, wear rate, coefficient of friction, additive, filler.

Повышение надежности и долговечности узлов трения машин и механизмов актуально для различных отраслей деятельности человека, особенно для транспортных машин. Особое внимание в этом вопросе стоит уделить пожарным автомобилям, так как от их боевой готовности к применению по назначению могут зависеть жизни и здоровье людей, сохранность государственного имущества, безопасность общества и государства. Основная особенность работы узлов и механизмов пожарной техники — повторно-непериодический режим, являющийся наиболее неблагоприятным с точки зрения безотказного функционирования. Данный режим предполагает, что взаимодействующие между собой детали будут подвергаться значительному износу за счет возрастающих фрикционных нагрузок. Это можно объяснить недостаточной смазкой трущихся поверхностей как в момент начала работы, так и при знакопеременных нагрузках в установившемся режиме работы. В результате негативному воздействию подвергаются многие узлы автомобиля, осо-

бенно детали трансмиссии, одним из основных элементов которой является главная передача.

Назначение главной передачи в трансмиссии пожарного автомобиля заключается в увеличении передаваемого крутящего момента к ведущим колесам автомобиля и изменении его направления под углом 90° . Основные механические элементы главной передачи — конические зубчатые колеса, помещенные в корпус. В некоторых видах исполнения главной передачи вместе с коническими зубчатыми колесами устанавливают цилиндрические шестерни (рис. 1).

Главные передачи конического типа (рис. 1, б) применяют на пожарных автомобилях малой или средней грузоподъемности. Конические шестерни чаще всего выполняют гипоидными, что дает возможность устанавливать ось ведущего колеса ниже оси ведомого колеса. Это в свою очередь позволяет устанавливать карданный вал ниже, что положительно сказывается на компоновке кузова автомобиля и снижает его центр тяжести, а следовательно

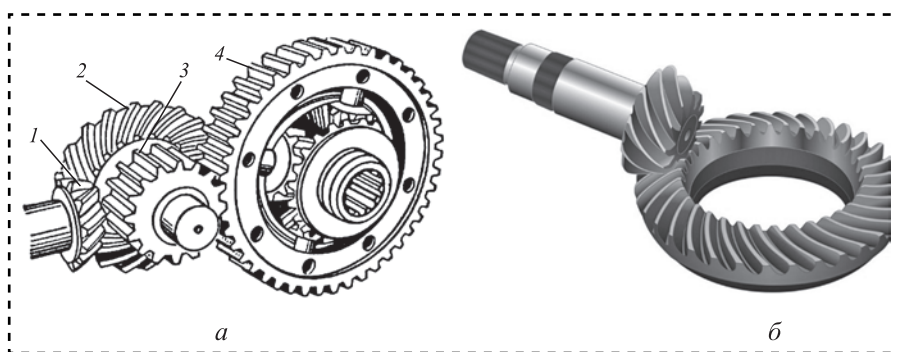


Рис. 1. Механизмы главной передачи:

а — коническо-цилиндрическая главная передача; *б* — коническая гипоидная главная передача; 1 — ведущая коническая шестерня; 2 — ведомая коническая шестерня; 3 — ведущая зубчатая прямозубая шестерня; 4 — ведомая зубчатая прямозубая шестерня

но, повышает динамические характеристики автомобиля. Кроме этого, зубчатые гипоидные шестерни имеют большую толщину зубьев. Это дает возможность работы с большими нагрузками и увеличивает их долговечность. В конической главной передаче ведущая шестерня соединяется с карданным валом автомобиля, а ведомая коническая шестерня с дифференциалом.

На пожарных автомобилях большой грузоподъемности, как правило, устанавливаются главные передачи двойного типа (рис. 1, *а*). Основное назначение дополнительной прямозубой зубчатой пары состоит в увеличении передаваемого крутящего момента.

Рассмотрим устройство главной передачи на примере пожарной автоцистерны АЦ-40(131), построенной на шасси автомобиля ЗИЛ-131. В трансмиссии данного пожарного автомобиля установлена коническо-цилиндрическая главная передача. В данном случае главная передача является составным элементом заднего моста, размещенная в его балке. Ведущий вал главной передачи установлен в стакане на подшипниковых опорах. Стакан крепится на картере главной передачи. Также в картере располагается промежуточный вал, на котором установлена ведущая цилиндрическая шестерня. На фланце этого вала крепится ведомая коническая шестерня, получающая момент от ведущей конической шестерни. Ведомая цилиндрическая шестерня соединяется с обеими чашками дифференциала и образует коробку, в которой устанавливают другие детали дифференциала — крестовину с сателлитами и полуосевыми шестернями.

Техническое обслуживание главной передачи сводится к регламентной замене смазоч-

ного материала. Для данного механизма необходимо применение специального масла — гипоидного. Отличительная особенность такого масла — возможность работы при больших нагрузках, которые создаются в местах контакта зубьев конической гипоидной передачи. От противоизносных свойств смазочного материала во многом зависит долговечность зубчатых колес главной передачи. Поэтому улучшение триботехнических показателей гипоид-

ного масла является задачей актуальной [1].

Для улучшения противоизносных свойств гипоидного трансмиссионного масла для главной передачи пожарных автомобилей средней и большой грузоподъемности предложено применить разработанную противоизносную присадку, представляющую собой стеараты мягких металлов (меди и олова) насыщенных жирных кислот. Действие присадки основано на образовании металлической пленки на трущихся поверхностях. Образующаяся пленка мягкого металла на поверхности трения заполняет микронеровности и резко увеличивает фактическую площадь контакта трущихся деталей, что снижает давление в зоне контакта деталей. Снижение давления естественно приводит к снижению температур в зоне трения, что безусловно является положительным эффектом, способствующим повышению эффективности смазывающего действия трансмиссионных масел.

Металлические компоненты в присадке находятся в виде комплексонов. Присадка растворима в маслах, а металлические компоненты в ней находятся в ионном виде [4]. Массовая доля присадки в трансмиссионном масле должна составлять 2 % [5]. Указанная концентрация является достаточной для реализации запланированного эффекта и не приводит к существенному удорожанию базового трансмиссионного масла. Испытания смазочного материала осуществляли по стандартным методикам [2, 3].

На рис. 2 представлены результаты проведенных испытаний модифицированного трансмиссионного масла 80W-90 GL-4. Именно такое масло отвечает требованиям условий эксплуатации деталей главной передачи пожарных

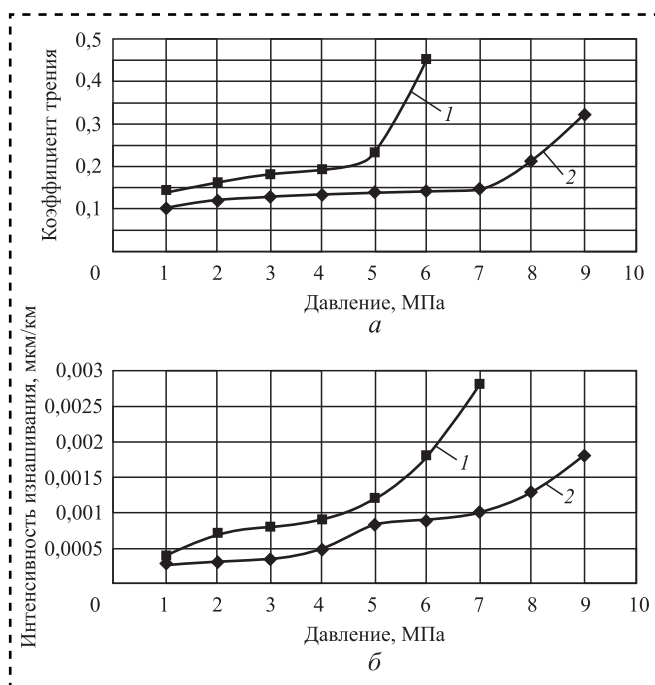


Рис. 2. Зависимость коэффициента трения от давления (а) и интенсивности изнашивания от давления за 20 км пути трения (б):

1 — для базового трансмиссионного масла 80W-90 GL-4; 2 — для масла 80W-90 GL-4 с 2 % разработанной присадки

автомобилей и может быть рекомендовано к применению в данном узле трения. В качестве оценочных характеристик разработанной противоизносной присадки выбраны зависимости коэффициента трения от давления на контактирующих поверхностях и интенсивности изнашивания трущейся поверхности от давления при фиксированном пути трения, который составлял 20 км. Указанные зависимости в полной мере определяют границы работоспособности трущихся поверхностей в смазочном материале, а также сопротивляемость изнашиванию.

Анализ полученных триботехнических зависимостей, показанных на рис. 2, позволяет сделать следующие выводы:

1) модифицирование разработанной присадкой трансмиссионного масла повышает нагрузочную способность. Для трансмиссионного масла 80W-90 GL-4 увеличение составило 50 %;

2) коэффициент трения снизился у испытуемого трансмиссионного масла с разработанной противоизносной добавкой. При рабочем давлении на поверхностях трения 5 МПа снижение коэффициента трения составило около 60 %;

3) интенсивность изнашивания испытуемого образца при трении в трансмиссионном масле 80W-90 GL-4 с разработанной присадкой при давлении 5 МПа снизилась на 23 %.

Таким образом, разработанный триботехнический состав для применения в узлах трения трансмиссий пожарных автомобилей, в частности в качестве добавки к гипоидным трансмиссионным маслам главной передачи автомобиля, позволит в значительной степени снизить износ зубчатых колес, а значит увеличить их надежность и долговечность.

Библиографический список

1. Гаркунов Д.Н. Триботехника (износ и безызносность): учебник. М.: Издательство МСХА, 2001. 616 с.
2. Киселев В.В., Жуков Ю.А. Повышение износостойкости деталей трансмиссий пожарных автомобилей за счет применения высокоэффективных смазочных материалов // Пожарная и аварийная безопасность: сб. материалов XIV Международной научно-практической конференции, посвященной 370-й годовщине образования пожарной охраны России. 2019. С. 147—149.
3. Киселев В.В. К проблеме улучшения триботехнических свойств смазочных материалов // Известия высших учебных заведений. Химия и химическая технология, 2006. Т. 49. № 12. С. 113—114.
4. Смазочная композиция: патент на изобретение RU 2233866 C1 / Мельников В.Г., Замятина Н.И., Киселев В.В., Бельцова Е.А. Заявка № 2002135854/04 от 31.12.2002; опубл. 10.08.2004.
5. Киселев В.В. Исследования по выявлению оптимальной концентрации разработанного медно-оловянного комплекса в масле // Депонированная рукопись № 836-B2003. 2003.

Ю.З. Житников, д-р техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия им. В.А. Дегтярева),

Б.Ю. Житников, д-р техн. наук (Российская академия народного хозяйства и государственной службы при Президенте РФ (РАНХиГС) Владимирский филиал),

О.В. Золотарева, М.И. Максимова, канд-ты техн. наук

(Ковровская государственная технологическая академия имени В.А. Дегтярева)

E-mail: str28@bk.ru

Упрочнение поверхностного слоя при дробеструйном наклепе

Обоснована математическая зависимость скорости взаимодействия дроби с поверхностью детали от ее массы и физико-механических свойств материалов детали и дроби, глубины упрочняющего слоя при дробеструйном упрочнении.

Mathematical dependence of the speed of interaction of the shot with the surface of the part on its mass and physical and mechanical properties of the materials of the part and the shot, depth of the strengthening layer during shot-blasting exercise is justified.

Ключевые слова: дробеструйное упрочнение, скорость удара, глубина упрочняющего слоя, физико-механические свойства детали, дробь.

Keywords: shot blasting, impact rate, depth of the strengthening layer, physical and mechanical properties of the part, shot.

Для упрочнения поверхностного слоя деталей применяют ряд способов. Один из них — дробеструйная обработка.

В настоящее время отсутствует математическая зависимость скорости ударного взаимодействия дроби с поверхностью детали, массы дроби, ее параметров и физико-механических свойств соударяемых тел и глубины упрочняющего слоя.

В работе [1] выполнен обширный эксперимент ударного взаимодействия тел, в котором оценивали влияние следующих параметров: материалов и формы соударяемых тел и их физико-механических свойств, скорости удара, предельной силы удара, предельной упругой деформации поверхности ударяемого тела, предельной остаточной пластической деформации, полуоси пятна контакта взаимодействующих тел. Но эксперимент проведен для ограниченного числа материалов.

Обоснуем математическую зависимость ударного взаимодействия дроби с поверхностью детали, в которую войдут все указанные выше параметры.

Для описания процесса ударного взаимодействия дроби с поверхностью воспользуемся теор-

емой о изменении вектора количества движения системы в интегральной форме [2]:

$$m\bar{v}_1 - m\bar{v}_0 = \sum \bar{F}_j^e \Delta t, \quad (1)$$

где m — масса дроби;

\bar{v}_1, \bar{v}_0 — векторы конечной и начальной скорости движения соответственно;

$\sum \bar{F}_j^e$ — геометрическая сумма внешних действующих сил;

Δt — время движения.

Рассмотрим случай удара дроби о плоскую поверхность детали. При воздействии учитываем влияние только силы удара, а остальными силами можно пренебречь из-за их малости. В проекции на ось движения выражение (1) с учетом, что скорость движения дроби после удара равна нулю, запишем:

$$mv_0 = F_{уд} \Delta t, \quad (2)$$

где $F_{уд}$ — сила удара.

Для решения уравнения (2) с тремя неизвестными $v_0, F_{уд}, \Delta t$ в конечном виде воспользуемся выражением равенства работ от силы удара и при



медленном вдавливании дроби в поверхность детали при условии равенства деформаций [3, 4]. Считаем, что при ударном взаимодействии дроби и поверхности детали и при медленном вдавливании дроби возникают деформации смятия. Выражение равенства работ:

$$A_{уд} = A_{см}^y + A_{см}^{пл}, \quad (3)$$

где $A_{уд}$ — работа при деформации смятия взаимодействующих поверхностей от силы удара;

$A_{см}^y$ — работа силы упругого смятия взаимодействующих поверхностей при медленном вдавливании дроби;

$A_{см}^{пл}$ — работа силы при пластической деформации взаимодействующих поверхностей при медленном вдавливании дроби.

Левая часть равенства — динамическая составляющая работы.

Работу от силы удара находим из выражения:

$$A_{уд} = F_{уд} h_{уд}, \quad (4)$$

где $h_{уд}$ — глубина смятия поверхности детали при ударе.

Считаем, что процесс смятия поверхности детали происходит равнозамедленно. Глубину смятия находим из выражения:

$$h_{уд} = v_{ср} \Delta t = \frac{v_1 + v_0}{2} \Delta t = \frac{v_0}{2} \Delta t. \quad (5)$$

С учетом выражения (5) работу при ударе запишем:

$$A_{уд} = F_{уд} \frac{v_0}{2} \Delta t. \quad (6)$$

Пластическая деформация поверхности детали при медленном вдавливании дроби в поверхность равна [1, 5]:

$$h^{пл} = \frac{P - P_0}{2\pi R_{пр} HD}, \quad (7)$$

где P — сила, вызывающая упругопластическую деформацию взаимодействующих поверхностей;

P_0 — сила, под действием которой возникает только упругая деформация взаимодействующих поверхностей;

$R_{пр}$ — приведенный радиус кривизны взаимодействующих поверхностей тел;

HD — пластическая твердость материалов тел.

Сила, под действием которой возникает упругая деформация, равна:

$$P_0 = F_{см}. \quad (8)$$

Силу упругого смятия находим из выражения [6]:

$$\sigma_{см} = \frac{F_{см}}{S_{см}} \Delta t \leq [\sigma_{см}]. \quad (9)$$

Приведенный радиус кривизны взаимодействующих тел равен радиусу дроби:

$$R_{пр} = r. \quad (10)$$

Пластическая твердость материала детали, МПа [1, 5]:

$$HD = \frac{88300}{(130 - HRC)}, \quad (11)$$

где HRC — твердость по Роквеллу.

Работа от силы упругого вдавливания равна:

$$A_{см}^y = F_{см}^y \alpha_y, \quad (12)$$

где α_y — глубина упругой деформации поверхности детали.

Площадь упругого смятия при малой глубине без учета кривизны поверхности находим из выражения:

$$S_{см} = \pi a^2, \quad (13)$$

где a — полуось пятна контакта поверхностей при упругой деформации при взаимодействии сферы с плоскостью [1, 5]:

$$a = 1,109 \sqrt{\frac{P_0 r}{E}}, \quad (14)$$

где $P_0 = F_{см}$.

Приведенный модуль упругости материалов детали и дроби:

$$E = \frac{2E_1 E_2}{E_1 + E_2}. \quad (15)$$

С учетом уравнений (9), (10), (13), (15) выражение (14) примет вид:

$$a = 1,109 \sqrt[3]{\frac{[\sigma_{см}] \pi a^2 r (E_1 + E_2)}{2E_1 E_2}}. \quad (16)$$

Для исключения параметра a^2 в правой части выражения (16) возведем его в третью степень и разделим на a^2 :

$$a = \frac{1,109^2 [\sigma_{см}] \pi r (E_1 + E_2)}{2E_1 E_2}. \quad (1)$$

Глубина упругого смятия [1, 5]:

$$h_{см} = \alpha_y = 1,231 \sqrt[3]{\frac{P_0^2}{E^2 + r}}. \quad (18)$$



С учетом уравнений (9), (13), (15), (17) выражение упругого смятия запишем:

$$h_{\text{см}} = \alpha_y = \frac{0,465[\sigma_{\text{см}}]^2 \pi^2 r (E_1 + E_2)^2}{E_1^2 E_2^2}. \quad (19)$$

После преобразований уравнение работы от силы упругого вдавливания примет вид:

$$A_{\text{см}}^y = \frac{0,176[\sigma_{\text{см}}]^5 \pi^5 r^3 (E_1 + E_2)^4}{E_1^4 E_2^4}. \quad (20)$$

Работа от силы пластического вдавливания дробы в деталь:

$$A_{\text{см}}^{\text{пл}} = F_{\text{см}}^{\text{пл}} h^{\text{пл}}. \quad (21)$$

Силу пластического смятия находим из выражения (7):

$$F_{\text{см}}^{\text{пл}} = 2\pi R_{\text{пр}} \text{HD} h^{\text{пл}}. \quad (22)$$

При упругом упрочнении величина пластической деформации задана.

Работа от силы пластической деформации поверхности детали — выражение (21) с учетом формул (10), (11):

$$A_{\text{см}}^{\text{пл}} = 2\pi r \frac{88\,300}{(130 - \text{HRC})} h^{\text{пл}}. \quad (23)$$

Подставим формулы (6), (20), (23) в выражение (3):

$$F_{\text{уд}} \frac{v_0}{2} \Delta t = \frac{0,176[\sigma_{\text{см}}]^5 \pi^5 r^3 (E_1 + E_2)^4}{E_1^4 E_2^4} + 2\pi r \frac{88\,300}{(130 - \text{HRC})} h^{\text{пл}}. \quad (24)$$

Выделим из последнего выражения (24) правую часть уравнения (2) и подставим в него:

$$m_0 v_0 = \frac{2}{v_0} \left[\frac{0,176[\sigma_{\text{см}}]^5 \pi^5 r^3 (E_1 + E_2)^4}{E_1 E_2} + 2\pi r \frac{88\,300}{(130 - \text{HRC})} h^{\text{пл}} \right]. \quad (25)$$

Окончательно скорость удара дробы о поверхность детали, при которой будет обеспечена требуемая глубина упрочняемого слоя на поверхности детали, находим из выражения:

$$v_0 = \sqrt{\frac{2}{m} \left[\frac{0,176[\sigma_{\text{см}}]^5 \pi^5 r^3 (E_1 + E_2)^4}{E_1 \cdot E_2} + 2\pi r \frac{88\,300}{(130 - \text{HRC})} h^{\text{пл}} \right]}. \quad (26)$$

Заключение

Используя данные работы [1] проведены расчеты предельных скоростей соударения тел для материалов, используемых в эксперименте. Установлено, что погрешности расчетных и экспериментальных значений скоростей соударяемых тел составляют 14...19 %.

Экспериментальные исследования дробеструйного упрочнения поверхностей деталей показали, что при первом ударе происходит пластическая деформация до 90 % от заданного значения, а при остальных ударах деформация достигает 100 %. Следовательно, получена математическая зависимость скорости удара дробы о поверхность детали от радиуса и массы дробы, глубины упрочняющего слоя и физико-механических свойств материалов дробы и детали.

Библиографический список

1. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
2. Бутенин Н.В., Лунц Я.Л., Меркин Д.Р. Курс теоретической механики. В 2 т. М.: Наука, 1971. 464 с.
3. Автоматизация технологических и производственных процессов в машиностроении: учебник / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. проф. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 656 с.
4. Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Динамика движения элементов механизмов при упругом и упругопластическом ударах о неподвижные и подвижные тела. Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярева", 2014. 80 с.
5. Демидов С.Н. Теория упругости: учебник для вузов. М.: Высшая школа, 1979. 432 с.
6. Федосеев В.И. Сопrotивление материалов. М.: Наука, 1970. 544 с.

ООО "Издательство "Инновационное машиностроение", 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2

Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".

Адрес электронной почты издательства: mashpubl@mashin.ru;

редакции журнала: sborka@mashin.ru, <http://www.mashin.ru>

Телефон редакции журнала: 8 (499) 269-54-98, факс: 8 (499) 269-54-96.

Технический редактор *Патрушева Е.М.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 16.08.2021. Подписано в печать 05.10.2021. Формат 60 × 88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Авансед солюшнз". Сайт: www.aov.ru

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.