

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
4 (249)

СОДЕРЖАНИЕ

Современные технологии сборки

Иванов А.А., Кретьинин О.В. Сборка втулочно-роликовых цепей 147

Обеспечение качества. Испытания. Контроль

Головкин П.А., Милутинович М.М. Повышение качества прутков из немагнитного сплава типа монель вакуумной выплавки НММц 38-2В 151

Губарев П.В., Шапшал А.С., Шабаев В.В. Методы диагностирования электрических цепей локомотивов 155

Евгеньева Е.А., Дмитриев С.И., Самаркин А.И., Самаркина Е.И. Влияние технологических факторов на точность сборки на примере цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора 4МЦ2С-80 162

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Обоснование параметров пневмоцилиндра и пружины в устройстве запрессовки цилиндрических ступенчатых резиновых уплотнений в отверстия собираемых узлов 166

Трение и смазка в машинах и механизмах

Кулешова Е.М. Оценка влияния эволюции показателей динамичности червячного зацепления на параметры технического состояния в процессе эксплуатации 170

Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р. Диагностирование узлов трения по анализу состояния смазочных материалов 176

Чихачёва Н.Ю., Щедрин А.В., Бекаев А.А. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования методов комбинированного дорнования отверстий 181

Гайдар С.М., Карелина М.Ю., Колокатов А.М., Пыдрин А.В. Влияние СОЖ на стойкость и износ токарных резцов 189

Председатель редакционного совета
В.И. КОЛЕСНИКОВ, академик РАН

Редакционный совет

МОСКВА

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

Региональные редсоветы

ВЛАДИВОСТОК

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

ВОЛГОГРАД

В.И. ЛЫСАК, акад. 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, акад. РАН

ТУЛА

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

ХАБАРОВСК

В.И. ШПОРТ, д.т.н., проф.

Беларусь

МИНСК

В.Л. 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. ЛЕБОВСКИ, 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.

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

THE MONTHLY
JOURNAL
FOR SCIENTISTS
AND MANUFACTURERS

ASSEMBLING



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
4 (249)

CONTENTS

Modern technologies in assembly

Ivanov A.A., Kretinin O.V. Assembly of bushing-roller chains 147

Quality assurance. Testing. Monitoring

Golovkin P.A., Milutinovich M.M. Improvement in quality of bars made from vacuum melted nonmagnetic NMMts 38-2V alloy of monel type 151

Gubarev P.V., Shapshal A.S., Shabaev V.V. Methods for diagnosing electrical problems locomotive chains 155

Evgenyeva E.A., Dmitriyev S.I., Samarkin A.I., Samarkina E.I. Influence of technological factors on assembly accuracy on the example of a cylindrical two-stage coaxial gearbox 4MTs2S-80 162

Zhitnikov Yu.Z., Zhitnikov B.Yu. Justification of the parameters of the pneumatic cylinder and the spring in the device for pressing cylindrical stepped rubber seals into the holes of the assembled units 166

Friction & lubrication in machines and mechanisms

Kuleshova E.M. Evaluation of the influence of the evolution of the worm gear dynamics on the parameters of the technical condition during operation 170

Migranov A.M., Migranov M.Sh., Nigmatullin R.G., Nigmatullin V.R., Nigmatullin I.R. Diagnostics of friction in the analysis of the state of lubricants 176

Chikhacheva N. Yu., Shchedrin A.V., Bekaev A.A. Application of tribotechnologies based on self-organization by system improvement of combined hole methods 181

Gaidar S.M., Karelina M.Yu., Kolokatov A.M., Pydrin A.V. The effect of coolant on the durability and wear of turning tools 189

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

Editors

MOSCOW

A.S. VASIL'EV
(Chief editor)
V.V. BARDUSHKIN
I.A. BUYANOVSKY
M.V. VARTANOV
S.M. ZAKHAROV
I.N. ZININA

Yu.L. IVANOV
A.V. IGNATOV
A.I. KUMENKO
I.A. LUBININ
B.V. SHANDROV
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. MATVIENKO

DONETSK

A.N. MIKHAILOV

Poland

P. LEBKOVSKI
E. LUNARSKII

Executive editors of current issue:

E.M. NUZHINA, I.M. GLIKMAN

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

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.

А.А. Иванов, О.В. Кретинин, д-ра техн. наук
(Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева)
E-mail: kretinin@list.ru

Сборка втулочно-роликовых цепей

Рассмотрена организационная форма подвижной сборки втулочно-роликовых цепей на основе тактового конвейера с автоматизированными рабочими местами (АРМ) и автоматическими сборочными постами (АСП). Сборка проводится как на автоматических линиях модульного типа, так и на роторно-конвейерных линиях (РКЛ).

Organizational form of a movable assembly bushing-roller chains based on a stroke conveyor with automated workstations (AWP) and automatic assembly posts (ASP) is considered. The assembly is carried out both on automatic modular lines and on rotor-conveyor lines (RKL).

Ключевые слова: подвижная сборка, тактовый конвейер, автоматизированное рабочее место, автоматический сборочный пост, роторная линия.

Keywords: mobile assembly, stroke conveyor, automated workstation, automatic assembly post, rotary line.

Развитие производства выдвигает ряд научно-прикладных задач в области сборки обширной группы изделий машино- и приборостроения. Для решения этих задач необходимо разработать новые технологические приемы, позволяющие существенно упростить и улучшить конструкции систем манипулирования. Принцип построения сборочных систем во многом определяется соотношением трудоемкостей основных операций сборочного цикла, в котором 70...80 % приходится на операции подачи, ориентации и совмещения деталей и лишь около 20...30 % — на операции соединения узла.

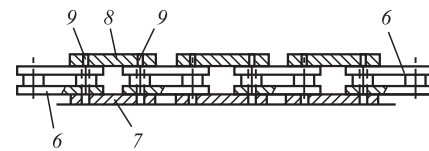
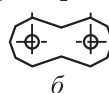
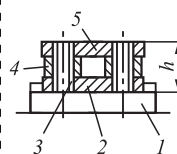
Обычно сборку втулочно-роликовых цепей для комбайнов, автомобильных двигателей, мотоциклов и велосипедов проводят на автоматических линиях модульного типа или на роторно-конвейерных линиях (РКЛ). Фрагмент втулочно-роликовой цепи (ВРЦ) и схемы внутренней катушки и отрезка ВРЦ представлены на рис. 1.

Процесс сборки внутренней катушки цепи состоит из шести операций (рис. 2, а):

- 1) установка нижней пластины на спутник;
- 2) установка на штырьки двух втулок;
- 3) установка на втулки двух роликов;



а



б

Рис. 1. Фрагмент втулочно-роликовой цепи (ВРЦ) (а) и конструктивные схемы внутренней катушки (б) и отрезка (в) втулочно-роликовой цепи:

1 — спутник; 2 — нижняя пластина; 3 — втулка; 4 — ролик; 5 — верхняя пластина; 6 — катушка ВРЦ; 7 — нижняя соединительная пластина; 8 — верхняя соединительная пластина; 9 — ось

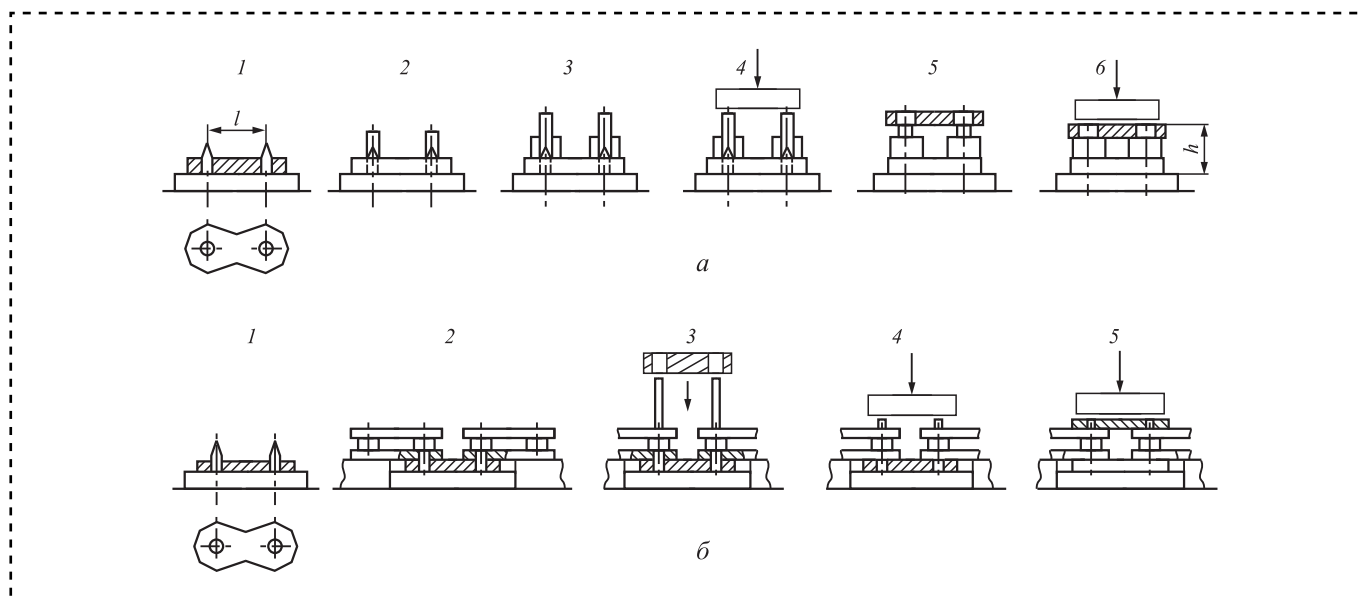


Рис. 2. Технологические схемы сборки внутренней катушки (а) и отрезков втулочно-роликовой цепи (б)

- 4) запрессовка втулок в пластину;
- 5) установка на две втулки верхней пластины;
- 6) напрессовка верхней пластины на втулки.

После сборки каждая катушка контролируется по высоте h .

Технологическая схема сборки отрезков втулочно-роликовой цепи включает пять операций (рис. 2, б):

- 1) установка на спутник нижней соединительной пластины;
- 2) установка на нижнюю пластину двух катушек;
- 3) установка во втулки катушек двух осей;
- 4) запрессовка осей в нижнюю соединительную пластину;
- 5) напрессовка на оси верхней соединительной пластины.

Эти операции выполняются как на автоматических линиях модульного типа, так и на роторно-конвейерных линиях (РКЛ).

Провели сборку ВРЦ на роторно-конвейерной линии отрезками цепи, состоящими из 306 катушек. Для цепи с шагом 15,875 мм длина отрезка равна 4896 мм, а для цепи с шагом 38 мм длина отрезка — 11 600 мм.

Характеристика специализированной РКЛ СбЦ-15 сборки катушек (рис. 3): длина цепного конвейера — $L = 3,7$ м; высота РКЛ — $H = 1,63$ м, ширина — $S = 0,6$ м; производительность $Q_{\phi} = 400$ катушек/мин (до 100 млн шт./г при двухсменной работе); потребляемая мощность $N = 4,8$ кВт; численность обслуживающего персонала — 3 чел.; состав линии — 2 ТР, 4 ЗР, 2 КР, 1 РР (с разбраковкой изделий на три группы). Функции роторов контроля: КР1 для контроля комплектности собираемой катушки, а КР2 — для контроля катушки по высоте.

Характеристика специализированной РКЛ сборки отрезков цепи: производительность $Q_{\phi} = 800$ шагов/мин; потребляемая мощность $N = 5,9$ кВт; численность персонала — 3 чел.

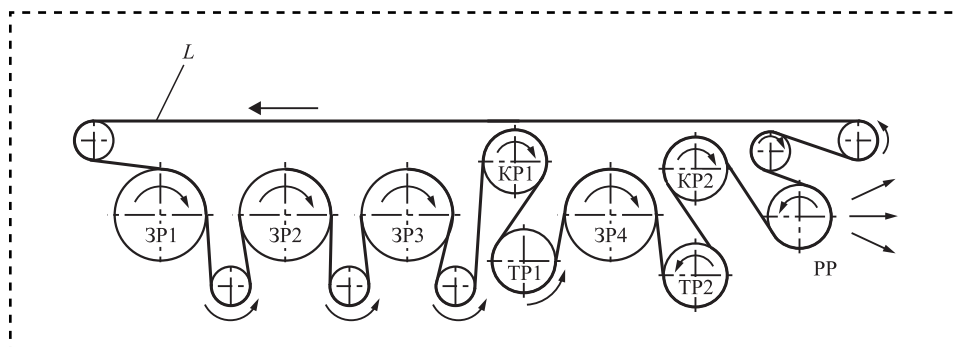


Рис. 3. Структура РКЛ СбЦ-15 сборки внутренних катушек втулочно-роликовой цепи: ТР — технологический ротор; ЗР — загрузочный ротор; КР — контрольный ротор; РР — ротор разбраковки

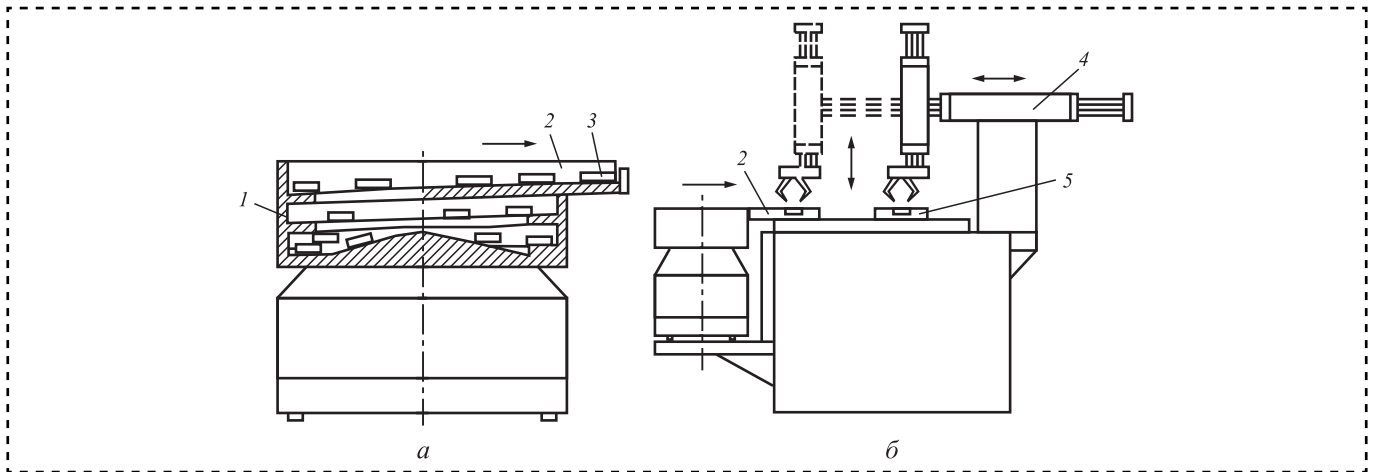


Рис. 4. Схемы ориентации пластин (а) и подачи их в спутник на трассе СЛ (б):

1 — чаша ВБ; 2 — съемный выходной лоток ВБ; 3 — пластина на упоре; 4 — загрузочный робот; 5 — спутник транспортной системы СЛ

Состав линии: 3 ТР, 4 ЗР, 2 КР, 1 РР и 4 транспортных конвейера. Для сравнения — производительность ручной сборки составляет 50 шагов/мин.

Схема подачи на сборку нижней и верхней пластины катушки для автоматизированной сборки ВРЦ представлена на рис. 4.

Ориентированные пластины накапливаются на выходном лотке (на упоре) вибробункера (ВБ), откуда они устанавливаются на спутник трассы сборочной линии (СЛ). Поскольку в ВРЦ используются пластины двух типов (с отверстиями большого и малого диаметра), то для каждого типа пластин применяется своя чаша ВБ.

Схема подачи на сборку втулок и роликов приведена на рис. 5.

Спутник на трассе в этой позиции имеет привод вертикального хода для запрессовки втулки в отверстие нижней пластины катушки. Трасса со спутниками расположена перпендикулярно к плоскости чертежа.

Аналогичную схему используют для подачи на сборку роликов.

Схема подачи катушки с выходного лотка ВБ в спутник на трассе линии сборки отрезков ВРЦ аналогична схеме, показанной на рис. 5, б (рис. 6).

Для стальных осей используется вертикальный магнитный накопитель (рис. 7).

Схемы запрессовки оси в отверстие нижней соединительной пластины и напрессовки верхней соединительной пластины на оси катушек отрезка ВРЦ даны на рис. 8.

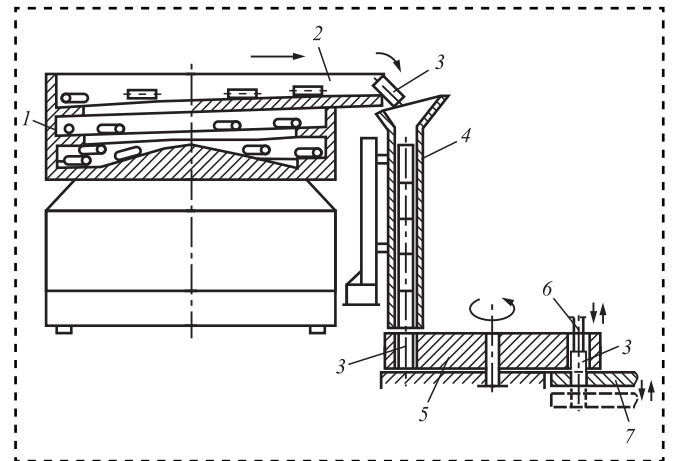


Рис. 5. Схема ориентации и подачи на сборку втулок:

1 — чаша ВБ; 2 — выходной лоток чаши ВБ; 3 — втулка; 4 — пенальный накопитель втулок; 5 — дисковый отсекатель; 6 — пуансон для запрессовки втулки в нижнюю пластину; 7 — пластина в подвижном спутнике

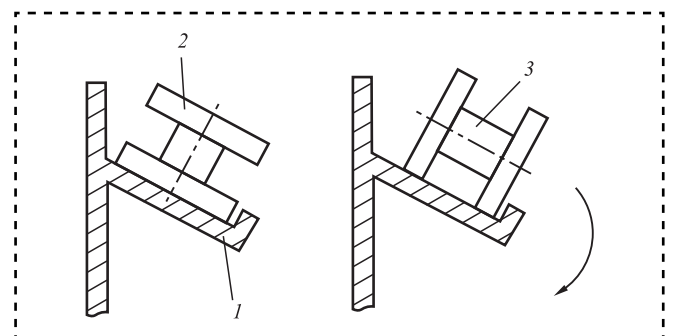


Рис. 6. Схема ориентации катушек в вибробункере:

1 — винтовой лоток чаши ВБ; 2 — устойчивое положение катушки на плоскости; 3 — неустойчивое положение катушки на ребрах

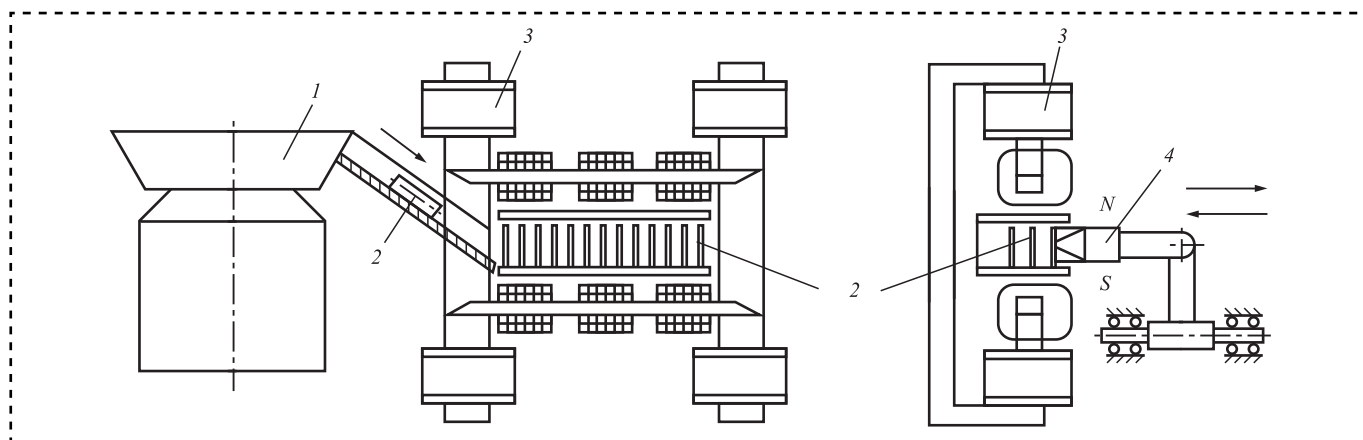


Рис. 7. Схема выдачи осей из вертикального магнитного накопителя с помощью магнитного шиберного захвата: 1 — ВБ; 2 — ось; 3 — магнитная система накопителя; 4 — шиберный захват

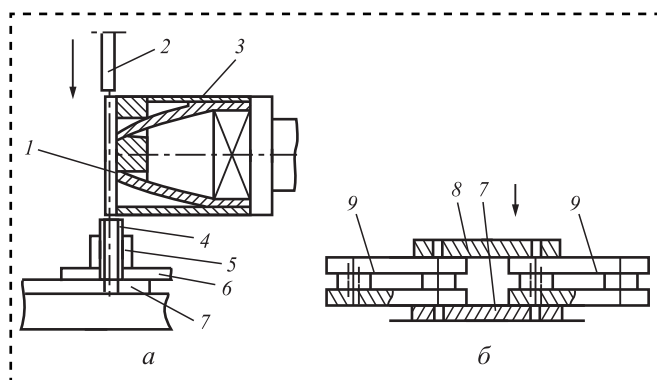


Рис. 8. Схемы запрессовки оси в отверстие нижней соединительной пластины отрезка ВРЦ (а) и напрессовки верхней соединительной пластины на оси катушек отрезка ВРЦ (б): 1 — ось на магнитном шиберном захвате 3; 2 — пуансон прессы; 4 — втулка, запрессованная в нижнюю пластину б катушки; 5 — ролик; 7 — нижняя соединительная пластина отрезка ВРЦ; 8 — верхняя соединительная пластина; 9 — катушка ВРЦ

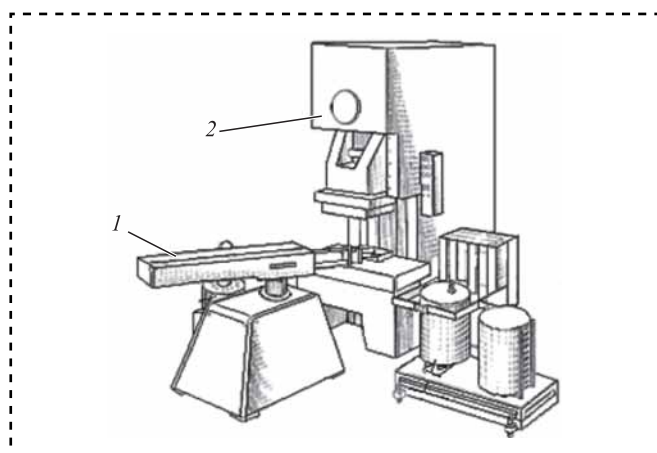


Рис. 9. Станок для запрессовки втулок и осей в отверстия пластин ВРЦ: 1 — загрузочный робот; 2 — прессовое оборудование

Для указанных операций запрессовки можно использовать стандартное оборудование (рис. 9) или настольную установку в модуле.

Вывод

В настоящее время в массовом производстве для сборки втулочно-роликовых цепей в основном преобладает организационная форма подвижной сборки на основе тактового конвейера с автоматизированными рабочими местами (АРМ) и автоматическими сборочными постами (АСП). Сборочные модульные линии оснащены полным набором мехатронных модулей ориентации, подачи, совмещения, сборки и контроля сборочной единицы.

Представлено оригинальное конструкторское решение вертикального магнитного накопителя осей и специального магнитного шиберного захвата для подачи осей на операции запрессовки.

Библиографический список

1. Иванов А.А. Проектирование автоматизированных систем манипулирования объектами обработки и сборки: учеб. пособие. М.: ФОРУМ, 2012. 352 с.
2. Иванов А.А. Автоматизированные сборочные системы: учебник. М.: ФОРУМ, 2018. 336 с.
3. Иванов А.А. Проектирование систем автоматизированного машиностроения: учебник. М.: ФОРУМ, 2013. 298 с.

П.А. Головкин, канд. техн. наук, **М.М. Милутинович**
(АО "Плутон", Москва)
E-mail: p.golovkin@pluton.msk.ru

Повышение качества прутков из немагнитного сплава типа монель вакуумной выплавки НММц 38-2В

Проанализированы возможности повышения качества прутков из немагнитного сплава типа монель, применяемого в производстве электровакуумных СВЧ-приборов.

The possibilities of improvement in quality of bars made from nonmagnetic alloy of monel type used in the production of electric vacuum microwave devices are analyzed.

Ключевые слова: электровакуумные СВЧ-приборы, сплав типа монель, вакуумная плавка, дегазация, раскисление, газовые поры, деформация слитка, кованный пруток, термическая обработка, дефекты, микроструктура, вакуумная плотность.

Keywords: electric vacuum microwave devices, alloy of monel type, vacuum melting, gas removal, deoxidation, pinholes, deformation of ingot, forged bar, heat treatment, defects, microstructure, vacuum tightness.

Производство сверхвысокочастотных электровакуумных приборов специального назначения, одним из лидеров которого в России является ведущее свою историю с 1929 г. АО "Плутон" [1], требует материалов, применение которых в других отраслях ограничено. Пример такого материала — немагнитный никелево-медный сплав вакуумной плавки НММц 38-2В [2].

Химический состав сплава НММц 38-2В, %, не более: никель — основа; медь 36...39; марганец 1,4...2,2; углерод 0,07...0,15; кремний 0,06; магний 0,03; цинк 0,002; висмут 0,002; фосфор 0,005; мышьяк 0,002; кислород 0,005; водород 0,002; азот 0,005; Σ примесей 0,17.

Сплав сочетает необходимую для работы СВЧ-излучателей жаропрочность с относительно малой газовой проницаемостью его материала и отрицательной температурой точки Кюри [3].

Обеспечение электронной гигиены рабочей зоны СВЧ-приборов является задачей, напрямую определяющей их работоспособность и ресурс [4]. Это накладывает высокие требования к химической чистоте и вакуумной

плотности применяемого материала. В частности, в процессе 10 000 ч ресурса приборов и на протяжении 15-летнего гарантийного срока эксплуатации в вакуумной полости приборов необходимо остаточное давление газов не более $6,5 \cdot 10^{-5}$ Па [4].

Для получения таких показателей сплава НММц 38-2В необходимо, с одной стороны, обеспечить химическую чистоту в части содержания вредных примесей, а с другой — плотную структуру получаемого материала в части отсутствия газовых пор, трещин и других дефектов [2, 4].

Это важно, так как газовыделение в вакуумной зоне приборов определяется в том числе интенсивностью диффузии в материале, удваивающейся с увеличением температуры, начиная с комнатной, на каждые 10...15 °С [5]. Поэтому для получения материала, пригодного для изготовления деталей рабочей зоны специальных электровакуумных СВЧ-устройств, необходимо решить комплексную задачу, в которой на основе требований к деталям и приборам будут определены решения на каждом технологическом переходе изготовления прутка.

Вредные примеси и дефекты в материале сплава НММц 38-2В

Содержащиеся в никелемедной основе примеси и их эвтектики могут отличаться крайне малой растворимостью, образуя локальные скопления в зоне пор и границ зерен. Локальная концентрация висмута может достигать 20 % (при содержании в общем объеме менее $3 \cdot 10^{-4}$ % [6]) и резко снижает прочность сцепления зерен. Негативную роль играют и примеси свинца, обособляющиеся по границам зерен в виде цепочек изолированных включений. Газовая пористость также становится очагом скопления самых разнообразных газов и твердых примесей (рис. 1). Важно, что температуры плавления эвтектик BiPb и CuBi , составляющие 124 и 271,44 °С, входят в рамки рабочих температур деталей электровакуумных приборов [6, 7]. То же относится и к расположенным по границам зерен низкоплавким примесям Se и Te , образующим селенид и теллурид меди, с температурой конгруэнтного плавления теллурида меди CuTe 367 °С, и эвтектики SeTe от 220 до 453 °С [8, 9]. Это значит, что селен и теллур в рабочем диапазоне температур СВЧ-приборов могут существенно повлиять на стабильность их работы.

Малая концентрация и хорошая растворимость цинка в никеле и меди делает его содержание в сплаве не столь критичным. Количество кислорода, водорода и азота определяется содержанием этих примесей в исходных материалах, а также качеством вакуумирования и дегазации расплава. Негативное воздействие примесей тем больше, чем крупнее зерно от слитка до готового прутка. Так, если средние значения самодиффузии в зернах металлов по принципу замещения составляют $1 \cdot 10^{-17}$ м²/с при температуре на 200...500 °С ниже точки плавления, то для атомов внедрения эти показатели выше в $10^3 \dots 10^4$ раз, а диффузионное перемещение атомов по границам зерен происходит в 100...1000 раз активнее [5, 10]. Поэтому измельчение зерен способствует замедлению диффузионных процессов и связанному с ними газо-выделению, а термическая стабилизация уменьшает удельную энергию межмолекулярных сил на межфазных поверхностях материала деталей [7].

Простой и эффективный способ повышения качества металлических материалов — переработка их структуры различными приемами свободнойковки [11, 12]. Необходимо уменьшать содержание растворенных газов и не допускать образования газовых пор в процессе падения растворимости при кристаллизации расплава [6, 13].

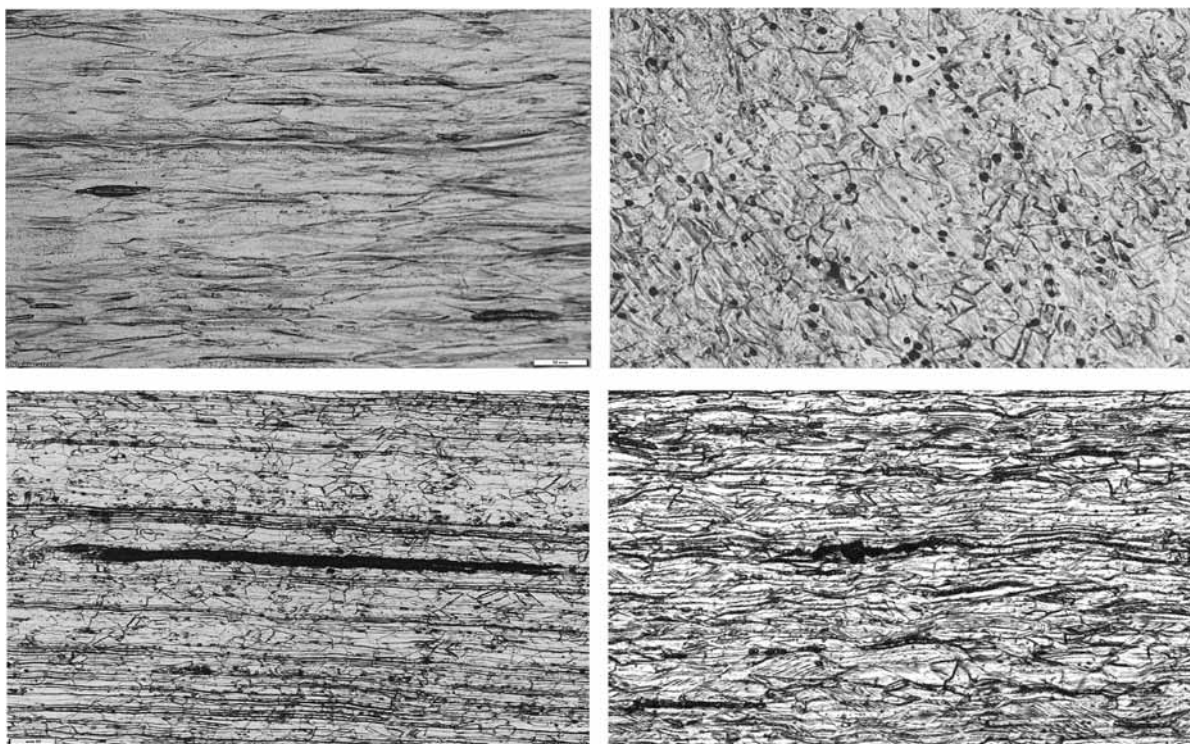


Рис. 1. Вызванные неправильной дегазацией поры и расслоения в прутке, $\times 50$



Ограничение порообразования в слитке и выбор режимов его деформации

Даже при использовании закрытой плавки с глубиной вакуума не менее 10^{-4} Па для недопущения образования газовых пор в процессе падения растворимости при кристаллизации расплав подвергают дегазации и раскислению. При этом для сокращения испарения легирующих компонентов и формирования нежелательных примесных фаз перегрев расплава должна быть минимальным. В противном случае развитая газовая пористость не сможет быть залечена в процессе последующих технологических переделов материала слитка [13–15].

В зависимости от типа пористости, числа и размера исходных пор по мере деформации они могут перейти в состояние как разрозненных окисленных включений и их цепочек, так и протяженных межзеренных расслоений (рис. 2) [5].

Для уменьшения перепада предельной растворимости в расплаве газов перед разливкой следует проводить его предварительное подстуживание, визуальное контролируемое через смотровое окно вакуумной печи и считающееся достаточным, когда от трети до половины диаметра тигля покрывается застывшей корочкой [14]. Перед подстуживанием расплав раскисляют и модифицируют мишметаллом на основе лантана и церия, как модификаторами первого рода, в количестве 0,25...0,3 % от массы расплава [3, 15, 16].

Даже при массовой доле 0,1 % добавка церия эффективно связывает легкоплавкие примеси висмута, свинца, сурьмы и т.д., в виде тугоплавких соединений CePb , Ce_2Pb , BiCe_3 , BiCe и других, имеющих температуру плавления, с запасом превышающую рабочие температуры деталей электровакуумных приборов [22]. Мишметалл на основе церия и лантана качественно очищает границы зерен от хрупких и легкоплавких примесей, улучшая пластич-

ность, электро- и температуропроводность материала [22]. Время нахождения раскислителя в расплаве подбирают так, чтобы он успел в нужной мере раствориться, но не выпарился, для чего расплав перемешивают [14, 15]. При этом кислород будет частично связан раскислителем и выведен из расплава в виде всплывающего шлака [13, 14].

В качестве дополнительного раскислителя и эффективного модификатора второго рода применяют цирконий в количестве 0,15...0,2 % от массы расплава. Помимо измельчения зерна он положительно влияет на прочность и обрабатываемость резанием получаемого материала [5]. Таким образом, применение циркония помимо лантана и церия задействует одновременно два механизма модифицирования расплава, при прочих равных условиях ускоряя и делая процесс более равномерным.

Малое остаточное содержание в растворе модификаторов и раскислителей ввиду их частичного перехода в шлак при реакции с кислородом не выводит химический состав сплава за установленные рамки.

Для снижения ликвационной и структурной неравномерности и уменьшения концентрации пор в центре слитка следует обеспечить широкий фронт кристаллизации расплава путем использования изложницы плоского прямоугольного профиля [5].

Очищенный от поверхностных загрязнений и хрупкой окисленной корочки слиток гомогенизируют при температуре 870 °С в течение 12 ч. Всесторонняя ковка слитка после гомогенизации позволяет в нужной мере уравновесить его химический состав и получить равномерную мелкозернистую структуру. Заготовки целесообразно ковать с нагрева до 930 °С с подогревами в черновые прутки под дальнейшую проточку перед холодной протяжкой через фильеры либо перед шлифовкой в конечный раз-

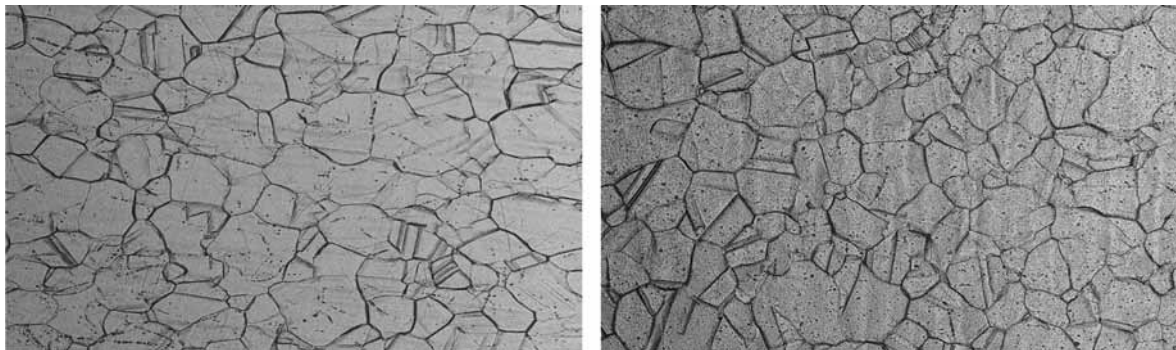


Рис. 2. Плотная ненаправленная структура прутка с двойниками самоотпуска, $\times 50$

мер [12]. По мере проковки нагрев заготовок понижают на 30...40 °С за переход, ограничив температуру конца ковки 820...830 °С, что способствует получению ненаправленной равномерной структуры. Охлаждать прутки следует на шамотном полу. Типичная микроструктура кованых прутков с размером зерна 100...120 мкм и двойниками самоотпуска показана на рис. 2.

Холодная протяжка проточенных черновых прутков является предпочтительной, поскольку эффективно упрочняет металлический материал, обеспечивая его твердость 180 НВ и выше, что положительно сказывается на его обрабатываемости. В то же время рекристаллизованный в процессе самоотпуска после прокатки или ковки материал прутка отличается низкой твердостью 85...95 НВ, что негативно отражается на его технологичности при обработке резанием и прочностью.

Таким образом, отработанный процесс получения ненаправленной вакуумноплотной мелкозернистой структуры сплава НММЦ 38-2В с малым содержанием примесей. Путем последовательной корректировки химического состава в части раскислителей и модификаторов, режима дегазации, формы изложницы и заготовок под деформацию, гомогенизации и ковки, обеспечивается требуемый результат.

Выводы

1. В процессе отбора материала и выбора оборудования для приготовления расплава необходимо сократить содержание примесей (висмута, селена и теллура, летучих соединений), которые могут вывести СВЧ-прибор из строя при его рабочих температурах. Необходимо уделить особое внимание процессу дегазации расплава, в частности, связывания и выведения из него кислорода и других газов.

2. Плавка с минимальным перегревом и введение перед подстуживанием расплава модификаторов первого и второго рода обеспечивают формирование его равномерной структуры. Широкий фронт кристаллизации расплава путем его заливки в плоскую прямоугольную изложницу позволяет получить равномерную структуру слитка с минимальным числом и размером газовых пор. Использование в качестве раскислителя и модификатора циркония дополнительно улучшит обрабатываемость и прочностные свойства металлического материала.

3. Гомогенизация предварительно зачищенного и разрезанного на четыре равные по массе части слитка при температуре 870 °С в течение 12 ч подготавливает его к дальнейшей ковке, снижая ликвационные явления и выравнивая химический состав.

4. Всестороннюю ковку отожженных заготовок с первоначального нагрева до 930 °С целесообразно проводить, понижая температуру деформации на 30...40 °С с каждым новым подогревом, и завершая процесс протяжки в черновой прутки при 820...830 °С. При охлаждении полученных прутков на шамотном полу такая деформация обеспечит получение равномерной ненаправленной структуры с размером зерна 100...120 мкм и менее, с характерными двойниками самоотпуска.

5. Материал полученных путем горячей деформации прутков обладает низкой прочностью и твердостью 85...95 НВ, что ограничивает его применение и затрудняет механическую обработку. Нагартовка при холодной протяжке прутков на заданный размер упрочняет их материал примерно вдвое, обеспечивая твердость выше 180 НВ и хорошую обрабатываемость резанием.

6. Комплексный подход к разработке технологического процесса обеспечивает получение качественного вакуумноплотного материала с минимальным количеством примесей и стабилизированной ненаправленной структурой, пригодного для изготовления деталей рабочей зоны специальных электровакуумных СВЧ-устройств.

Библиографический список

1. **Плутон.** 90 лет. Гордимся прошлым, смотрим в будущее. М.: ООО "Пилотаж", 2019. 232 с.
2. **Яе0.021.076 ТУ.** Прутки из немагнитного сплава марки НММц 38-2В вакуумной плавки. Технические условия. М.: ОЗТМиТС, 1983. 12 с.
3. **Металлы** и сплавы для электровакуумных приборов / А.С. Гладков и др.; под общей ред. А.И. Шокина. М.: Энергия, 1969. 600 с.
4. **Черепнин Н.В.** Вакуумные свойства материалов для электронных приборов. М.: Советское радио, 1966. 352 с.
5. **Пикунов М.В., Десипри А.И.** Металловедение: учеб. пособие. М.: Металлургия, 1980. 256 с.
6. **Ватрушкин Л.С., Осинцев В.Г., Козырев А.С.** Бескислородная медь. М.: Металлургия, 1982. 192 с.
7. **Коваленко В.Ф.** Теплофизические процессы и электровакуумные приборы. М.: Советское радио, 1975. 216 с.
8. **Сучков Д.И.** Медь и ее сплавы. М.: Металлургия, 1966. 248 с.
9. **Чижиков Д.М., Счастливый В.П.** Селен и селениды. М.: Наука, 1964. 320 с.
10. **Бокштейн Б.С., Капечкий Ч.В., Швиндлерман Л.С.** Термодинамика и кинетика границ зерен в металлах. М.: Металлургия, 1986. 224 с.
11. **ПИ 1.2.085-78.** Ковка и штамповка деформируемых алюминиевых сплавов. М.: ВИАМ, 1978. 17 с.
12. **Газы** в цветных металлах и сплавах / Д.Ф. Чернега и др. М.: Металлургия, 1982. 176 с.
13. **Линчевский Б.В.** Вакуумная индукционная плавка. М.: Металлургия, 1975. 240 с.
14. **Мальцев М.В.** Модифицирование структуры металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1964. 214 с.
15. **Литейное** производство / А.М. Михайлов и др. М.: Машиностроение, 1987. 256 с.
16. **Мальцев М.В.** Металлография тугоплавких, редких и радиоактивных металлов и сплавов. М.: Металлургия, 1971. 488 с.



П.В. Губарев, А.С. Шапшал, канд-ты техн. наук
(Ростовский государственный университет путей сообщения),
В.В. Шабаев (Ростовский юридический институт
Министерства внутренних дел Российской Федерации)
E-mail: pavel.gybarev@yandex.ru

Методы диагностирования электрических цепей локомотивов

Рассмотрены основные методы поиска неисправностей электрооборудования подвижного состава: органолептический, параметрического анализа, вероятностно-временной, половинного разбиения (метод дихотомии), логический метод диагностирования, метод применения теории графов. Определено, что наибольший эффект можно получить за счет создания и внедрения в каждом локомотивном депо средств диагностики на базе вычислительной техники и совершенствования системы планово-предупредительных ремонтов, а также перехода на ремонт локомотивов по фактическому техническому состоянию.

The main methods of search of malfunctions of electric equipment of rolling stock are considered: organoleptic method, parametric analysis, probability-time method, split half method (chord method), the logical method of diagnosis, method of applying graph theory. It has been determined that the greatest effect can be obtained through the creation and implementation in each locomotive depot of diagnostic tools based on computer technology and improvement of the system of scheduled preventive repairs, as well as the transition to the repair of locomotives according to the actual technical condition.

Ключевые слова: подвижной состав, методы диагностирования, электрооборудование, надежность, ремонт, техническая диагностика.

Keywords: rolling stock, diagnostic methods, electrical equipment, reliability, repair, technical diagnostics.

В последние годы особое внимание уделяется надежности локомотивов и совершенствованию их обслуживания и ремонта. Однако обеспечение требуемого уровня надежности для сложного оборудования и аппаратуры при существующих средствах контроля — весьма трудная задача. Большинство неисправностей оборудования в настоящее время обнаруживается визуально, во время непосредственного внешнего осмотра. В связи с этим возникла необходимость разработки методов и устройств, позволяющих обнаружить и устранить дефекты до выхода из строя отдельного агрегата или всего локомотива. В технической диагностике известны несколько методов поиска неисправностей электрооборудования [1—11].

1. **Органолептический метод** предусматривает использование органов чувств испытателя — зрения, слуха, осязания, обоняния. Метод практически всегда предшествует применению любых других методов и является как бы вспомогательным. В результате по внешним признакам практически

сразу обнаруживаются некоторые повреждения или вышедшие из строя узлы объекта.

2. **Метод параметрического анализа** основан на определении параметров контролируемого объекта с помощью приборов и инструментов. Проверка параметров, обнаруживают отклонения и, таким образом, устанавливают отказавший элемент. Способ прост, нагляден и не требует подробной исходной информации. Результаты ранее выполненных проверок не учитываются при выполнении последующих. Недостаток метода — последовательность поиска неисправностей не оптимальна. Применяется для разнообразного оборудования.

3. **Вероятностно-временной метод** применяют при произвольном соединении элементов системы. Исходная информация содержит сведения об отказах элементов (вероятность безотказной работы или вероятность отказа), время, затраченное на проверку элемента, а также отношение t/p или t/q (t — время; p — вероятность безотказной работы; q — вероятность отказа).

Алгоритм поиска составляется с учетом функциональной схемы и матрицы неисправностей (табл. 1).

В табл. 1 цифрой 1 обозначено наличие связи между признаками неисправности элемента и элементом системы или причиной отказа. Каждому признаку отказа соответствует свое множество причин неисправностей. Значения вероятности отказа или вероятности безотказной работы устанавливают статистическим путем и используют для определения последовательности выполнения проверок по отношению:

$$p_1/t_1 > p_2/t_2 > \dots > p_n/t_n,$$

где t_1, t_2, \dots, t_n — время, затраченное на проверку i -го элемента;

p_1, p_2, \dots, p_n — вероятность безотказной работы i -го элемента.

Поиск начинают с проверки элемента, имеющего наибольшее отношение p/t .

Построенная таким образом программа обеспечивает минимальное время на поиск неисправности. Лучше учитывать минимум средних затрат на проведение поиска

$$Z_i = \sum_{i=1}^n C_i g_i,$$

где C_i — общая стоимость проверок для обнаружения i -го отказавшего элемента;

g_i — вероятность того, что отказ объекта обусловлен отказом i -го элемента.

Известен *критерий минимакса*: наилучшая последовательность проверок — та, при которой максимальная стоимость отказавшего элемента является наименьшей по сравнению с другими последовательностями. Целесообразную последовательность при наличии одного отказавшего элемента устанавливают в порядке увеличения отношения

$$Z_1/q_1 < Z_2/q_2 < \dots < Z_n/q_n.$$

Таблица 1

Матрица неисправностей

Причина отказа или отказавшие элементы	Признаки отказа			
	b_1	b_2	...	b_n
a_1	1	—	—	1
a_2	—	1	1	—
a_n	1	—	—	—

При вероятности нескольких отказавших элементов

$$Z_1(1 - q_1)/q_1 < Z_2(1 - q_2)/q_2 < \dots < Z_n(1 - q_n)/q_n.$$

Введение показателя стоимости предпочтительнее только времени проверки, так как учитывается помимо времени стоимость применяемого оборудования, квалификация персонала и другие показатели.

4. Метод половинного разбиения (метод дихотомии) позволяет получить экономичные (не избыточные) тесты и основан на математической теории информации, согласно которой получение информации — это уменьшение неопределенности суждения о состоянии объекта [12]. Допустим, объект может находиться в одном из k состояний, каждому из которых соответствует одна неисправность [13]. Любому из названных состояний объекта соответствует определенная вероятность. Без проверки технического состояния можно судить о нем с долей неопределенности. Эта неопределенность тем меньше, чем ближе к 0 или 1 вероятность исправного состояния объекта. Максимальная неопределенность соответствует равенству вероятностей исправного и неисправного состояний, когда вероятность исправного состояния равна 0,5. Если вероятность неисправного состояния равна 0,99, с полной уверенностью можно считать, что элемент требует ремонта.

В дальнейшем полагаем, что у неисправного элемента может быть только одна из k неисправностей. Предсказать какая — можно лишь с долей неопределенности. Причем эта неопределенность тем больше, чем больше равновероятных вариантов требуется рассмотреть. В качестве меры неопределенности опыта, имеющего k равновероятных исходов, условились считать $\log_2 k$. Вероятность любого из k равновероятных исходов равна $1/k$. Поскольку неопределенность всего опыта равна $\log_2 k$, можно считать, что каждый отдельный исход вносит неопределенность:

$$(1/k) \log_2 k = -(1/k) \log_2 (1/k).$$

Если при k равновероятных исходах вероятность i -го исхода равна p_i , то вносимая им неопределенность составляет $-p_i \log_2 p_i$, а неопределенность всего опыта:

$$H(k) = -\sum_{i=1}^k p_i \log_2 p_i.$$



Эту величину называют энтропией опыта. Равенство ее нулю означает, что исход опыта заранее известен. В процессе опыта энтропия постепенно уменьшается, и результат диагноза выдается, когда она равна нулю. Если до проведения j -й проверки энтропия была H_j , а после проведения стала равной H_{j+1} , то разность $I_j = H_j - H_{j+1}$ есть количество информации, получаемой при проведении j -й проверки. Наиболее простой тест предполагает получение ответа на вопрос: "Исправен ли объект?". Энтропия такого опыта с двумя исходами определяется как

$$H = \sum_{i=1}^2 H_i = -p \log_2 p - (1-p) \log_2 (1-p),$$

где p — вероятность исправного состояния объекта;

$(1-p)$ — вероятность неисправного состояния.

Наибольшая энтропия характерна для опыта, имеющего два равновероятных исхода (при $p = 0,5$, $H(p) = 1$) (рис. 1).

Количество информации, получаемое при осуществлении такого опыта, принято за единицу информации и называется двоичной единицей или битом. Рассмотрим возможность построения рационального алгоритма диагностирования на примере определения одного незамкнутого контакта в цепи из N последовательно соединенных контактов. Аналогично решается задача по определению элемента с пониженным сопротивлением изоляции в цепи, имеющей N элементов. После проведения первой проверки, состоящей в измерении проводимости цепи (или сопротивления ее изоляции), можно перейти к поиску отказавшего элемента.

Тривиальный алгоритм диагностирования состоит в последовательном переборе каждо-

го элемента. При этом неисправный элемент может быть найден после случайного числа проверок от 1 до N . Среднее число проверок при равенстве вероятностей отказов элементов равно $(N+1)/2$. Оптимальный алгоритм можно получить с использованием метода половинного разбиения. Его суть состоит в разделении объекта на две части с равными вероятностями состояний. В результате проверки проводится анализ результатов и принимается решение, в какой половине находится неисправный элемент. При следующей проверке оставшуюся половину снова делят на две части. Деление продолжается до тех пор, пока не будет обнаружен неисправный элемент. Вероятности нахождения неисправного элемента в каждой из двух частей, равные 0,5, соответствуют максимальной энтропии, определяемой как $\log_2 2$. Это значит, что в результате одной проверки будет получена информация, равная одному биту.

Рассмотрим применение метода половинного разбиения на примере поиска отказавшего элемента в электрической цепи, состоящей из последовательно соединенных восьми контактов (рис. 2).

Неисправность контакта заключается в том, что он разомкнут в то время, когда остальные контакты замкнуты. Первая проверка состоит в том, что с помощью индикатора напряжения или проводимости проверяют элементы 1...4. При ответе "да" (отказавший элемент находится в группе 5...8) выполняют вторую проверку, при которой проверяют элементы 5, 6. Если в результате первой проверки получаем ответ "нет" (неисправный элемент находится в группе 1...4), вторая проверка состоит в исследовании исправности элементов 1, 2. После проведения третьей проверки обнаруживают неисправный элемент. Количество информации, которое приносит поиск отказавшего элемента в рассмотренном примере, равно $\log_2 8$ бит, а каждая элементарная проверка приносила $\log_2 2 = 1$ бит. Следовательно, необходимое число проверок в данном примере определяется как $\log_2 8 / \log_2 2 = 3$, т.е. любой отказавший элемент может быть обнаружен за три проверки.

Поиск отказавшего элемента в цепи из 16 элементов потребует четыре проверки ($16 = 2^4$), из 32 — 5 проверок и т.д. Одна из трудностей применения метода половинного разбиения — практическая невозможность составления исчерпывающего перечня дефектов

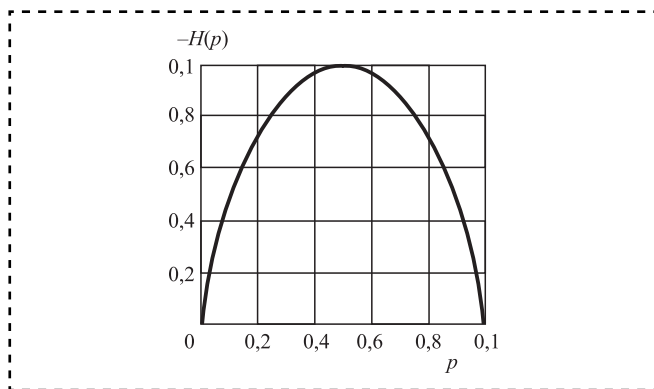


Рис. 1. График зависимости энтропии опыта от вероятности

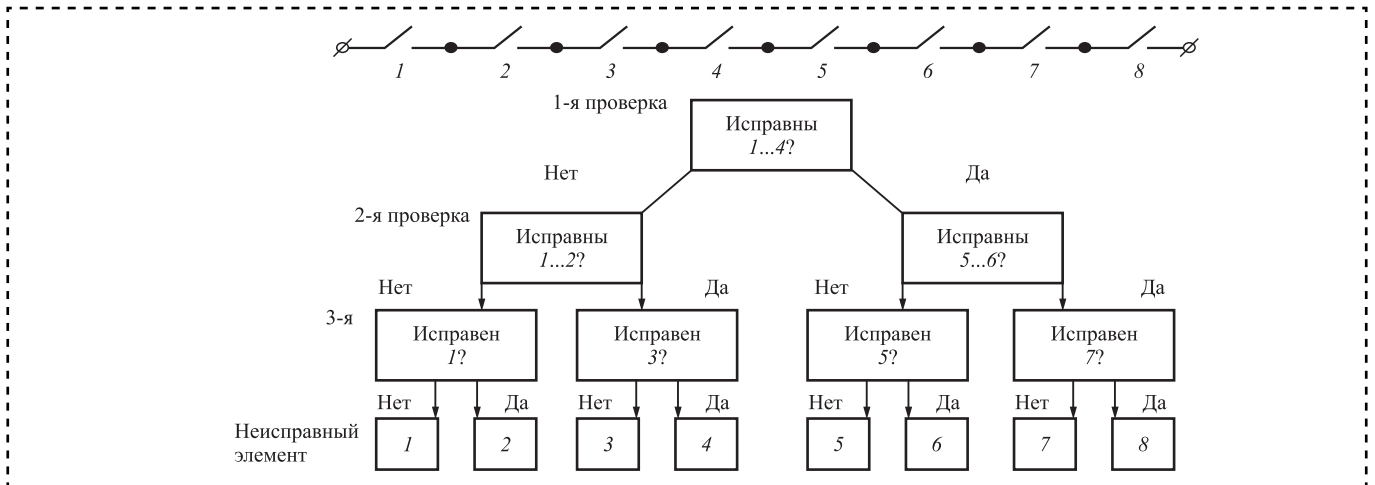


Рис. 2. Метод половинного разбиения

и ошибок, которые могут появиться в период настройки системы. Рассмотрим в качестве примера возможность построения рационального алгоритма диагностирования на примере определения элемента с пониженным сопротивлением изоляции в цепи, содержащей

$N = 16$ таких элементов (аналогичным образом может быть найден незамкнутый контакт в цепи из 16 замкнутых контактов) (рис. 3).

После проведения первой элементарной проверки, заключающейся в измерении сопротивления изоляции всей цепи и получе-

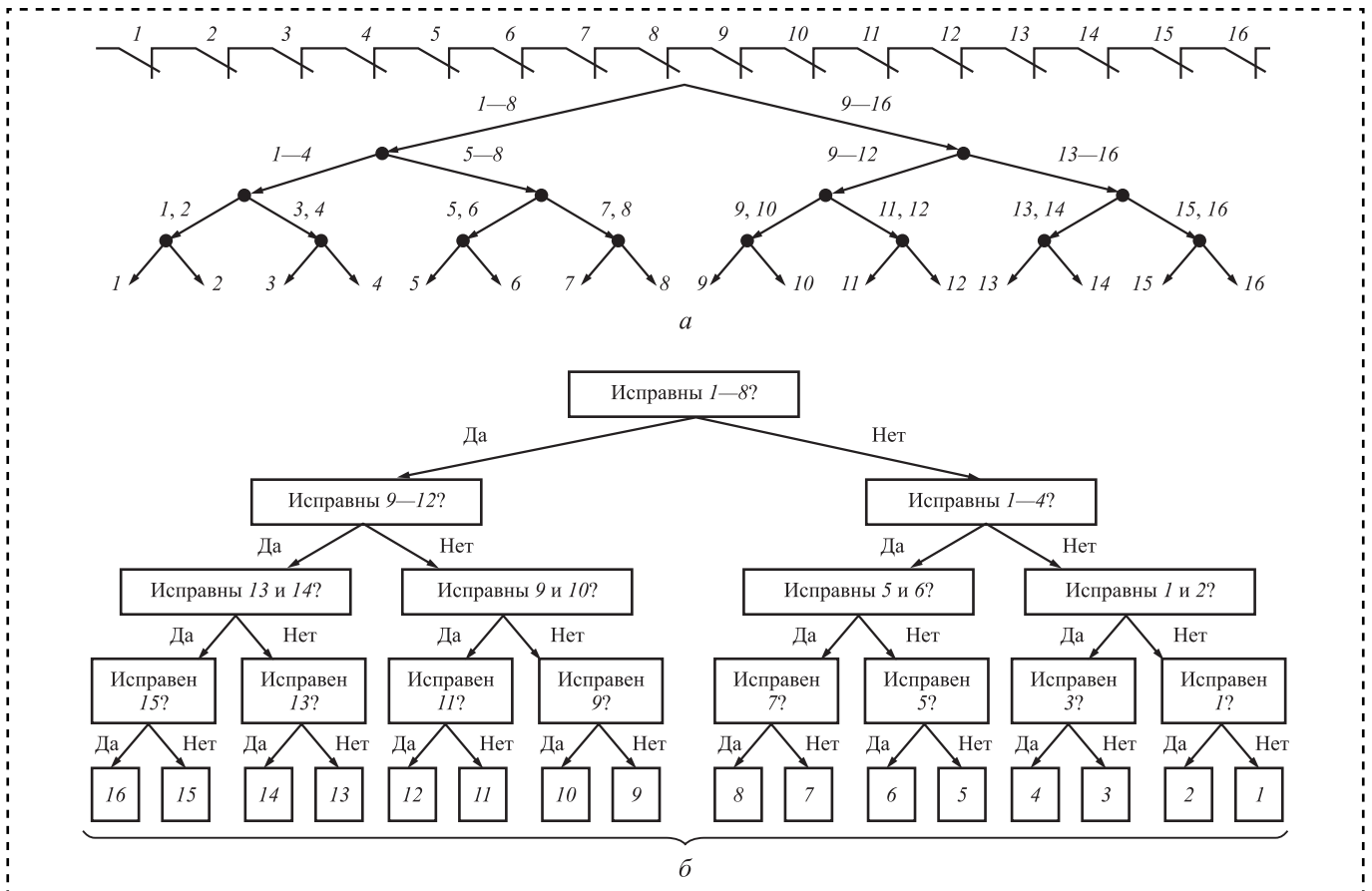


Рис. 3. Построение рационального алгоритма поиска дефекта:

а — граф возможных последовательностей поиска; б — возможный алгоритм поиска дефекта методом средней точки



нии отрицательного результата, необходимо перейти к поиску отказавшего элемента [14]. Тривиальный алгоритм состоит в *последовательном переборе* и измерении сопротивления изоляции каждого элемента. При этом отказавшим может оказаться первый же элемент либо для поиска отказавшего потребуется перебрать большее число элементов, максимально 15. Оптимальным будет алгоритм, построенный с использованием так называемого метода *средней точки, или метода половинного исключения*. Объединив в одну группу элементы 1...8, необходимо оценить сопротивление их изоляции. При получении ответа "да" (отказавший элемент находится в данной группе) следует перейти к проверке группы элементов 1...4 (или 5...8), а при ответе "нет" (отказавший элемент в другой группе) — к проверке группы 9...12 (или 13...16).

Последующие проверки продолжают, разбивая группы элементов на такие две части, чтобы вероятности нахождения отказавшего элемента в каждой из них были равны. Если при контроле элементов 1, 2 получен ответ "да", а при контроле элемента 1 — ответ "нет", то оценивать сопротивление изоляции элемента 2 нет необходимости, оно заведомо будет меньше нормы. Таким образом, не считая первой элементарной проверки, любой отказавший элемент может быть обнаружен за *четыре проверки (шага)*. При различных вероятностях отказов элементов принцип деления на группы с равными вероятностями отказов сохраняется.

Алгоритм поиска дефекта целесообразно закрепить в виде строго определенной последовательности. Такая последовательность может быть реализована в программе автоматического контроля или представлена в виде письменной инструкции для исполнителей. Выполняется построение рациональных алгоритмов поиска дефекта (см. рис. 3): граф возможных последовательностей поиска; возможный алгоритм поиска дефекта методом средней точки. Основные достоинства аналитических диагностических моделей — их глубина и полнота описаний, но они сложны в расчетах и не обладают инженерной наглядностью. Чтобы устранить эти недостатки, при разработке диагностических моделей используют графоаналитические модели.

5. Логический метод диагностирования (эвристический) в отличие от формальных не задает жестких и обязательных правил выпол-

нения технологических переходов. Этот метод также требует предварительного перечня всех возможных в объекте дефектов и разработки модели объекта. По своей сущности логический метод можно назвать методом гипотез, так как поиск дефекта ведется путем проверки выдвинутых при анализе проявлений дефекта гипотез о возможных причинах искомого дефекта. При получении результатов выполнения тех или иных технологических переходов выдвигают уточняющие гипотезы о причине дефекта, которые также проверяют до обнаружения дефекта. Контроль состояния элементов схемы требует использования контрольных точек, которые обеспечивают доступ к проводникам, соединяющим между собой элементы. Практически контрольные точки выполняются в виде клемм, электрических гнезд, проводников с зажимами и т.п. Рассмотрим диагностику схемы, представленной на рис. 4. Здесь контакты обозначены К1, К2, К3, а контрольные точки — цифрами 1, 2, 3, 4.

Схема исправна, если каждый из контактов находится в замкнутом или разомкнутом состоянии в зависимости от управления им. Предполагаем, что в схеме может быть только одна неисправность. В состоянии каждого из трех контактов можно убедиться с помощью трех проверок, проверяя электрическую цепь между контрольными точками 1-2, 2-3 и 2-4. Внутренняя контрольная точка 2 не всегда доступна для контроля. В таком случае, применяя логический метод контроля цепи по участкам 1-3, 1-4 или 3-4, можно за три проверки обнаружить неисправный элемент. Кроме того, такой метод позволяет решить задачу, уменьшив число проверок до двух. Порядок проверок и их результаты представлены в табл. 2, где цифры 1 и 0 соответствуют ответам "да" и "нет" на вопрос: "Есть ли цепь между контрольными точками?". Таким образом, как показал рассмотренный пример, не всегда необходимо использовать все контрольные точки.

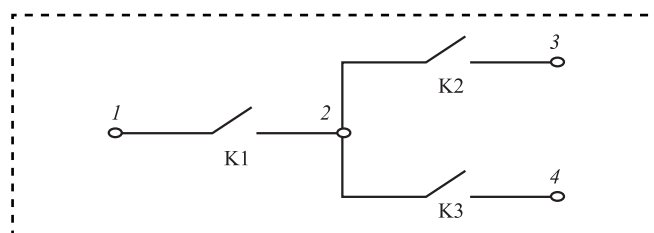


Рис. 4. Схема с последовательным и параллельным соединением контактов

Таблица 2

Результаты проверок схемы

Результат проверки	Проверяемый участок			Отказавший элемент
	1...3	1...4	3...4	
001	0	0	1	К1
010	0	1	0	К2
100	1	0	0	К3

6. Метод применения теории графов. Практический интерес представляет решение задачи по диагностике схемы с применением минимального числа контрольных точек. Рассмотрим метод определения места расположения и число контрольных точек.

Представленная на рис. 5 схема содержит пять исполнительных контактных элементов К1...К5, каждый из которых управляется соответствующей катушкой. Для диагностики схемы выведены контрольные точки 1...6, а для подачи управляющих воздействий, изменяющих состояние схемы, точки 7...11. Подавая управляющие воздействия на точки 7...11 и определяя проводимость контактов между точками 1-2, 2-3, 3-4, 3-5, 2-6, можно найти неисправный контакт.

Решим задачу определения минимального числа контрольных точек и их расположения с использованием теории графов. *Графом* называют графическую модель электрической схемы, в которой элементы схемы заменяют ребрами, а соединения элементов (электрические проводники) — вершинами (кружками), являющимися контрольными точками. На рис. 6 приведен граф, на ребрах которого (прямые линии) показаны элементы схемы (контакты) и точки, на которые нужно подавать воздействия.

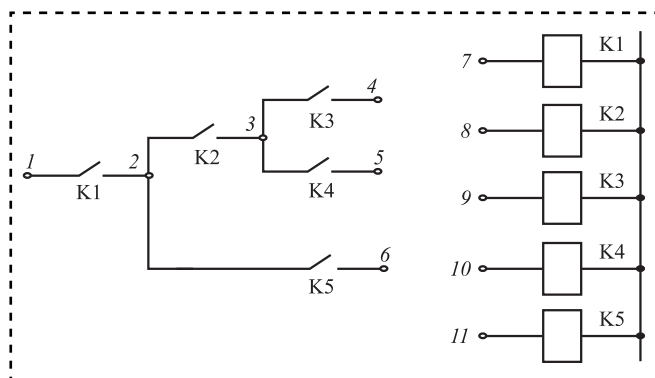


Рис. 5. Схема с исполнительными элементами

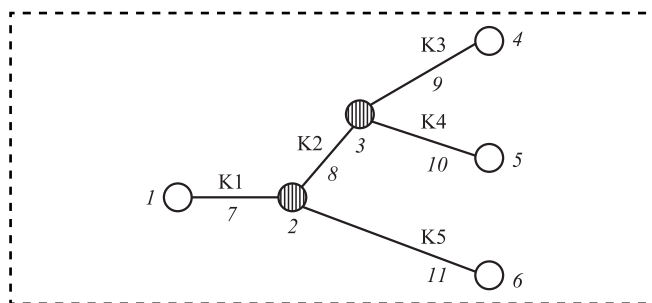


Рис. 6. Граф схемы

Таблица 3

Результаты проверок схемы с исполнительными элементами

Номер контрольной точки			Неисправный элемент	
4	5	6	Граф	Схема
0	0	0	1...2	К1
0	0	1	2...3	К2
0	1	1	3...4	К3
1	0	1	3...5	К4
1	1	0	2...6	К5
1	1	1	Норма	Норма

Контрольные точки в вершинах графа с числом ребер больше двух можно для контроля схемы не использовать (точки 2 и 3). Такие точки называют избыточными. Для проверки рассматриваемой схемы нужно подавать воздействия в точки 7...11, контрольное воздействие, не приводящее к изменению состояния схемы (напряжение питания), — в точку 1, а реакции снимать с точек 4, 5, 6. Появление напряжения в последних обозначим единицей, а отсутствие — нулем. Тогда каждому неисправному элементу соответствует свой код, если допустить в схеме наличие только одной неисправности. Результаты проверок схемы на рис. 6 приведены в табл. 3.

Заключение

К недостаткам вышеперечисленных методов (их называют формальными методами) следует отнести то, что для их применения необходима статистическая информация, полученная при диагностировании объекта. Однако дефекты



и их проявление в данном объекте могут отличаться от известных ранее. Формальные методы в практике диагностики и настройке систем из-за недостатков, присущих им, используют редко. Более широкое распространение получил логический метод.

Возможность выявления дефектов и прогнозирования состояния контролируемого узла или всей системы в целом дает техническая диагностика. Наибольший эффект при этом можно получить за счет создания и внедрения в каждом локомотивном депо средств диагностики на базе вычислительной техники и совершенствования системы планово-предупредительных ремонтов, а также перехода на ремонт локомотивов по фактическому техническому состоянию.

Библиографический список

1. **Таран В.П.** Диагностирование электрооборудования. Киев: Техника, 1983. 200 с.
2. **Тептиков Н.Р., Резниченко А.А., Губарев П.В., Глазунов Д.В.** Математические методы принятия решений в системах диагностики и управления на тяговом подвижном составе // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 1. С. 13—15.
3. **Резниченко А.А., Чеботарев Е.А., Тептиков Н.Р., Глазунов Д.В.** Оценка безотказности и готовности локомотивов в период нормальной эксплуатации // Вестник Уральского государственного университета путей сообщения. 2018. № 3 (39). С. 15—22.
4. **Губарев П.В., Глазунов Д.В., Мищикина Е.С.** Анализ системы ремонта и диагностики локомотивов по фактическому состоянию // Труды международной научно-практической конференции "Транспорт-2013".

Ростовский государственный университет путей сообщения. 2013. С. 143—144.

5. **Глазунов Д.В.** Визуализация ротапечного метода смазывания гребней колес подвижного состава // Железнодорожный транспорт. 2018. № 7. С. 70—72.

6. **Майба И.А., Глазунов Д.В.** Диагностика работы гребнерельсосмазывателя при помощи телевизионно-цифрового комплекса // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2010. № 3 (39). С. 24—29.

7. **Кохановский В.А., Глазунов Д.В.** Управление эксплуатационными показателями смазочного материала // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 54—58.

8. **Глазунов Д.В.** Исследование значимости факторов, влияющих на ресурс смазочного материала в паре трения "колесо—рельс" // Вестник машиностроения. 2017. № 6. С. 63—65.

9. **Кохановский В.А., Глазунов Д.В.** Выбор компонентов смазочного материала для открытых узлов трения подвижного состава // Вестник машиностроения. 2016. № 3. С. 36—38.

10. **Глазунов Д.В.** Методика исследования трибологических характеристик компонентов смазочного блока, работающего в трибоконтакте "колесо—рельс" // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 3. С. 31—37.

11. **Майба И.А., Глазунов Д.В.** Теоретическое обоснование механизма смешанной (полужидкостной) смазки в контакте "твердый оболочечный смазочный стержень—колесо—рельс" // Инженерный вестник Дона. 2012. № 1 (19). С. 223—232.

12. **Введение** в технологическую диагностику электроподвижного состава / В.В. Привалов и др. М.: ВЗИИТ, 1980. 44 с.

13. **Чеботарев Е.А.** Методы диагностирования систем управления электровозов и электропоездов: Учебное пособие. Ростов н/Д.: Рост. гос. ун-т путей сообщения, 2001. 80 с.

14. **Тептиков Н.Р., Губарев П.В., Коновалов П.Ю., Лященко А.М.** Основы технической диагностики: курс лекций. Ростов н/Д.: Рост. гос. ун-т путей сообщения. 2013. 125 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

Е.А. Евгеньева, С.И. Дмитриев, А.И. Самаркин, Е.И. Самаркина, канд-ты техн. наук
(Псковский государственный университет)
E-mail: dmitrievsi55@gmail.com

Влияние технологических факторов на точность сборки на примере цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора 4МЦ2С-80

Рассмотрено влияние технологических факторов на точность сборки цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора.

The influence of technological factors on the assembly accuracy of a cylindrical two-stage coaxial gearbox is considered.

Ключевые слова: сборка, редуктор, звено размерной цепи.

Keywords: assembly, reducer, dimensional chain link.

Сборка редуктора — сложная и трудоемкая операция. В процессе механосборочных работ возникает проблема обеспечения точности сборки, которая заключается в обеспечении требуемой точности замыкающего звена.

Методы достижения требуемой точности: полная, неполная взаимозаменяемость; групповая взаимозаменяемость, регулирование и пригонка [1, 2].

Накопленный опыт работы при сборке цилиндрического двухступенчатого соосного редуктора на механосборочном участке Псковского завода механических приводов (ООО "ПЗМП") показывает, что для обеспечения требуемой точности целесообразно использовать метод регулирования, когда точность замыкающего звена достигается за счет изменения размера одной из деталей (либо группы деталей) соединения, называемой компенсатором, при этом отсутствует снятие слоя материала. Компенсирующим звеном A_7 является набор металлических прокладок между крышкой редуктора и его корпусом, а замыкающим — зазор A_Δ (рис. 1).

Процесс набора прокладок, необходимых для обеспечения точного размера компенсатора, обычно трудоемок и может занять даже у высококвалифицированного специалиста около получаса, а в особых случаях и до сорока минут при норме времени на всю сборку данного редуктора 60 мин.

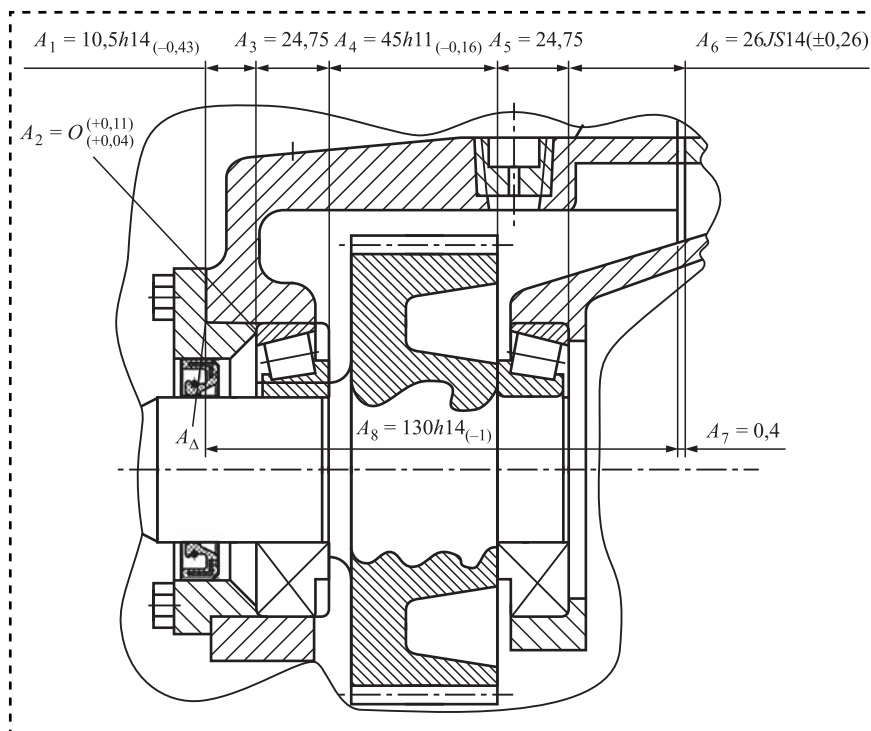


Рис. 1. Выходной вал редуктора 4МЦ2С-80

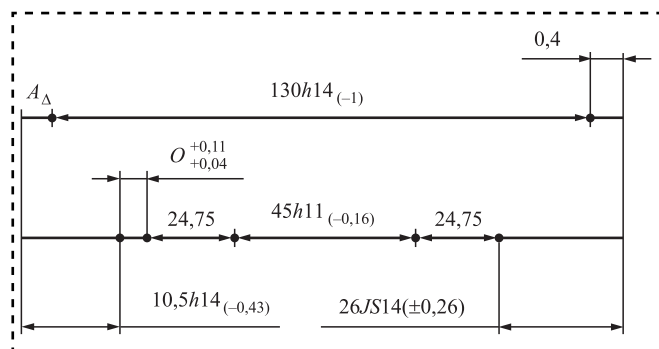


Рис. 2. Размерная цепь выходного вала редуктора 4МЦ2С-80

Соответственно, наибольшая проблема при сборке мотор-редуктора — это подбор компенсатора, обеспечивающего требуемый зазор между крышкой редуктора и его корпусом.

На рис. 2 приведена размерная цепь выходного вала редуктора. Допуски на размеры деталей, входящих в размерную цепь, исходя из

минимальных затрат, назначим по 14-му качеству, за исключением монтажной ширины подшипников A_3 и A_5 (она должна соответствовать ГОСТ 27365—87), ширины зубчатого колеса A_4 (выполняется по h11), а также толщины паронитовой прокладки A_7 (выполняется по h16).

Выполним расчет размерной цепи методом максимума-минимума. Для этого составим табл. 1 данных звеньев размерной цепи.

Номинальный размер замыкающего звена 0,6 мм, верхнее отклонение +2,47 мм, нижнее –1,31 мм, т.е. теоретический допуск на его размер равен 3,78 мм, который представляется достаточно большим, поэтому, исходя из практики работы, уменьшим его до 2,4 мм и назначим новые отклонения на размеры. Новые допуски на звенья цепи сведем в табл. 2.

Также провели расчет данной размерной цепи выходного вала редуктора вероятностным методом.

Таблица 1

Данные звеньев размерной цепи выходного вала

Номер звена	Номинальный размер, мм	Квалитет	Допуск, мкм	Отклонения, мкм	
				Верхнее E_s	Нижнее E_i
A_1	10,5	h14	430	0	–430
A_2	0	—	70	+110	+40
A_3	24,75	ГОСТ	500	+250	–250
A_4	45	h11	160	0	–160
A_5	24,75	ГОСТ	500	+250	–250
A_6	26	$\pm IT14/2$	520	+260	–260
A_7	0,4	h16	600	0	–600
A_8	130	h14	1000	0	–1000

Таблица 2

Новые данные звеньев размерной цепи выходного вала редуктора

Номер звена	Номинальный размер, мм	Квалитет	Допуск, мкм	Отклонения, мкм	
				Верхнее E_s	Нижнее E_i
A_1	10,5	h12	180	0	–180
A_2	0	—	70	+110	+40
A_3	24,75	ГОСТ	500	+250	–250
A_4	45	h11	160	0	–160
A_5	24,75	ГОСТ	500	+250	–250
A_6	26	H11	130	+130	0
A_7	0,4	h16	600	0	–600
A_8	130	h11	250	0	–250

Сравнение результатов расчетов размерной цепи двумя методами показывает, что при методе расчета на максимум-минимум получены 11-е квалитеты звеньев размерной цепи. При расчете вероятностным методом — 12-е квалитеты, а на размер A_1 назначен 14-й квалитет. С точки зрения производства, нет особой разницы в технологии получения деталей по 11-му и 12-му квалитетам, но дальнейший анализ и все расчеты будут выполняться по методу максимума-минимума, поскольку из двух представленных первый обеспечивает наименьшие предельные отклонения размеров деталей редуктора, чего и необходимо добиться для уменьшения искомой толщины компенсатора.

Были проведены аналогичные расчеты для размерных цепей выходного и промежуточного валов данного редуктора.

Анализ сборочных цепей показывает, что зазор между крышкой и корпусом редуктора напрямую зависит от размера, обеспечиваемого напрессовкой подшипников. Отсюда очевидно, что чем меньше этот размер, тем меньше зазор и, следовательно, толщина компенсатора. Число прокладок разной толщины, используемых для набора компенсатора, тоже должно сокращаться.

При сборке выходного вала редуктора на монолитное вал—колесо напрессовывают два подшипника (с обеих сторон зубчатого колеса) при помощи пресса, и недопрессовка этих подшипников может привести к увеличению зазора между корпусом и крышкой редуктора. Для того чтобы проверить данное предположение, составим отдельную размерную цепь для вала—колеса редуктора с напрессованными подшипниками (рис. 3, 4).

Составляем табл. 3 данных звеньев этой цепи.

В результате расчетов получаем номинальный размер замыкающего звена $A_{\Delta 1} = 94,5$ мм с допуском 1,16 мм.

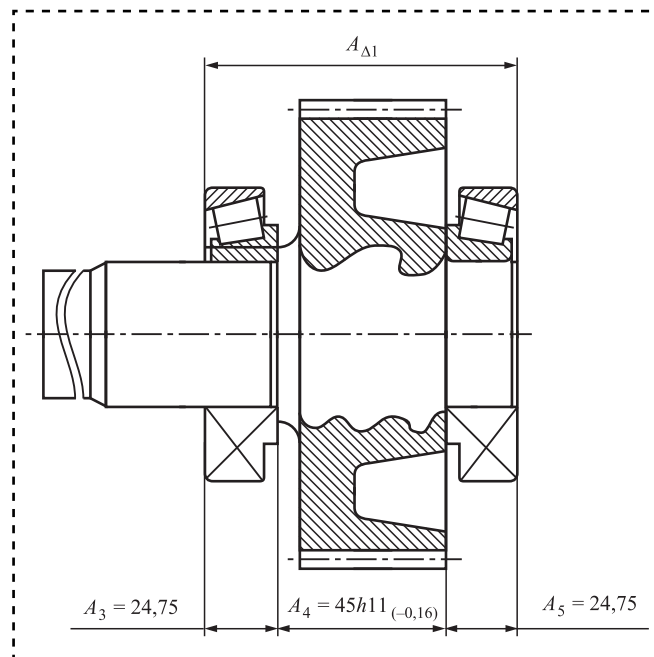


Рис. 3. Вал—колесо редуктора с напрессованными подшипниками

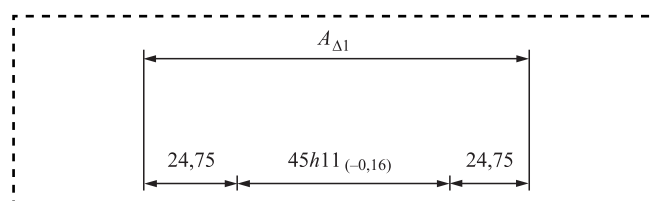


Рис. 4. Размерная цепь подшипник—колесо—подшипник выходного вала редуктора

Сравним расчетный размер замыкающего звена с размерами, снятыми с реальных изделий на механосборочном участке ООО "ПЗМП". В партии из 15 редукторов два реальных размера не вошли в установленный допуск.

Поскольку все комплектующие выходного вала проверены ОТК, исключаем возможные погрешности обработки.

Таблица 3

Данные звеньев размерной цепи подшипник—колесо—подшипник

Номер звена	Номинальный размер, мм	Квалитет	Допуск, мкм	Отклонения, мкм	
				Верхнее E_s	Нижнее E_i
A_3	24,75	ГОСТ	500	+250	-250
A_4	45	h11	160	0	-160
A_5	24,75	ГОСТ	500	+250	-250



Заключение

При запрессовке подшипников на данных двух валах не было обеспечено необходимое усилие запрессовки, что и сказалось на размере $A_{\Delta 1}$, который напрямую влияет на искомый зазор между корпусом и крышкой редуктора.

Поскольку зазор между крышкой и корпусом редуктора напрямую зависит от размера, обеспечиваемого напрессовкой подшипников, то чем меньше этот размер, тем меньше будет зазор и, следовательно, толщина компенсатора. число прокладок разной толщины, используемых для набора компенсатора, тоже должно сокращаться.

Искомый зазор был уменьшен в ходе работы на стадии проектирования размерных цепей валов и их анализа. Но недопрессовка подшипников почти в 50 % случаев приводит к тому, что размер, обеспечиваемый напрессовкой подшипников, выходит за пределы установленного допуска, что вновь увеличит размер толщины компенсатора.

Недопрессовка подшипников возникает из-за человеческого фактора, поскольку для этих целей на ОАО "ПЗМП" используется оборудование, в несколько раз превышающее требуемое усилие, и слесари механосборочных работ намеренно недопрессовывают подшипники, чтобы избежать возможных поломок.

Первый вариант решения данной проблемы — замена оборудования на пресс с меньшим максимальным усилием.

Второй вариант — в технологический процесс сборки редуктора внести операции замера размеров, обеспечиваемых напрессовкой под-

шипников на выходном и промежуточном валах соответственно.

Замеры, производимые еще на этапе сборки валов редуктора, позволят узнать заранее, входят ли размеры, обеспечиваемые напрессовкой подшипников, в установленный допуск, что даст слесарям механосборочных работ информацию о размере набираемого прокладками компенсатора еще до этапа подгонки редуктора. Набор компенсатора будет проводиться уже не "вслепую", а с примерным пониманием конечной толщины, что, несомненно, позволит сэкономить время, затрачиваемое на сборку мотор-редуктора. Это, в свою очередь, во-первых, сэкономит затраты предприятия, например, на электричество и заработную плату работникам, а во-вторых, на перспективу, повысит доход посредством увеличения изготовленных единиц продукции за единицу времени.

Усовершенствованный технологический процесс сборки мотор-редуктора 4МЦ2С-80 был проверен на практике на механосборочном участке Псковского завода механических приводов.

Установлено, что замеры размеров, обеспечиваемых напрессовкой подшипников, экономят в среднем на сборке одного редуктора около 7 мин (11,7 %).

Библиографический список

1. РД 50-635—87. Методические указания. Цепи размерные. Основные понятия. Методы расчета линейных и угловых цепей.
2. Фещенко В.Н. Справочник конструктора. Кн. 2. Проектирование машин и их деталей. М.: Инфра-Инженерия, 2016. 400 с.





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)

E-mail: zhitnikovu@mail.ru

Обоснование параметров пневмоцилиндра и пружины в устройстве запрессовки цилиндрических ступенчатых резиновых уплотнений в отверстия собираемых узлов

Обоснованы параметры пневмоцилиндра для обеспечения надежной запрессовки цилиндрических ступенчатых резиновых втулок в отверстия собираемых узлов и пружины для возвращения элементов устройства в исходное положение.

The parameters of the pneumatic cylinder are substantiated to ensure reliable pressing of cylindrical stepped rubber bushings into the holes of the assemblies and the springs to return the device elements to their original position.

Ключевые слова: автоматизированная запрессовка, резиновые ступенчатые втулки, собираемый узел, пневмоцилиндр, пружина, шиббер.

Keywords: automated pressing, rubber stepped bushings, assembled unit, pneumatic cylinder, spring, gate.

Сборочные операции запрессовки цилиндрических ступенчатых уплотнений нашли применение при сборке головок двигателей автомобилей и тракторов.

Обоснуем параметры пневмоцилиндра для надежной запрессовки цилиндрических ступенчатых резиновых уплотнений в отверстия собираемых узлов и требуемую силу пружины пневмоцилиндра для возвращения элементов устройства в исходное положение.

Устройство выполняет одну из сборочных операций в автоматическом комплексе сборки головки двигателя трактора (рис. 1) [1, 3, 5].

Головка двигателя 17, закрепленная поджатием пружины 18 в спутнике 20, закрепленном на оси 19 поворотным столом 21, который, поворачиваясь по оси 22, подается на позицию запрессовки уплотнения. Из питателя 9 по стержню 3 цилиндрическое уплотнение 15 выпадает в отверстие ползуна 11, соединенного пружинами 26 с основанием 16. Подается команда на подвод исполнительного органа для выполнения операции запрессовки. Под действием силы пневмоцилиндра 2, жестко

закрепленного фланцем к основанию автоматического комплекса 1, вниз выдвигается шток 5 пневмоцилиндра 4, перемещая исполнительный орган устройства по штангам 25, состоящий из плиты 6, к которой крепится поджатый пружины 7 пуансон 8 корпуса 24. Ролик 12 ползуна 11, в отверстии которого имеется уплотнение, взаимодействует с поджатым пружины 13 кулачком 14. Ползун 11 перемещается по направляющим 10 в зону запрессовки, располагаясь соосно со ступенчатым отверстием головки 17. Нижняя плита 16 своими штифтами 23 доориентирует головку относительно запрессовывающего устройства. Наконечник пуансона 8 входит в цилиндрическое отверстие уплотнения 15 и запрессовывает его в ступенчатое отверстие головки двигателя 17. Подается команда на отвод исполнительного органа запрессовывающего устройства в исходное положение.

В момент окончания запрессовки ступенчатого цилиндрического резинового уплотнения сила пневмоцилиндра $F_{\text{пн}}$ должна преодолеть суммарную силу трения кольцевых резиновых

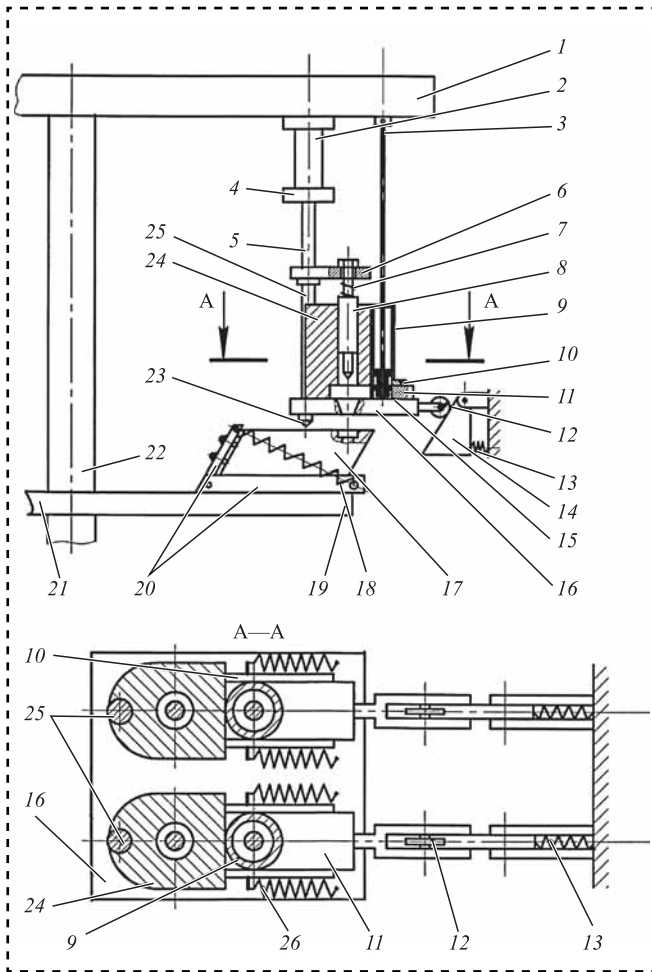


Рис. 1. Общий вид сборочного устройства

уплотнений, расположенных на поршне, взаимодействующих с внутренней поверхностью цилиндра $2F_{\text{тр}}^{\text{п}}$, кольцевых резиновых уплотнений, расположенных на штоке поршня, взаимодействующих с крышкой пневмоцилиндра $2F_{\text{тр}}^{\text{ш}}$, цилиндрического ступенчатого уплотнения при запрессовке его в ступенчатое отверстие в головке двигателя $2F_{\text{тр}}^{\text{уп}}$ и силу упругости пружины пневмоцилиндра $F_{\text{пр}}$:

$$F_{\text{пц}} > 2F_{\text{тр}}^{\text{п}} + 2F_{\text{тр}}^{\text{ш}} + 2F_{\text{тр1}}^{\text{уп}} + 2F_{\text{тр2}}^{\text{уп}} + F_{\text{пр}}. \quad (1)$$

Силу трения уплотнений поршня находим по методике, представленной в работах [2, 4].

Вначале определим относительную деформацию сжатия кольцевого резинового уплотнения цилиндрического сечения поршня:

$$\varepsilon_{\text{п}} = \left(\frac{d_{\text{п}}^{\text{у}} - H_{\text{п}}}{d_{\text{п}}^{\text{у}}} \right) 100 \%, \quad (2)$$

где $d_{\text{п}}^{\text{у}}$ — диаметр сечения кольцевого резинового уплотнения на поршне;

$H_{\text{п}}$ — глубина канавки под уплотнение на поршне, $H_{\text{п}} = \frac{D_{\text{п}} - d_{\text{п}}}{2}$;

$D_{\text{п}}$ — диаметр поршня пневмоцилиндра;
 $d_{\text{п}}$ — диаметр канавки под уплотнение на поршне.

По зависимости контактного давления уплотнения поршня от относительной деформации уплотнения цилиндрического сечения (кривая 1) находим контактное давление $p_{\text{к}}^{\text{п}}$ (рис. 2).

Площадь взаимодействия деформированного уплотнения с внутренней поверхностью пневмоцилиндра находим из выражения:

$$S = l_{\text{п}}^{\text{у}} \pi D_{\text{п}},$$

где $l_{\text{п}}^{\text{у}}$ — ширина взаимодействия уплотнения поршня с внутренней поверхностью пневмоцилиндра (находится из геометрии взаимодействия) (рис. 3),

$$l_{\text{п}}^{\text{у}} = 2 \sqrt{\frac{(d_{\text{п}}^{\text{у}})^2}{4} - \left(\frac{d_{\text{п}}^{\text{у}}}{2} - \Delta_{\text{п}} \right)^2},$$

где $\Delta_{\text{п}}$ — величина максимальной деформации сечения уплотнения,

$$\Delta_{\text{п}} = d_{\text{п}}^{\text{у}} - H_{\text{п}} = d_{\text{п}}^{\text{у}} - \frac{D_{\text{п}} - d_{\text{п}}}{2}.$$

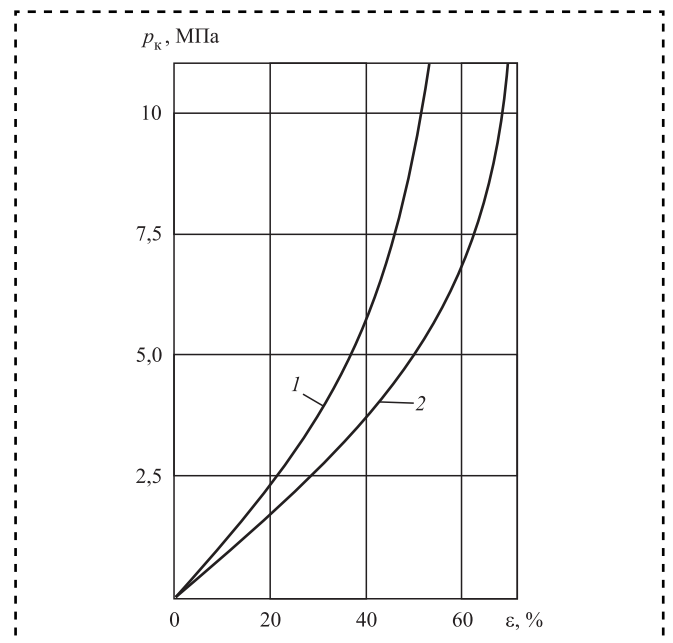


Рис. 2. График зависимости $p_{\text{к}} = f(\varepsilon)$ для уплотнений: 1 — цилиндрического сечения; 2 — прямоугольного сечения

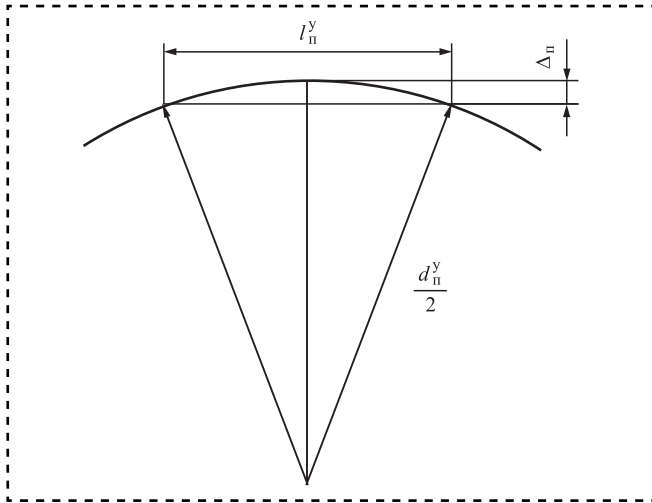


Рис. 3. Нахождение ширины взаимодействия уплотнения поршня с внутренней поверхностью пневмоцилиндра $l_{\text{п}}^y$

Сила трения двух уплотнений поршня о внутреннюю поверхность пневмоцилиндра:

$$F_{\text{тр}}^{\text{п}} = p_{\text{к}}^{\text{п}} 2 \sqrt{\left(\frac{d_{\text{п}}^y}{4}\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{п}}^y}{2} - \Delta_{\text{п}}\right)^2} \pi D_{\text{п}} f, \quad (3)$$

где f — коэффициент сухого трения резины о поверхность стали.

Не исключено, что при эксплуатации устройства смазка на поверхностях штока и цилиндра может загустеть (высохнуть).

По аналогии с предыдущим, силу трения резинового уплотнения штока можно записать:

$$F_{\text{тр}}^{\text{ш}} = p_{\text{к}}^{\text{ш}} 2 \sqrt{\left(\frac{d_{\text{ш}}^y}{4}\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{ш}}^y}{2} - \Delta_{\text{ш}}\right)^2} \pi D_{\text{ш}} f, \quad (4)$$

где $d_{\text{ш}}^y$ — диаметр сечения кольцевого резинового уплотнения на штоке;

$D_{\text{п}}$ — диаметр штока;

$l_{\text{ш}}^y$ — ширина взаимодействия уплотнения штока с внутренней поверхностью отверстия на фланце пневмоцилиндра;

$$l_{\text{ш}}^y = 2 \sqrt{\left(\frac{d_{\text{ш}}^y}{4}\right)^2 - \left(\frac{d_{\text{ш}}^y}{2} - \Delta_{\text{ш}}\right)^2};$$

$\Delta_{\text{ш}}$ — максимальная деформация сечения уплотнения.

Найдем глубину канавки под уплотнение на штоке

$$H_{\text{ш}} = \frac{D_{\text{ф}} - d_{\text{ш}}}{2},$$

где $D_{\text{ф}}$ — диаметр отверстия на фланце пневмоцилиндра;

$d_{\text{ш}}$ — диаметр глубины канавки под уплотнение на штоке.

Максимальная деформация сечения кольцевого резинового уплотнения:

$$\Delta_{\text{ш}} = d_{\text{ш}}^y - H_{\text{ш}}.$$

По аналогии с предыдущим найдем силу трения ступенчатого цилиндрического уплотнения при его запрессовке в ступенчатое отверстие головки двигателя (рис. 4).

Находим относительную деформацию участков уплотнения на длине l_1 и l_2 :

$$\varepsilon_1 = \left[\frac{D_1 - D_1^0}{D_1} \right] 100 \%;$$

$$\varepsilon_2 = \left[\frac{D_2 - D_2^0}{D_2} \right] 100 \%,$$

где D_1^0 , D_2^0 — диаметры большого и меньшего ступенчатого отверстия на собираемом узле.

Определяем контактные давления на участке $l_1 - p_{\text{к}1}^{\text{уп}}$ и на участке $l_2 - p_{\text{к}2}^{\text{уп}}$ (рис. 2, кривая 2). Силы трения запишутся:

$$F_{\text{тр}1}^{\text{уп}} = p_{\text{к}1}^{\text{уп}} l_1 \pi D_1 f; \quad (5)$$

$$F_{\text{тр}2}^{\text{уп}} = p_{\text{к}2}^{\text{уп}} l_2 \pi D_2 f.$$

В конце запрессовки сила пружины равна:

$$F_{\text{пр}} = c(\Delta\lambda + l_1 + l_2), \quad (6)$$

где c — жесткость пружины;

$\Delta\lambda$ — величина предварительного поджатия пружины, при которой сила пружины обеспечит фиксированное положение поршня пневмоцилиндра в верхнем положении.

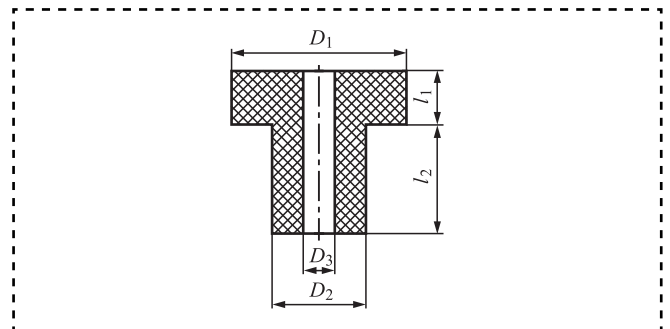


Рис. 4. Параметры ступенчатого цилиндрического уплотнения, используемые при расчетах



С учетом выражений (3)—(6), а также коэффициента запаса силы пневмоцилиндра k_1 выражение (1) примет вид:

$$F_{\text{пш}} = k_1 \left[4p_{\text{к}}^{\text{п}} \sqrt{\frac{(d_{\text{п}}^{\text{у}})^2}{4} - \left(\frac{d_{\text{п}}^{\text{у}}}{2} - \Delta_{\text{п}}\right)^2} \pi D_{\text{п}} f + 4p_{\text{к}}^{\text{ш}} \sqrt{\frac{(d_{\text{ш}}^{\text{у}})^2}{4} - \left(\frac{d_{\text{ш}}^{\text{у}}}{2} - \Delta_{\text{ш}}\right)^2} \pi D_{\text{ш}} f + p_{\text{к}1}^{\text{уп}} l_1 \pi D_1 f + p_{\text{к}2}^{\text{уп}} l_2 \pi D_2 f + c(\Delta\lambda + l_1 + l_2) \right]. \quad (7)$$

В выражении (7) два неизвестных — диаметр пневмоцилиндра $D_{\text{п}}$ и жесткость пружины c . Найдем жесткость пружины c из условия надежного возвращения системы в исходное положение под действием силы пружины:

$$F_{\text{пр}} > 2F_{\text{тр}}^{\text{п}} + 2F_{\text{тр}}^{\text{ш}} + 2F_{\text{тр}3}^{\text{уп}}, \quad (8)$$

где $2F_{\text{тр}3}^{\text{уп}}$ — сила трения цилиндрического ступенчатого резинового уплотнения по внутреннему диаметру D_3 .

Относительное сжатие цилиндрической поверхности ступенчатого уплотнения по внутреннему диаметру:

$$\varepsilon_3 = \left[\frac{(D_3 + D_1 - D) - D_3^0}{D_3 + D_1 - D^0} \right] 100 \%,$$

где D_3^0 — диаметр наконечника пуансона запрессовывающего устройства;

$D_1 - D$ — зазор между штырем и уплотнением.

По графику, представленному на рис. 2 (кривая 1), находим контактное давление $p_{\text{к}3}^{\text{уп}}$.

Окончательная сила трения наконечника пуансона δ по внутреннему диаметру D_3 :

$$F_{\text{тр}3}^{\text{уп}} = p_{\text{к}3}^{\text{уп}} (l_1 + l_2) \pi d_1 f. \quad (9)$$

При запрессовке сила пневмоцилиндра равна:

$$F_{\text{пш}} = [p] \frac{\pi(D_{\text{п}}^2 - d_{\text{ш}}^2)}{4}, \quad (10)$$

где $[p]$ — давление сжатого воздуха в магистрали; $d_{\text{ш}}$ — диаметр штока пневмоцилиндра.

С учетом выражений (3), (4), (9), (10) и коэффициента запаса силы пружины k_2 выражение (8) примет вид:

$$c(\Delta\lambda + l_1 + l_2) = k_2 \left[4p_{\text{к}}^{\text{п}} \sqrt{\frac{(d_{\text{п}}^{\text{у}})^2}{4} - \left(\frac{d_{\text{п}}^{\text{у}}}{2} - \Delta_{\text{п}}\right)^2} \times \pi D_{\text{п}} f + 4p_{\text{к}}^{\text{ш}} \sqrt{\frac{(d_{\text{ш}}^{\text{у}})^2}{4} - \left(\frac{d_{\text{ш}}^{\text{у}}}{2} - \Delta_{\text{ш}}\right)^2} \pi D_{\text{ш}} f + p_{\text{к}3}^{\text{уп}} (l_1 + l_2) \pi d_1 f \right]. \quad (11)$$

Из последнего выражения найдем жесткость пружины пневмоцилиндра c и, задаваясь диаметром штока, найдем внутренний диаметр пневмоцилиндра.

Следовательно, обоснованы математические зависимости диаметра пневмоцилиндра и жесткость пружины от параметров элементов устройства при выполнении операции автоматизированной запрессовки резиновых ступенчатых уплотнений в отверстия головки двигателя.

Библиографический список

1. **Автоматизация** технологических и производственных процессов в машиностроении: учебник для вузов / Ю.З. Житников и др.; под общ. ред. проф. Ю.З. Житникова. Старый Оскол: ТНТ, 2018. 656 с.
2. **Житников Ю.З., Житников Б.Ю.** Технологическая оснастка (расчет и проектирование): учебное пособие. Старый Оскол: ТНТ, 2016. 204 с.
3. **Житников Б.Ю., Житников Ю.З.** Устройства механизированной и автоматизированной сборки изделий. Вспомогательные устройства сборки, автоматы и автоматизированные комплексы. Ковров: ФГБОУ ВПО "КГТА им. В.А. Дегтярёва". 2015. 112 с.
4. **Уплотнения** и уплотнительная техника: справочник / Л.А. Кондаков и др. М.: Машиностроение, 1986. 464 с.
5. **А.с. 1801724 СССР, МКИ³ в 23Р19/02.** Автомат для установки уплотнителей в ступенчатые отверстия / Ю.З. Житников и др.; опубл. 1992. Бюл. № 10.

Е.М. Кулешова (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
E-mail: kuleshova.em@mail.ru

Оценка влияния эволюции показателей динамичности червячного зацепления на параметры технического состояния в процессе эксплуатации

Представлены зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента динамичности от нагрузки при использовании пленкообразующих смазочных материалов. На основе регрессионного анализа получен закон распределения скорости изнашивания зубьев червячного колеса. Приведен расчет ресурса червячной передачи по критерию предельного износа с учетом изменения зависимости интенсивности изнашивания и скорости роста коэффициента динамичности от нагрузки.

The dependences of the wear intensity and the dynamic coefficient on the load when using film-forming lubricants are obtained. On the basis of regression analysis, the law of distribution of the wear rate of the worm wheel teeth is obtained. the calculation of the worm gear life according to the limit wear criterion is given, taking into account the change in the dependence of the wear intensity and the rate of growth of the dynamic coefficient on the load.

Ключевые слова: интенсивность изнашивания, пленкообразующие смазочные материалы, регрессионный анализ, червячная передача.

Keywords: wear intensity, film-forming lubricants, regression analysis, worm gear.

Введение

Основная причина выхода из строя червячных передач (ЧП), как и всех тяжело нагруженных сопряжений скольжения, — изнашивание. Состав смазочного материала (СМ) оказывает существенное влияние на процессы изнашивания при относительном скольжении сопряженных деталей, что выражается в уменьшении интенсивности изнашивания, а изменение состава СМ приводит к уменьшению динамических нагрузок, которые в свою очередь влияют на предельно допустимый износ.

Для оценки влияния СМ на процесс изнашивания наиболее приемлемым представляется метод сравнительных износных испытаний, когда интенсивность изнашивания определяется при одинаковых условиях, но с изменением одного параметра — состава СМ. Износ измеряли штангензубомером с точностью 10 мкм [1].

В случае использования пленкообразующих СМ на поверхности трения формируется пленка

из продуктов СМ, достигающая долей микрона, что характерно для наномодифицированных или коллоидных СМ [2]. Тогда зависимость интенсивности изнашивания I от давления p представляет собой параболу со смещенным относительно начала координат минимумом, причем смещение по оси давления указывает на область давления p_0 , в окрестностях которого пленкообразование проходит критическое значение давления, выше которого (по мере роста давления) процесс пленкообразования оказывается все более затрудненным:

$$I = k(p - p_0)^m, \quad (1)$$

где p_0 — критическое давление пленкообразования.

Увеличение p_0 расширяет зону изнашивания с высокой износостойкостью. Интерпретировать величину p_0 можно на основе представления о "втором минимуме" коэффициента трения [2].



Аналогично изменению зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки происходит изменение динамических условий нагрузки.

Цель работы — оценка влияния эволюции показателей динамичности червячного зацепления при применении пленкообразующих СМ на ресурс ЧП.

При проведении стендовых испытаний червячного редуктора 5Ч-80 использовали масло ТМ-5-18 с добавкой нанодисперсного коллоидного раствора частиц полититаната калия в олеиновой кислоте ("Стрибойл") и чистое масло ТМ-5-18.

Методика проведения эксперимента и полученные результаты

Наиболее сложно при оценке ресурса выбрать предельный износ. Данная величина ограничивается ростом коэффициента динамичности K_d , который зависит при прочих равных условиях от зазора в зацеплении, что связано с процессом изнашивания практически линейно [3, 4]. Однако в работе [4] рассматривается лишь один вариант подобной зависимости, в то время как изменение состава СМ ведет не только к изменению зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки, но и к изменению зависимости коэффициента динамичности от нагрузки аналогично формуле (1).

Показатель динамичности для быстроходного вала ЧП предложен в работе [5], его можно ввести в виде коэффициента прироста динамичности быстроходного вала:

$$K_d = 1 + \Delta T_{эд}, \quad (2)$$

где $\Delta T_{эд}$ — абсолютное значение прироста момента $T_{эд}$ в процессе колебаний, которое формируется преимущественно за счет автоколебаний, соотнесенное с текущим значением тормозного (нагружающего) момента $T_{тор}$ на достигнутой степени нагружения.

Формула (2) показывает, как амплитуда колебаний может изменяться в связи с ростом тормозного момента, в том числе, в случае превышения номинального момента. Предложение данной формулы связано с явлением автоколебаний, которые возникают и могут увеличиваться в связи с ростом силы трения в контакте ЧП, обусловленном ростом тормозного момента [5]. Для анализа амплитудно-частотной характеристики (АЧХ) удобно использовать

метод быстрого преобразования Фурье, который позволяет построить распределение амплитуд колебаний моментов в зависимости от значений соответствующих частот и выявить доминирующую частоту [6]. Обработанные методом быстрых преобразований Фурье данные по изменениям относительной амплитуды колебаний момента на быстроходном валу для основных частот $\Delta T_{эд}$ в процессе испытаний дают возможность выявить доминирующую частоту колебаний, на которую приходится основной объем мощности, расходуемой при колебаниях. Эта частота соответствует частоте автоколебаний, которая определяется характером контактного взаимодействия в зацеплении [5]. Относительная амплитуда $\Delta T_{эд}$, определяющая значение коэффициента динамичности быстроходного вала, позволяет не только оценить динамичность ЧП с разными СМ, но и ранжировать эти материалы по их противозадирному действию в зависимости от нагружающего момента, задав предельное значение коэффициента динамичности.

Экспериментальные данные показали, во-первых, что по мере роста тормозного момента момент на быстроходном валу, выраженный в относительных единицах, растет. Так как эта величина соответствует силе трения, данное явление согласуется с диаграммой Герси—Штрибека (коэффициент трения скольжения в условиях граничной смазки с ростом нагрузки растет экспоненциально). Во-вторых, по мере повышения антифрикционных свойств СМ амплитуда $T_{эд}$ уменьшается, таким образом, в соответствии с формулой (2), происходит и снижение коэффициента динамичности быстроходного вала, что, в свою очередь, приводит к повышению предельно допустимого износа и к увеличению ресурса по критерию изнашивания. Экспериментальные данные позволяют построить аналитические зависимости K_d от нагрузки (рис. 1 на стр. 2 обложки).

График зависимости предельного износа от нагрузки при использовании минерального масла без добавки и минерального масла с добавкой "Стрибойл" с учетом роста коэффициента динамичности показан на рис. 2 на стр. 2 обложки [7].

Регрессионный анализ

Для того чтобы оценить ресурс ЧП, необходимо определить закон распределения скорости изнашивания зубьев червячного колеса,

для этого рассмотрим аппарат планирования и регрессионного анализа экспериментов на примере обработки данных по влиянию нагрузки и состава СМ на интенсивность изнашивания ЧП.

При небольшом числе факторов $k = 2...3$ вполне возможно проводить анализ экспериментов с помощью полиномиального регрессионного уравнения:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i X_i + \sum_{i \neq j}^k b_{ij} X_i X_j + \dots, \quad (3)$$

где y — параметр оптимизации;

b_i — коэффициенты регрессии;

X_i — действующие факторы.

Для использования этого уравнения приведем соотношение между интенсивностью изнашивания, нагрузкой и составом СМ к виду (3). Один из основных факторов, влияющих на интенсивность изнашивания, — нагрузка. При этом, как было показано в наших экспериментах, на вид данной зависимости оказывает существенное влияние качество СМ. Для оценки влияния указанных факторов и математического описания процесса изнашивания использована модель первого порядка вида

$$I = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_{12} X_1 X_2, \quad (4)$$

где I — интенсивность изнашивания;

X_1 — нагрузка;

X_2 — наличие пленкообразующей добавки в СМ.

Для оценки адекватности модели и определения весомости коэффициентов регрессии составили план эксперимента. Для простых моделей типа (4) допустимо использовать полный факторный эксперимент. В табл. 1 показаны результаты экспериментов по определению

зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки с повторностью 3. Варьирование факторов проводили следующим образом: там, где в таблице против знака X_1 стоит (+), значение интенсивности изнашивания соответствует нагрузке 250 МПа, а знаку (–) соответствовало значение интенсивности изнашивания при нагрузке 150 МПа, а в отношении знака X_2 , указывающего на наличие пленкообразующей добавки в СМ, максимальное значение толщины пленки (1 мкм) отмечалось знаком (+), а минимальное (0,01 мкм) — знаком (–).

Среднее значение параметра оптимизации по параллельным опытам определяем по формуле

$$\bar{I}_u = \frac{1}{r} \sum_{i=1}^r I_{ui}.$$

Проверка возможности проведения регрессионного анализа по критерию Кохрена показала, что гипотеза об однородности дисперсий параллельных опытов подтверждается, так как экспериментальное значение критерия Кохрена не превышает табличного [Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.].

Основа регрессионного анализа — определение коэффициентов регрессии и оценка их статистической значимости:

$$b_i = \frac{1}{N} \sum_{u=1}^N \bar{I}_u X_i,$$

где X_i — определяет знак среднего значения параметра оптимизации, соответствующего строчке плана по табл. 1.

Например, $b_2 = -1,9 \cdot 10^{-9}$; $b_1 = 0,45 \cdot 10^{-9}$. Полученные значения коэффициентов указы-

Таблица 1

План полного факторного эксперимента

Номер эксперимента	X_0	X_1	X_2	$X_1 X_2$	\bar{I}_u	I_1	I_2	I_3
					10^{-9}			
1	+	–	–	+	4,8	4,3	4	6,2
2	+	–	+	–	1,7	2	1	2
3	+	+	–	–	4,6	3	6,75	4
4	+	+	+	+	0,1	0,09	0,1	0,11



вают на то, что увеличение нагрузки ведет к росту интенсивности изнашивания, а улучшение качества СМ — к снижению, и этот фактор многократно весомее фактора нагрузки, определяемого контактным давлением. Аналогичный результат при испытании пар трения сталь—бронза получен в работе [8].

После расчета всех коэффициентов уравнение (4) имеет вид

$$I = (2,8 - 0,45X_1 - 1,9X_2 - 0,33X_1X_2) \cdot 10^{-9}.$$

Это уравнение показывает, что фактор нагрузки может иметь весомость в сочетании с эффективностью действия СМ.

Оценку статистической значимости проводили путем сравнения критерия Стьюдента T_b для каждого коэффициента регрессии с его табличным значением [Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В. Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 278 с.]. Статистически незначимыми объявляли те коэффициенты, для которых T_{bi} оказывается меньше табличного значения T_b . Таким образом, при заданном уровне значимости 0,05 критерий Стьюдента T_b , который составляет 2,31, позволяет признать коэффициенты b_1 и b_3 статистически незначимым по их соотношению с ошибкой коэффициентов регрессии $s(b_i) = 3,39$. После исключения статистически незначимых коэффициентов уравнение регрессии принимает вид

$$I = 2,8 - 1,9X_2.$$

Проверка уравнения на адекватность показала, что его можно считать адекватным в рамках заданных условий эксперимента при удалении статистически незначимых коэффициентов b_1 и b_3 .

Определим закон распределения скорости изнашивания зубьев червячного колеса [Обеспечение износостойкости изделий. Метод оценки безотказности и долговечности восстановленных деталей по результатам стендовых испытаний. Методические рекомендации МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985]. Заменим кодированное значение фактора полученного полинома его натуральной единицей измерения:

$$X_2 = \frac{h - 0,00051}{0,00049},$$

где h — толщина смазочного слоя.

Для ЧП взаимосвязь скорости изнашивания и интенсивности изнашивания выглядит следующим образом [4]:

$$y = 2bGn_2I,$$

где b — полуширина площадки контакта по Герцу;

n_2 — частота вращения колеса;

I — интенсивность изнашивания;

G — геометрический параметр червячной передачи.

Закон распределения скорости изнашивания:

$$y = \left(2,8 - 1,9 \frac{h - 0,00051}{0,00049} \right) 389,4 \cdot 60 \cdot 10^{-9} \text{ мм/ч.}$$

Экспериментальные данные показывают, что фактор h — случайная величина и распределяется по нормальному закону. Далее рассмотрим два случая, первый — с использованием пленкообразующей добавки, второй — без добавки. Тогда фактор h обладает параметрами, отображенными в табл. 2.

Посчитаем часовой износ зубьев червячного колеса (здесь индекс (1) обозначает наличие пленкообразующей добавки, индекс (2) — отсутствие добавки):

$$\bar{y}_1 = 1,9 \cdot 10^{-5} \text{ мм/ч;}$$

$$\bar{y}_2 = 1 \cdot 10^{-4} \text{ мм/ч.}$$

Среднеквадратическое отклонение скорости изнашивания

$$\sigma_{y1} = 5,8 \cdot 10^{-6} \text{ мм/ч;}$$

$$\sigma_{y2} = 9,7 \cdot 10^{-6} \text{ мм/ч.}$$

Коэффициент вариации

$$v_{y1} = \frac{\sigma_{y1}}{\bar{y}_1} = 0,3;$$

$$v_{y2} = \frac{\sigma_{y2}}{\bar{y}_2} = 0,09.$$

Таблица 2

Параметры фактора h для разных СМ

Параметр	Минеральное масло с добавкой "Стрибойл"	Минеральное масло
Среднее значение, мм	$\bar{h}_2 = 1 \cdot 10^{-3}$	$\bar{h}_1 = 1 \cdot 10^{-5}$
Среднеквадратическое отклонение, мм	$\sigma_{h2} = 6,4 \cdot 10^{-5}$	$\sigma_{h1} = 1 \cdot 10^{-4}$



Так как $v_{y1}, v_{y2} \leq 0,33$, принимаем, что скорость изнашивания распределяется по нормальному закону.

Вычислим максимальную скорость изнашивания по формуле

$$y_{\max} = \bar{y} + z_{\alpha} \sigma_y,$$

где z_{α} — фактор, влияющий на скорость, $z_{\alpha} = 4,5$ для вероятности 0,9999;

$$y_{\max 1} = 4,5 \cdot 10^{-5} \text{ мм/ч};$$

$$y_{\max 2} = 0,4 \text{ мм/ч}.$$

Определение ресурса ЧП

Определить минимальное значение ресурса можно, используя формулу

$$T_{\min} = \alpha \sqrt{\frac{\Pi \alpha}{y_{\max}}},$$

где Π — предельный износ;

α — коэффициент, описывающий зависимость износа от наработки при постоянных условиях изнашивания (в нашем случае равен единице).

Значение минимального ресурса принимаем за сдвиг параметра ресурса $T_{\text{см}}$. Из графика на рис. 2 определим значения Π при номинальном тормозном моменте $T_{\text{тор}} = 260 \text{ Н} \cdot \text{м}$, который соответствует контактному давлению $p = 250 \text{ МПа}$. Для минерального масла с добавкой $\Pi = 2,5 \text{ мм}$, а для чистого минерального масла $\Pi = 2 \text{ мм}$.

Тогда определим минимальный ресурс

$$T_{\min 1} = \frac{2,5}{4,5 \cdot 10^{-5}} = 55 \ 282 \text{ ч};$$

$$T_{\min 2} = \frac{2}{0,4} = 5 \text{ ч}.$$

Находим 50%-ный ресурс по формуле:

$$T_{1\gamma=50} = \frac{\Pi_1}{y_1} - T_{\min 1} = 185 \ 296 \text{ ч};$$

$$T_{2\gamma=50} = \frac{\Pi_2}{y_2} - T_{\min 2} = 18 \ 369 \text{ ч}.$$

Средний ресурс вычислим по соотношению:

$$\bar{T} = \frac{T_{\gamma=50}}{w_{\gamma=50}},$$

где $w_{\gamma=50}$ — коэффициент, определяемый в соответствии с [МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985], $w_{\gamma=50} = 0,99$;

$$\bar{T}_1 = 187 \ 168 \text{ ч};$$

$$\bar{T}_2 = 18 \ 555 \text{ ч}.$$

Среднеквадратическое отклонение ресурса

$$\sigma_T = \bar{T} v_T,$$

где v_T — коэффициент вариации ресурса, определяется в соответствии с [МР 151-85. М.: ВНИИНМАШ, 1985];

$$\sigma_{T1} = 54 \ 278 \text{ ч};$$

$$\sigma_{T2} = 1855 \text{ ч}.$$

Находим 80%-ный ресурс по формуле

$$T_{\gamma=80} = T_{\gamma=50} \frac{w_{\gamma=80}}{w_{\gamma=50}};$$

$$T_{1\gamma=80} = 121 \ 659 \text{ ч}, \quad T_{2\gamma=80} = 1669 \text{ ч}.$$

С учетом смещения $T_{\text{см}}$ получаем окончательные значения ресурсов (табл. 3)

На рис. 3 на стр. 2 обложки показаны графики функции нормального распределения ресурса при использовании минерального масла с добавкой "Стрибойл" и при использовании чистого минерального масла.

Полученные результаты показывают, что без использования пленкообразующей добавки значение ресурса приближается к минимально допустимому, так как для подобных передач ресурс должен составлять не менее 10 тыс. ч (ГОСТ Р 50 891—96). В то время как при введении добавки ресурс многократно увеличивается. Данное явление объясняется снижением скорости роста K_d , что приводит к увеличению предельно допустимого износа.

Заключение

Таблица 3
Ресурс ЧП при использовании разных составов СМ, ч

Вероятность безотказной работы	Минеральное масло с добавкой "Стрибойл"	Минеральное масло
50 %	$t_{1\gamma=50} = T_{1\gamma=50} + T_{\text{см}1} = 240 \ 578$	$t_{2\gamma=50} = T_{2\gamma=50} + T_{\text{см}2} = 18 \ 374$
80 %	$t_{1\gamma=80} = T_{1\gamma=80} + T_{\text{см}1} = 176 \ 941$	$t_{2\gamma=80} = T_{2\gamma=80} + T_{\text{см}2} = 16 \ 740$



Получены зависимости интенсивности изнашивания и коэффициента динамичности от нагрузки при использовании пленкообразующей добавки на основе результатов триботехнических испытаний. Показано, что в отличие от стандартных зависимостей, где интенсивность изнашивания растет пропорционально увеличению нагрузки, при введении пленкообразующей добавки она начинает снижаться до определенного значения нагрузки, лимитируемого процессом пленкообразования. При введении пленкообразующей добавки к маслу, скорость роста коэффициента динамичности падает, что может быть объяснено процессом эволюции динамичности сопряжения в связи с увеличением его антифрикционности и демпфирующим влиянием пленкообразования.

В соответствии с результатами регрессионного анализа зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки и от вида СМ, необходимо отметить, что наличие пленкообразующей добавки является гораздо более существенным фактором, влияющим на интенсивность изнашивания, чем нагрузка. Получен закон распределения скорости изнашивания зубьев червячного колеса, на основании которого определен ресурс ЧП с учетом скорости роста коэффициента динамичности. Расчет ресурса ЧП при использовании минерального масла и минерального масла с пленкообразующей добавкой показал, что ресурс при введении пленкообразующей добавки к СМ многократно превышает нормы, требуемые стандартами. Это может быть объяснено совокупностью двух факторов — снижением интенсивности изнашивания и скорости роста коэффициента динамичности, что приводит к расширению области допускаемых нагрузок и снижению вероятности возникнове-

ния заедания, следовательно, и к росту ресурса по критерию предельного износа. Таким образом, использование пленкообразующих добавок позволяет существенно расширить ресурсные возможности ЧП.

Библиографический список

1. **Поляков С.А., Лычагин В.В., Кулешова Е.М.** Оценка влияния смазочных материалов на ресурс червячных передач по критерию предельного износа // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2018. № 8. С. 345—349.
2. **Поляков С.А.** Самоорганизация при трении и эффект безыносности. М.: РГАУ-МСХА, 2009. 108 с.
3. **Павлов В.Г.** Ресурс работы червячной передачи по критерию износа // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2005. № 5. С. 44—48.
4. **Андрienко Л.А., Вязников В.А.** Ресурс работы червячной передачи по критерию изнашивания // Известия вузов. Машиностроение. 2011. № 4. С. 3—6.
5. **Поляков С.А., Гончаров С.Ю., Куксенова Л.И.** Разработка метода оценки работоспособности червячных передач на основе анализа их триботехнических показателей // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2016. № 5. С. 81—87.
6. **Анализ** контактного взаимодействия в червячных передачах в связи с разработкой модели их нелинейных колебаний / С.А. Поляков и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. № 11. С. 510—518.
7. **Кулешова Е.М., Поляков С.А.** Оценка ресурса червячных передач с учетом изменения интенсивности изнашивания и скорости роста коэффициента динамичности при использовании пленкообразующих добавок // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 10. С. 460—465.
8. **Кулешова Е.М.** Определение зависимости интенсивности изнашивания от нагрузки по результатам триботехнических испытаний при использовании пленкообразующих смазочных материалов // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. № 3. С. 116—121.





А.М. Мигранов, М.Ш. Мигранов, д-р техн. наук, Р.Г. Нигматуллин, д-р техн. наук
(Уфимский государственный авиационный технический университет (УГАТУ)),
В.Р. Нигматуллин, И.Р. Нигматуллин, канд-ты техн. наук
(Уфимский государственный нефтяной технический университет (УГНТУ))
E-mail: migmars@mail.ru

Диагностирование узлов трения по анализу состояния смазочных материалов

Разработана и внедрена цифровая система мониторинга техники, которая включает в себя динамическую фиксацию количества продуктов износа и температуры масла оригинальными современными регистрирующими устройствами с последующей технологией их обработки и использования. Система также включает в себя методы поиска необходимой информации в больших массивах данных с аналогичной техники контролируемой цифровой системой мониторинга. Преимуществами систем мониторинга являются возможность прогнозирования надежности работы техники, снижение производственных рисков и существенное сокращение неэффективных затрат.

A digital equipment monitoring system has been developed and implemented, which includes dynamic recording of the number of wear products and oil temperature with original modern recording devices, followed by the technology of their processing and use. The system also includes methods for finding the necessary information in large data sets useful and necessary in theoretical and practical terms with a similar technique controlled by a digital monitoring system. The advantages of monitoring system are the ability to predict the reliability of the equipment; reduce production risks and significantly reduce inefficient costs.

Ключевые слова: цифровая система мониторинга, смазочные материалы, качество, работоспособность, дефекты, мониторинг, техника.

Keywords: digital monitoring system, lubricants, quality, performance, defects, monitoring, equipment.

В условиях падения нефтяных котировок и роста курса валют в промышленном сегменте отмечается сокращение доходности предприятий и стоит задача оптимизации затрат на обслуживание оборудования и транспорта, что наряду с задачами правительства РФ по импортозамещению определяет высокий платежеспособный спрос на инновационные, эффективные, отечественные системы диагностики для поддержания работоспособности транспорта и техники. Значительную долю в структуре затрат предприятий транспорта и промышленности, в том числе топливно-энергетического комплекса (ТЭК), занимают расходы на техническое обслуживание, диагностику и ремонт динамического оборудования [5]. При этом используемые для диагностики оборудования системы, как правило, выявляют неисправность двигателей и оборудования на

этапе, когда требуется замена их рабочих деталей либо двигателей и оборудования в целом, что определяет высокие затраты предприятий на поддержание основных фондов. Ущерб от простоя всех видов транспорта и производства вследствие внезапного отказа двигателей и оборудования может в десятки раз превышать стоимость ремонта. Использование цифровой системы мониторинга (ЦСМ) позволит сократить затраты на техобслуживание транспорта и оборудования, избежать поломок и незапланированных простоев.

По результатам анализа компанией SHELL эксплуатации техники в 65 строительных компаниях в разных регионах России отмечено, что отечественный бизнес несет убытки:

34 % предприятий объявили, что непредвиденные перебои в эксплуатации техники за три года привели к потерям свыше 6 млн руб.;



25 % респондентов оценили расходы в сумму, которая превышает 15 млн руб;

более половины опрошенных (53 %) полагают, что грамотная эксплуатационная политика в сфере горюче-смазочных материалов (ГСМ) способна обеспечить сокращение расходов не менее чем на 5 %;

5 % компаний полагают, что благодаря правильному подбору смазочных материалов экономия могла бы превысить 25 %.

Многолетний опыт компании SHELL показывает, что при эффективном использовании ГСМ двигатели не требуют капитального ремонта и замены даже при наработке более 35 тыс. моточасов и пробеге автоматического транспортного средства (АТС) более 1,2 млн км [2].

Поломка АТС часто происходит из-за использования некачественных ГСМ, включая технические и смазывающе-охлаждающие жидкости, на которые узлы трения и детали АТС реагируют едва заметными сигналами, как правило, не привлекающими внимания среднестатистического станочника или водителя [3, 6].

В настоящее время немало научных исследований направлено на повышение работоспособности смазочных материалов, работающих в тяжелонагруженных узлах трения техники [7, 8]. Необходимо создание системы, позволяющей на ранней стадии выявить неполадки в узлах трения техники и предотвратить выход их из строя. В то же время статистика поломок техники по причине использования некачественных ГСМ мало меняется в лучшую сторону. Сегодня широко распространены три подхода к техническому обслуживанию техники:

— ремонт и замена агрегатов АТС по факту выхода из строя деталей, узлов трения — не требуются затраты на диагностику и профилактику, но значительны капитальные затраты;

— регулярное проведение технического обслуживания и профилактических работ АТС — вероятность внезапной поломки снижается, но затраты на техническое обслуживание и профилактические работы повышаются;

— использование качественных ГСМ, включая технические и смазывающе-охлаждающие жидкости, выявление и устранение дефектов АТС на ранней стадии по результатам компьютерной диагностики и анализа работающих в АТС горюче-смазочных материалов — снижаются затраты на техническое обслуживание,

расходные материалы (фильтр, масло и т.д.), запасные части и ремонт.

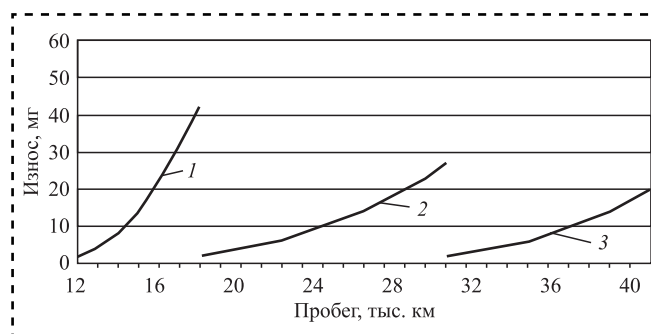
В ООО "Химмотолог" (г. Уфа) разработана инновационная цифровая система мониторинга техники. Ее отличительные особенности:

- низкая стоимость;
- высокая точность;
- универсальность;
- малые затраты времени на анализ;
- простота использования;
- дешевые расходные материалы;
- компактность и мобильность;
- энергоэффективность.

Система основывается на определении износа в узлах трения техники с помощью беспроводной связи Bluetooth, которая в режиме он-лайн передает данные по температуре и износу на сотовый телефон или компьютер [4]. На рисунке показаны графики износа узлов трения в двигателе автомобиля "ГАЗель" при использовании моторного масла SAE10W40 с низким ресурсом, а также оригинальных моторных масел того же класса разных производителей.

На графике видно резкое увеличение износа до 42 мг при пробеге автомобиля всего 6 тыс. км по причине низкого содержания в моторном масле SAE10W40 противоизносной присадки (в 1,7 раз меньше, чем в оригинальных моторных маслах).

По разработанной методике, нагревая частицы, собранные датчиком, и используя увеличительное стекло, можно распознать тип износа, принадлежность частиц износа к определенной группе деталей агрегата автомобиля и выявить причины повышенного износа: некачественные смазочные материалы и ухудшение качества масел из-за попадания в него пыли, охлаждающей жидкости, топлива и сажи и др. Научная новизна заключается в инновационном



Влияние качества масла на износ ДВС:

1 — некачественное масло; 2, 3 — оригинальное масло

подходе к эксплуатации и техническому обслуживанию техники путем выявления с помощью ЦСМ на ранней стадии неисправностей и причин износа узлов трения. Конструктивно датчик износа и программное обеспечение его работы не имеют аналогов в России и за рубежом (патенты РФ: № 2677490; № 2569766, патентообладатель ООО "Химмотолог"). Датчик прошел испытания на двигателях и коробках передач автомобилей "ГАЗель", "Тойота", "Форд", "Катерпиллер", компрессоров Atlas copco, АБАКО, станках с ЧПУ и др.

ЦСМ техники состоит из датчика и блока управления и предназначена для контроля состояния техники, определения концентрации частиц износа, предупреждения аварийных ситуаций. Датчик можно устанавливать в картеры ДВС, компрессоров, коробки передач, раздаточные коробки, мосты и другие узлы трения.

Содержание металлов в работающем масле зависит от износостойкости деталей, эффективности системы очистки, противоизносных, моюще-диспергирующих и других свойств масла и их изменения в процессе работы. В работающем масле частицы металлов имеют размер от единиц до сотен микрометров. Наиболее сильный износ вызывают частицы размером от 10 до 60 мкм. В табл. 1 приведены браковочные показатели износа различных агрегатов [1].

Концентрация частиц железа к концу запланированного срока службы масла не должна превышать предельно допустимое значение. Коэффициент скорости износа v определяется как отношение концентрации частиц, собранных за время работы датчика, к предельно допустимой

концентрации на момент замены масла. При этом, если

- $v \leq 1$ — износ в пределах нормы;
- $v \geq 1$ — повышенный износ.

Значение коэффициента v увеличивается с ростом скорости износа. Высокая скорость износа свидетельствует либо о плохом качестве смазочного материала, либо о неисправности деталей или систем (охлаждения, смазки, топливной и др.) техники.

Внедрение цифровой аналитической системы позволит:

- защититься от контрафактной продукции;
- существенно сократить затраты на ремонт, техническое обслуживание, покупку смазочных материалов;
- повысить надежность и увеличить ресурс работы техники (что особенно важно в связи с тенденциями по увеличению степени ее автономности);
- своевременно выявлять дефекты оборудования и воздействие негативных факторов, тем самым снизить вероятность возникновения аварийных ситуаций;
- уменьшить время аварийного простоя техники (и, соответственно, простоя производства);
- снизить попадание загрязняющих веществ в окружающую среду, уменьшить количество отходов смазочных материалов.

Проведем расчет экономического эффекта от внедрения диагностики по анализу смазочного материала (на примере автомобиля "ГАЗель"):

$$E = E_y - E_{nc}C,$$

где E_y — годовая экономия;

E_{nc} — нормативный коэффициент эффективности, $E_{nc} = 0,15$;

C — затраты.

Исходные данные:

средний пробег автомобиля за год — 50 000 км;

стоимость диагностической системы — 16 000 руб.;

стоимость замены моторного масла и фильтров — 3050 руб.;

стоимость замены трансмиссионного масла — 2100 руб.;

стоимость двигателя (с установкой) — 93 000 руб.;

стоимость текущего ремонта двигателя: 11 000 руб.;

стоимость раздаточной коробки (с установкой) — 16 000 руб.

Таблица 1

Браковочные показатели износа различных агрегатов

Тип агрегата	Концентрация железа, мг/кг	
	Норма, не более	Предельное значение
Двигатели внутреннего сгорания	30	150...300
Гидравлические системы и механизмы	10	30
Компрессоры	25	50
Редукторы и зубчатые передачи	100	250
Трансмиссии	80	200
Турбины	20	30



*Основные технико-экономические показатели
(без диагностики/с диагностикой)*

Интервал замены моторного масла, км	10 000/15 000
Интервал замены трансмиссионного масла, км	40 000/60 000
Средний пробег двигателя, км	200 000/300 000
Средняя частота текущего ремонта двигателя, км	50 000/150 000
Средний пробег раздаточной коробки, км	150 000/200 000
Среднегодовые затраты на замену моторного масла, руб.	15 250/10 167
Среднегодовые затраты на замену трансмиссионного масла, руб.	2625/1750
Среднегодовые затраты на замену двигателя, руб.	23 250/15 500
Среднегодовые затраты на текущий ремонт двигателя, руб.	8250/1833
Среднегодовые затраты на замену раздаточной коробки, руб.	5333/4100
Общие среднегодовые затраты, руб.	54 708/33 350

Годовая экономия при среднегодовом пробеге 50 000 км:

$$E_y = 54\,708 - 33\,350 = 21\,358 \text{ руб.}$$

Условно установка диагностической системы окупится после пробега:

$$S = (50\,000/21\,358) \cdot 16\,000 = 37\,457 \text{ км.}$$

Годовой экономический эффект от установки диагностической системы и внедрения диагностики по анализу масла:

$$E = 21\,358 - 0,15 \cdot 16\,000 = 18\,958 \text{ руб.}$$

За весь период эксплуатации автомобиля установка диагностической системы позволит сэкономить более 200 000 руб., продлить срок службы, уменьшить (или полностью исключить) издержки, связанные с простоем автомобиля.

В результате внедрения инновационной системы диагностики компрессора Atlas Copco по анализу работающего в нем масла, позволившей контролировать его работоспособность, время работы масла увеличилось в 1,5 раза по сравнению с регламентированными сроками, рекомендованными заводом-изготовителем компрессора. Кроме того:

- стоимость вспомогательных материалов снизилась на 31 717 руб.;

- стоимость расходов на содержание и эксплуатацию оборудования снизилась на 699 331 руб.;

- стоимость затрат на обслуживание снизилась на 83 755 руб.

Потенциальными и целевыми сегментами потребителей создаваемого продукта являются в первую очередь: крупные потребители (автопарки, промышленные предприятия и др.) и частные потребители (автовладельцы и небольшие предприятия, где используют технику с маслonaполненными агрегатами).

Наиболее частые причины заклинивания двигателей автомобилей — попадание в масло антифриза, воды, топлива, пыли и других примесей, использование некачественного масла и нарушение температурного режима эксплуатации. Все эти факторы не приводят к немедленной поломке двигателя, автомобиль может проехать сотни и тысячи километров до внезапной остановки. Штатные датчики не имеют возможности выявить такие ситуации, а диагностика работающего масла, позволяющая установить наличие данных факторов, проводится очень редко. В любом из этих случаев мониторинг состояния двигателя с помощью разработанной системы позволил бы выявить влияние негативных факторов и вовремя устранить причину поломки, не доводя положение дел до капитального ремонта [9].

Низкая стоимость устройств ЦСМ делает их доступными не только для организаций — владельцев автопарков, компрессоров, станков, но и для частных автовладельцев, позволяя следить за состоянием двигателя и трансмиссии автомобиля, вовремя устранять негативно влияющие факторы, оптимизировать частоту технического обслуживания и замены масла (табл. 2).

*Расходы на содержание
и эксплуатацию оборудования
(без системы диагностики/с диагностикой), руб.*

Эксплуатация оборудования	2 492 554/1 869 415
Текущий ремонт оборудования	34 320/25 740
Износ МБП	137 244/102 933
Прочие расходы	132 205/99 904
Итого	2 797 323/2 097 992

*Схема расходов на обслуживание
(без системы диагностики/с диагностикой), руб.*

Амортизация инвентаря	31 928/23 946
Содержание инвентаря участка	271 936/203 952
Испытания, опыты	2000/1500
Охрана труда	13 200/9900
Прочие расходы	15 953/11 964
Итого	335 017/251 262

Использование ЦСМ техники позволит сократить затраты на ГСМ, на техобслуживание



Стоимость вспомогательных материалов

Перечень вспомогательных материалов	Цена за единицу, руб.*	Без системы диагностики		С системой диагностики	
		Потребление в год, шт.	Стоимость материалов, руб.	Потребление в год, шт.	Стоимость материалов, руб.
Масло техническое	400	60	24 000	45	18 000
Фильтр масляный	500	60	30 000	45	22 500
Обтирочные материалы	6	6426	38 554	4820	28 917
Мыло	10	660	6 600	495	4 950
Спецодежда	420	66	27 720	49	20 790
Итого			126 874		95 157

* Цены указаны по ведомостям предприятия "УМПО" на 10.09.2018.

автотранспорта, оборудования, количество отработанных масел и смазок, избежать его незапланированного простоя и снизить выбросы в окружающую среду и повысить ресурс и надежность техники.

Библиографический список

1. **Фитч Дж., Тройер Д.** Анализ масел / пер. под ред. Е.А. Новикова, М.В. Кирюхина. СПб.: ИПК БИОНТ, 2015. 166 с.
2. **Нигматуллин В.Р., Шолом В.Ю., Нигматуллин И.Р.** Контроль качества и диагностика в отраслях промышленности и транспорта. Уфа: Белая река, 2018. 469 с.
3. **Нигматуллин Р.Г., Нигматуллин В.Р., Нигматуллин И.Р.** Диагностика ДВС по анализу моторного масла. Уфа: Уфимский полиграфкомбинат, 2011. 295 с.
4. **Пат. 2677490 РФ, МПК G01M1/00.** Способ и устройство для контроля состояния динамического оборудования / Нигматуллин Р.Г. и др.; заявл. 14.10.2016; опубл. 17.01.2019. Бюл. № 2. 14 с.

5. **Распоряжение** Минтранса РФ от 14.03.2008 № АМ-23-р (в ред. от 20.09.2018 № ИА-159-р) "О введении в действие методических рекомендаций "Нормы расхода топлив и смазочных материалов на автомобильном транспорте".

6. **Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г.** Влияние на триботехнические характеристики пластичной смазки окисления озоном и ее модификации углеродным каркасом // Трение и износ. 2018. Т. 39. № 5.

7. **Емаев И.И., Криони Н.К., Нигматуллин Р.Г.** Влияние температуры и давления на трибологические свойства пластичных смазочных материалов, модифицированных углеродным каркасом // Вестник машиностроения. 2017. № 11. С. 37–39.

8. **Хабибуллина Г.Р. Ахметова В.Р.** Противоизносные и противозадирные свойства Н-замещенных дитиазациклоалканов в минеральных маслах // Нефтехимия. 2016. Т. 56. № 6. С. 662–665.

9. **Цифровая** аналитическая система ООО "Химмотолог" // АБС-Авто. № 12. 2017. С. 34–37.



Н.Ю. Чихачёва (Академия проблем качества, СОШ № 1, г. Покров),
А.В. Щедрин, канд. техн. наук, А.А. Бекаев (МГТУ им. Н.Э. Баумана)
E-mail: bekaev@list.ru

Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования методов комбинированного дорнования отверстий

С использованием алгоритмических процедур искусственного технологического интеллекта и фундаментального направления "трибология на основе самоорганизации" синтезирован перспективный метод дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей в условиях инновационного применения современных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского. Разработана математическая модель для анализа сил дорнования полый цилиндрической заготовки с регулярным микрорельефом поверхности отверстия.

Using of algorithmic procedures artificial intelligence technology and a fundamental direction "tribology based on self-organization" a promising method for burnishing hole tool with regular microgeometry of the acting surfaces has been synthesized in terms of innovative use of modern lubricants implementing a scientific discovery The effect of wear-free friction of Garkunov—Kragelsky. A mathematical model has been developed to analyze forces burnishing hollow cylindrical workpiece regular microrelief of the surface of the hole.

Ключевые слова: дорнование отверстий, регулярный микрорельеф, металлоплакирующая смазка, эффект безызносности при трении.

Keywords: burnishing holes, regular microrelief, metal-coating grease, effect of wear-free friction.

Использование инструмента с регулярной микрогеометрией воздействующих поверхностей и различных технологий применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского, позволяют существенно системно усовершенствовать методы дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых и труднообрабатываемых материалов [1—4].

За счет образования в очаге деформации защитной (сервовитной) пленки существенно уменьшается негативная адгезионная составляющая коэффициента трения скольжения, а сила обработки уменьшается до 39 % [1—6].

Как показывает системный структурно-параметрический анализ методов дорнования отверстий, их дальнейшее совершенствование возможно путем регуляризации поверхности отверстия обрабатываемых заготовок, по аналогии с методами охватывающего поверхностного пластического деформирования (волочение, редуцирование) [7—10].

Для оценки данного перспективного направления провели экспериментальные исследования образцов-заготовок втулок из латуни марки ЛС 59-1 (115 НВ) с наружным диаметром 39 мм и высотой 40 мм. Предварительная обработка отверстий — растачивание с параметром шероховатости иррегулярного микрорельефа (ИМР) поверхности $Ra = 0,24...0,92$ мкм. Характерная продольная профилограмма ИМР поверхности отверстия образцов-заготовок после растачивания представлена на рис. 1, а.

В качестве обрабатывающего инструмента использовали дорн из быстрорежущей стали марки P5M6 диаметром 20,2 мм с углами рабочего и обратного конусов 5° и шириной калибрующей ленточки 7 мм. Воздействующую поверхность дорна упрочняли однозаходным винтовым регулярным микрорельефом (РМР) с радиусом канавок 1,5 мм, шагом 0,5 мм и первоначальной глубиной на участке калибрующей ленточки 8 мкм [5, 6]. Номинальную абсолютную деформацию отверстия образцов-заготовок на

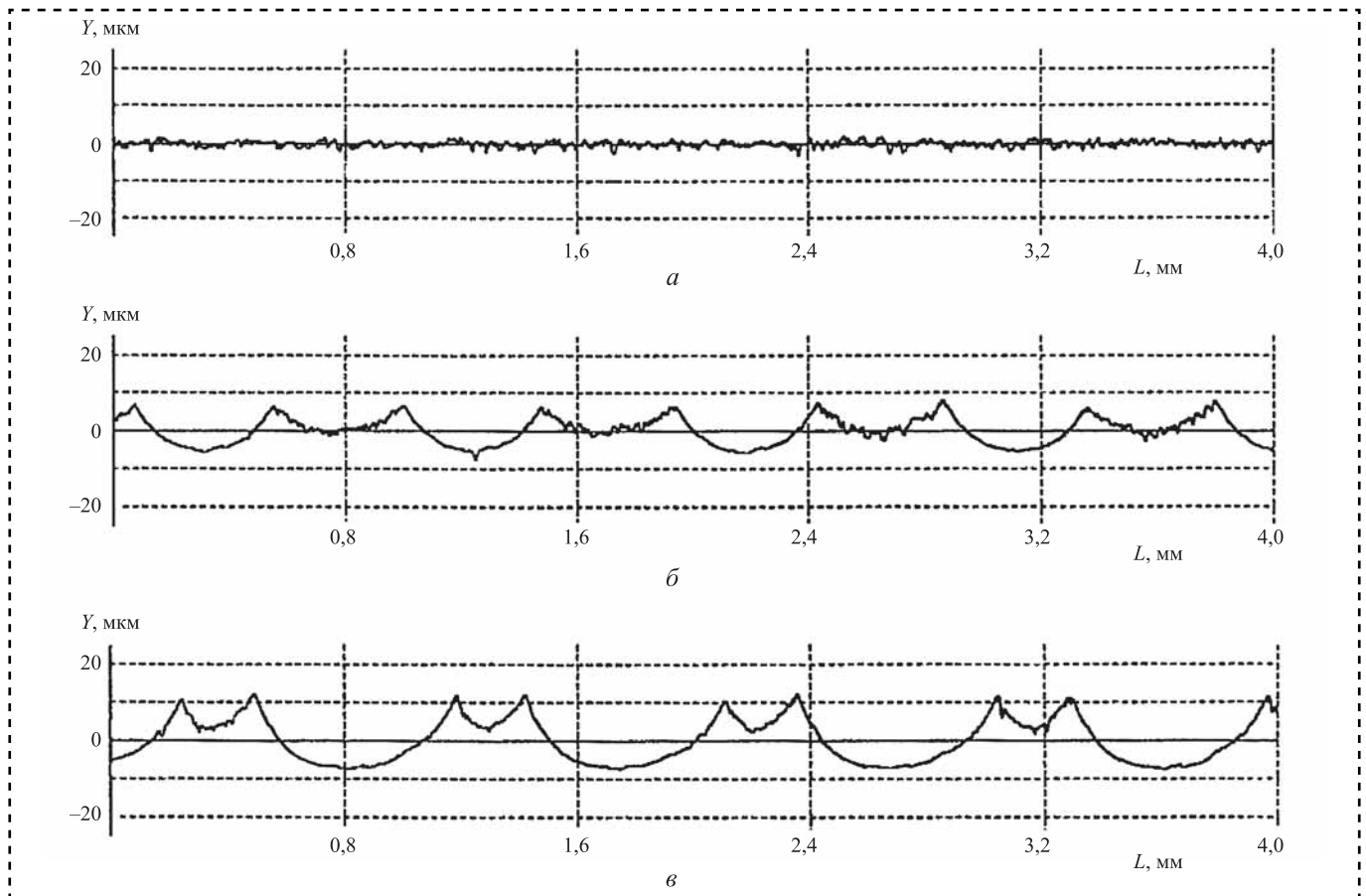


Рис. 1. Продольные профилограммы поверхности отверстия образцов-заготовок:

а — ИМР; *б* — РМР, $\Gamma_k = 10$ мкм; *в* — РМР, $\Gamma_k = 20$ мкм; Y — отклонение профиля; L — длина участка измерения

диаметр i_H варьировали в диапазоне 0,1...0,3 мм. Скорость дорнования 0,05 м/мин. Технологическая смазка: минеральное масло марки И-40 и его смесь (10 % об.) с многофункциональной металлоплакирующей присадкой "Валена" [2–4], реализующей эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского.

РМР на поверхности отверстий образцов-заготовок выполняли в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм с шагом 1 мм, глубиной канавки $\Gamma_k = 10$ мкм (рис. 1, *б*) и 20 мкм (рис. 1, *в*).

На рис. 2 представлены графические зависимости удельной силы дорнования от абсо-

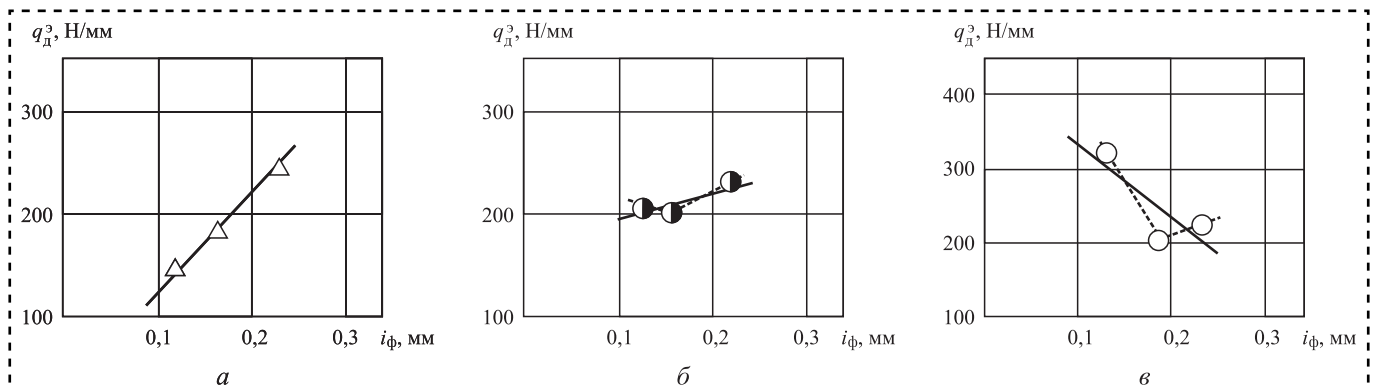


Рис. 2. Зависимости удельной силы дорнования q_d от абсолютной фактической деформации i_f отверстия образцов-заготовок, характера и параметров микрогеометрии его поверхности и вида применяемой смазки:

а — ИМР, смазка И-40; *б* — РМР, смазка И-40 + 10 % "Валены", $\Gamma_k = 10$ мкм; *в* — РМР, смазка И-40 + 10 % "Валены", $\Gamma_k = 20$ мкм



лутной фактической деформации отверстия образцов-заготовок, характера и параметров микрогеометрии его поверхности, а также от вида применяемой смазки. РМР поверхности отверстия образцов-заготовок в комплексе с металлоплакирующей смазкой обеспечивает минимум удельной силы в узком диапазоне $i_\phi = 0,16...0,19$ мм. Такой эффект объясняется большой маслоемкостью РМР по сравнению ИМР (см. рис. 1), а также развитой дислокационной структурой поверхности отверстия с РМР, ускоряющей химические реакции с компонентами металлоплакирующей смазки.

Другая причина — различие в формировании параметров очага деформации при дорновании отверстий образцов-заготовок с ИМР и РМР на поверхности [9, 10]. При наличии ИМР поверхности отверстия на рабочем конусе инструмента возникает положительная волна внеконтактной деформации (рис. 3, а). При наличии РМР поверхности отверстия высота волны внеконтактной деформации меньше из-за отсутствия сплошности деформируемого слоя, так как часть материала волны идет на заполнение каждой канавки РМР. Заполнение канавки РМР на промежуточной стадии представлено на рис. 3, б, а заполнение канавок РМР на начальной и конечной стадиях трансформации деформируемого слоя — на рис. 3, в, г. Меньшая по высоте волна внеконтактной деформации формируется из материала деформируемого слоя, расположенного между первичными канавками РМР (см. рис. 1, б, в) в области "наплывов" на их краях, образующих вторичные канавки с развитой дислокационной структурой (рис. 3, з) [9, 10].

Аналитически графические зависимости удельной силы дорнования (см. рис. 2) могут быть представлены в виде:

$$\begin{cases} q_d^3(\Gamma_k = 0) = 22,16 + 974,19i_\phi; \\ q_d^3(\Gamma_k = 10 \text{ мкм}) = 166,317 + 275,42i_\phi; \\ q_d^3(\Gamma_k = 20 \text{ мкм}) = 429,89 - 967,07i_\phi. \end{cases} \quad (1)$$

Сравнение аналитических зависимостей (1) показывает, что наилучшими трибологическими характеристиками обладает метод дорнования с применением металлоплакирующей смазки и глубиной канавок РМР отверстия образцов-заготовок $\Gamma_k = 10$ мкм, так как в этом случае имеет место минимальный коэффи-

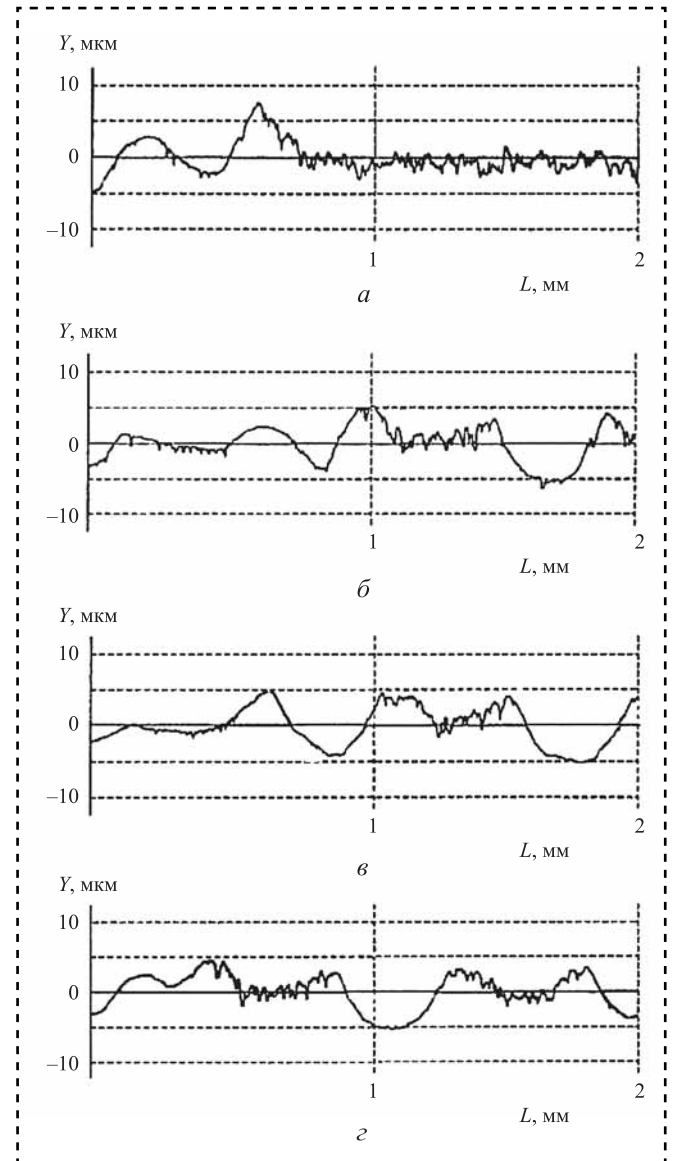


Рис. 3. Продольная профилограмма очага деформации при дорновании отверстия образца-заготовки:

а — с ИМР поверхности ($i_\phi = 0,114$ мм, смазка И-40); б — с РМР поверхности ($\Gamma_k = 10$ мкм, $i_\phi = 0,17$ мм, смазка И-40 + 10 % "Валены"); в — начальная стадия заполнения канавки РМР поверхности; г — конечная стадия заполнения канавки РМР поверхности

циент регрессии при величине фактической абсолютной деформации i_ϕ (см. рис. 2, б).

Отрицательный коэффициент регрессии при i_ϕ в зависимости (см. рис. 2, в) объясняется высокой твердостью поверхностного слоя отверстия образцов-заготовок в результате деформационного выполнения РМР с глубиной канавок $\Gamma_k = 20$ мкм.

Однако при $i_\phi > 0,19$ мм процесс фрикционного взаимодействия улучшается по сравнению с зависимостью на рис. 2, а вследствие повы-

шенной "маслоемкости" РМР с глубиной канавок $\Gamma_k = 20$ мкм и интенсификации "эффекта Ребиндера". Такой вывод вытекает из частных аналитических зависимостей (рис. 2, в) в виде:

$$\begin{cases} q_d^3(\Gamma_k = 20 \text{ мкм}, i_\phi = 0,1359 - 0,1891 \text{ мм}) = \\ = 606,84 - 2133,6i_\phi; \\ q_d^3(\Gamma_k = 20 \text{ мкм}, i_\phi = 0,1891 - 0,2375 \text{ мм}) = \\ = 117,148 + 455,99i_\phi. \end{cases} \quad (2)$$

На рис. 4, а представлена общая зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности получаемых отверстий образцов-деталей [2—4]. Ее анализ показывает существенную деформацию исходных выступов

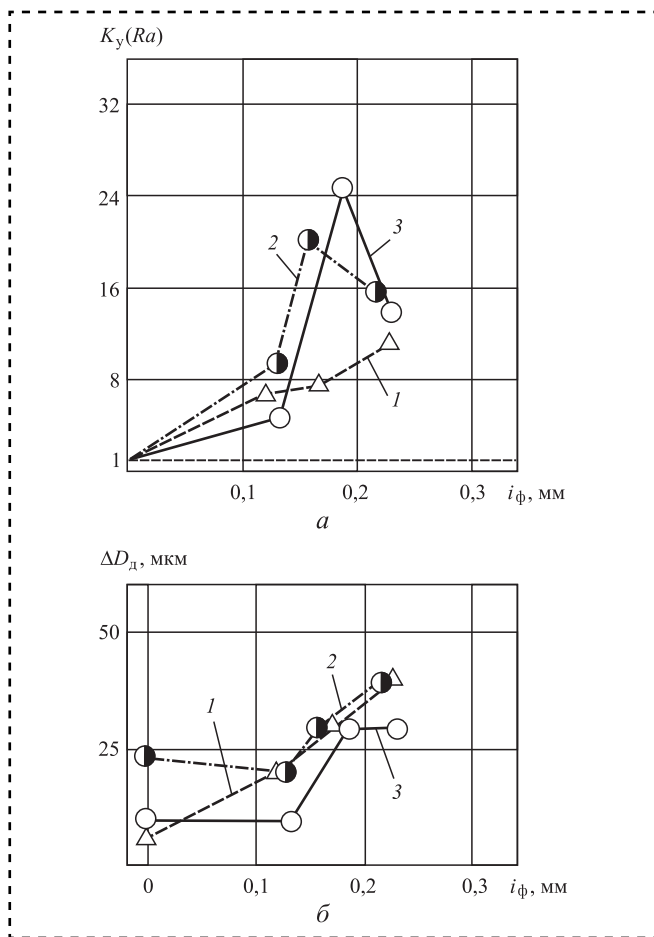


Рис. 4. Общая зависимость коэффициента уточнения по параметру шероховатости поверхности отверстий образцов-деталей $K_y(Ra)$ (а) и поля рассеяния диаметра отверстия образцов-деталей ΔD_d от абсолютной фактической деформации, вида применяемой смазки, характера и параметров микрогеометрии поверхности образцов-заготовок: 1 — ИМР, смазка И-40; 2 — РМР, $\Gamma_k = 10$ мкм, смазка И-40 + 10 % "Валены"; 3 — РМР, $\Gamma_k = 20$ мкм, смазка И-40 + 10 % "Валены"

РМР поверхности отверстий образцов-заготовок (кривые 2, 3) за счет интенсификации "эффекта Ребиндера" вследствие наличия больших объемов металлоплакирующей смазки, содержащей поверхностно-активные вещества [9, 10].

Анализ общей зависимости поля рассеяния диаметра отверстия получаемых образцов-деталей показывает, что предварительное выполнение РМР на поверхности отверстия образцов-заготовок, а также металлоплакирующая смазка обеспечивают более высокую размерно-геометрическую точность (рис. 4, б). Причиной такого эффекта является образование жесткого каркаса из винтовых канавок РМР, препятствующих деформационным искажениям отверстия при дорновании [10].

На основании схемы, представленной на рис. 5, сформирована теоретическая модель для

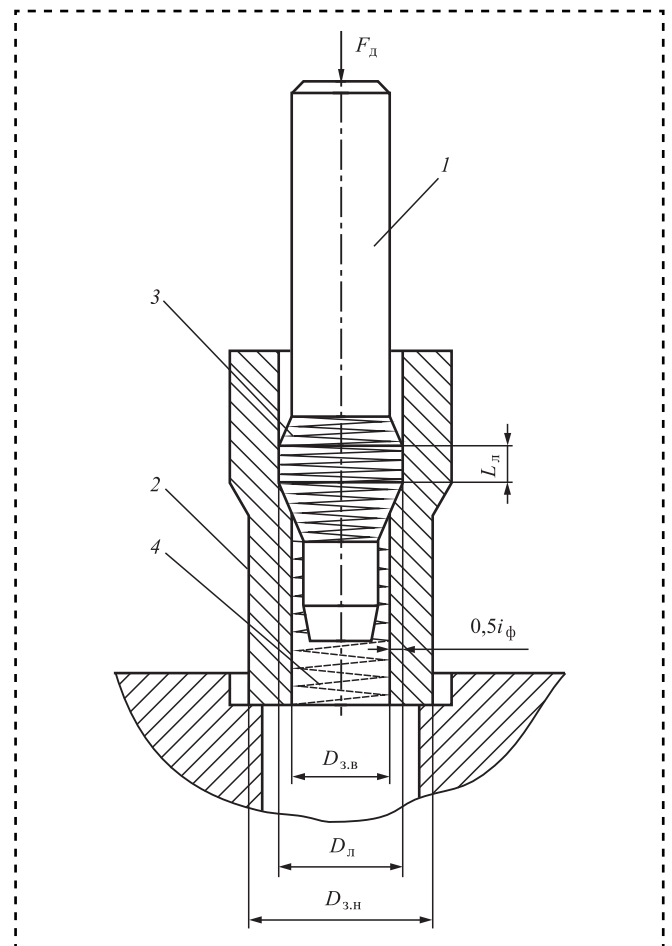


Рис. 5. Схема дорнования отверстия полой цилиндрической заготовки:

1 — дорн; 2 — полая цилиндрическая заготовка; 3 — регулярный микрорельеф поверхности деформирующего элемента дорна; 4 — регулярный микрорельеф поверхности отверстия полой цилиндрической заготовки



анализа и прогнозирования сил дорнования отверстий с геометрически модифицированным слоем (см. рис. 1, б, в) в полых цилиндрических заготовках инструментом с регулярной микрогеометрией в условиях применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского [1, 11]:

$$\left. \begin{aligned}
 & q_{\text{д}}^{\text{T}} = 1,155 \bar{\sigma}_s \left(1 + \frac{f}{\sin \alpha} \right) \times \\
 & \times \ln \left(\frac{0,5D_{3.Н} - (0,5D_{3.В} \pm \Delta R_3 - h_{\text{с.п}})}{0,5D_{3.Н} - (0,5D_{\text{л}} + h_{\text{с.п}})} \right) + \\
 & \left. + \frac{\sin \alpha}{1 + \cos \alpha} + \frac{L_{\text{л}} f (0,5D_{\text{л}} + h_{\text{с.п}})}{\left((0,5D_{3.Н})^2 - (0,5D_{\text{л}} + h_{\text{с.п}})^2 \right)} \right) \times \quad (3) \\
 & \times \frac{(0,5D_{3.Н})^2 - (0,5D_{3.В} \pm \Delta R_3 - h_{\text{с.п}})^2}{(D_{\text{л}} + 2h_{\text{с.п}})}; \\
 & F_{\text{д}}^{\text{T}} = \pi q_{\text{д}}^{\text{T}} (D_{\text{л}} + 2h_{\text{с.п}}),
 \end{aligned}
 \right\}$$

где $q_{\text{д}}^{\text{T}}$ — теоретическая удельная (погонная) сила деформирования, Н/мм;

$F_{\text{д}}^{\text{T}}$ — теоретическая суммарная сила деформирования, Н;

$D_{3.Н}$ — наружный диаметр полый цилиндрической заготовки детали, мм;

$D_{\text{л}}$ — диаметр деформирующего элемента дорна по калибрующей ленточке, мм;

$h_{\text{с.п}}$ — толщина сервовитной пленки, мм;

$D_{3.В}$ — внутренний диаметр отверстия полый цилиндрической заготовки, мм;

$\pm \Delta R_3$ — параметр очага деформации в виде знака и высоты волны внеконтактной деформации, возникающей на рабочем конусе деформирующего элемента, мм;

α — угол рабочего конуса деформирующего элемента, °;

$\bar{\sigma}_s$ — среднее по очагу деформации напряжение текучести обрабатываемого материала, МПа;

$L_{\text{л}}$ — ширина калибрующей ленточки деформирующего элемента, мм;

f — коэффициент трения скольжения.

Коэффициент трения скольжения определяли по упрощенной формуле И.В. Крагельского [5, 6]:

$$f = f_{\text{а}} + f_{\text{д}} = \left(\frac{\tau_0}{\text{HB}_3} + \beta \right) + \left(0,4 \sqrt{\frac{(H_{3\text{max}} + h_{\text{с.п}}) \varepsilon_3}{R_{\text{п}}}} \right), \quad (4)$$

где $f_{\text{а}}$, $f_{\text{д}}$ — адгезионная и деформационная составляющие коэффициента трения скольжения;

τ_0 — прочность адгезионной связи при отсутствии нормального контактного давления, МПа;

β — пьезокоэффициент влияния нормального контактного давления на прочность адгезионной связи;

HB_3 — исходная твердость материала заготовки детали, МПа;

ε_3 — относительная деформация максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстия полый цилиндрической заготовки детали;

$H_{3\text{max}}$ — высота максимального микровыступа шероховатой поверхности отверстия полый цилиндрической заготовки детали, мкм;

$R_{\text{п}}$ — приведенный радиус кривизны при вершине единичных микровыступов шероховатых поверхностей отверстия полый цилиндрической заготовки детали и деформирующего элемента, мкм:

$$R_{\text{п}} = \frac{4}{\frac{1}{R_{3X}} - \frac{1}{R_{3Y}} + \frac{1}{R_{иX}} + \frac{1}{R_{иY}}}, \quad (5)$$

где R_{3X} , R_{3Y} , $R_{иX}$, $R_{иY}$ — соответственно продольный и поперечный радиусы кривизны при вершине единичных микровыступов шероховатых поверхностей отверстия полый цилиндрической заготовки детали и деформирующего элемента, мкм.

В качестве объектов проверки достоверности теоретической модели (3) примем зависимость удельной силы (см. рис. 2, б, в).

Провели испытания по методике ГОСТ 25.503—97 и получили кривые упрочнения латуни марки ЛС 59-1, МПа:

при $\Gamma_{\text{к}} = 10$ мкм

$$\sigma_s = -1034,7e_i^2 + 1220,38e_i + 183,9;$$

при $\Gamma_{\text{к}} = 20$ мкм

$$\sigma_s = -1034,7e_i^2 + 1220,38e_i + 182,4,$$

Исходные данные для определения коэффициента трения скольжения

Γ_k , мкм	0			10			20		
Тип смазки	И-40			И-40 + 10 % "Валена"			И-40 + 10 % "Валена"		
i_Φ , мм	0,12	0,1692	0,2317	0,1292	0,1608	0,2225	0,1359	0,1891	0,2375
$H_{3\max}$, мкм	5,18	3,61	2,89	9,53	12,37	10,93	26,09	25,8	21,4
ε_3	0,86	0,864	0,894	0,887	0,950	0,936	0,787	0,959	0,929
τ_0 , МПа	3,165			23,759			86,69	16,735	16,735
R_p , мкм	202			987			934		
f_a	0,0027			0,02066			0,0753	0,0021	0,021
f_d	0,0594	0,0497	0,0452	0,03985	0,04622	0,04343	0,0593	0,0651	0,0583
f	0,0621	0,0524	0,0479	0,0605	0,0669	0,0641	0,1346	0,0672	0,0604

Примечание. $\beta = 0$; $h_{c.p} = 0$; при $\Gamma_k = 0$; $R_{3X} = R_{3Y} = 112$ мкм; $R_{иX} = 492$ мкм; $R_{иY} = 10\ 100$ мкм.

где e_i — накопленная деформация обработанного материала [12].

В первом варианте кривой упрочнения учтена предварительная деформационная регуляризация микрогеометрии поверхности отверстий образцов-заготовок на глубину $\Gamma_k = 10$ мкм. Во втором варианте предварительная деформационная регуляризация на глубину $\Gamma_k = 20$ мкм не учтена, так как ее влияние учитывается соотношением:

$$D_{3.в} = D_{л} - (i_\Phi + 2\Gamma_k). \quad (6)$$

Такой подход при соизмеримости параметров i_Φ и Γ_k позволит реализовать более точную методику прогнозирования сил дорнования.

Высокая достоверность математической модели (3) для зависимости, представленной на рис. 2, а, оценена в работе [11]. При этом (см. рис. 3) $\Delta R_3 > 0$:

$$D_{3.в} = D_{л} - (i_\Phi + 2\Delta R_3). \quad (7)$$

Таким образом, в соответствии с выражением (7) из-за положительной волны внеконтактной деформации в очаге деформации происходит резкое увеличение удельной силы дорнования (см. рис. 2, а).

В табл. 1 приведены значения исходных данных для определения величины коэффициента трения скольжения по выражению (4).

Графические зависимости коэффициента трения скольжения от абсолютной фактической деформации, вида применяемой смазки, характера и параметров микрогеометрии поверхности отверстий образцов-заготовок, представленные на рис. 6, хорошо совпадают с силовыми зависимостями на рис. 2.

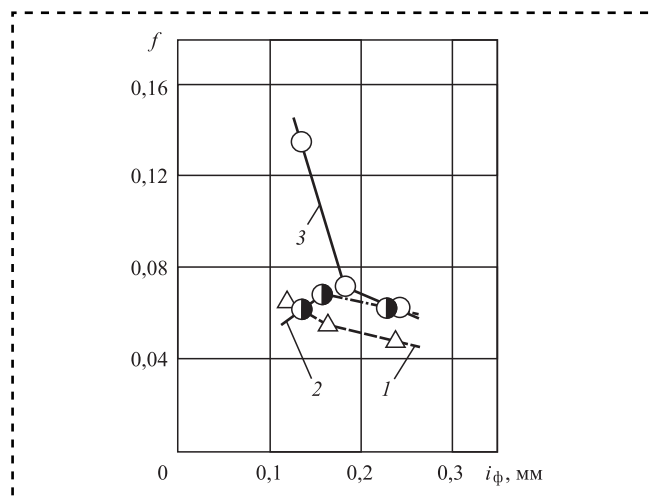


Рис. 6. Зависимости коэффициента трения скольжения от абсолютной фактической деформации, вида применяемой смазки, характера и параметров микрогеометрии поверхности отверстий образцов-заготовок:

1 — ИМР, смазка И-40; 2 — РМР, $\Gamma_k = 10$ мкм, смазка И-40 + 10 % "Валены"; 3 — РМР, $\Gamma_k = 20$ мкм, смазка И-40 + 10 % "Валены"



Таблица 2

Исходные данные для расчета и сравнения удельной силы дорнования отверстий образцов-заготовок с РМР

При $\Gamma_k = 10$ мкм ($D_{з.в} = D_l - i_\phi$)			
i_ϕ , мм	0,1292	0,1608	0,2225
D_l , мм	20,2		
L_l , мм	7		
α , °	5		
$D_{з.в}$, мм	20,0708	20,0392	19,9774
e_i	0,0079	0,0098	0,01359
$\bar{\sigma}_s$, МПа	188,69	189,92	192,09
q_d^3 , Н/мм	209,68	200,22	230,18
q_d^T , Н/мм	212,8	229,75	247,42
Δq_d , %	-1,5	-14,7	-7,5
При $\Gamma_k = 20$ мкм ($D_{з.в} = D_l - (i_\phi + 2\Gamma_k)$)			
i_ϕ , мм	0,1359	0,1891	0,2375
D_l , мм	20,2		
L_l , мм	7		
α , °	5		
$D_{з.в}$, мм	20,024	19,97	19,822
e_i	0,0107	0,014	0,01695
$\bar{\sigma}_s$, МПа	188,86	190,84	192,59
$R_{иХ}$, мкм	492		
$R_{иУ}$, мкм	10 100		
$R_{зХ}$, мкм	437		
$R_{зУ}$, мкм	10 032	10 005	9981
q_d^3 , Н/мм	316,89	203,38	225,45
q_d^T , Н/мм	304,58	248,6	255
Δq_d , %	+3,9	-22,2	-13,1
Примечание. $h_{с.п} = 1,5$ мкм; $HВ_3 = 1150$ МПа; $\Delta R_3 = 0$.			

Исходные данные и результаты расчета теоретического значения удельной силы дорнования представлены в табл. 2.

Заключение

Сравнение полученных результатов показывает, что относительная погрешность теоретических и экспериментальных значений удельной силы дорнования $\Delta q_d = \left((q_d^3 - q_d^T) / q_d^3 \right) 100$ % составляет +3,9...-22,2 %, что вполне приемлемо

для технологической практики. При этом достигается высокая точность прогнозирования сил дорнования при оптимальных параметрах РМР поверхности отверстий образцов-заготовок $\Gamma_k = 10$ мкм.

Полученные результаты расширяют информационную базу алгоритмических процедур искусственного технологического интеллекта и научного направления "трибология на основе самоорганизации" для системного синтеза перспективных методов дорнования отверстий [1, 7, 8, 13–19].

Библиографический список

1. **Трибология** на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов и др. Германия: LAMBERT. 245 с.
2. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Оптимизация рецептуры металлоплакирующих смазок для комбинированного дорнования отверстий в заготовках из нешлифуемых цветных сплавов // Вестник машиностроения. 2012. № 9. С. 76–79.
3. **Технологические** возможности метода комбинированного прошивания отверстий с противодавлением металлоплакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 9. С. 30–35.
4. **Мельников Э.Л., Щедрин А.В., Климошкин К.О.** Влияние состава металлоплакирующей смазки на характеристики комбинированного прошивания отверстий в заготовках из латуни марки ЛС59-1 // Ремонт, восстановление, модернизация. 2017. № 1. С. 27–34.
5. **Щедрин А.В., Игнаткин И.Ю., Чихачёва Н.Ю.** Исследование закономерностей изменения коэффициента трения скольжения в инновационных методах комбинированного дорнования отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 4. С. 150–154.
6. **Щедрин А.В., Бекаев А.А., Чихачёва Н.Ю.** Влияние характеристик поверхностного слоя инструмента и состава технологической смазки на коэффициент трения скольжения в методах комбинированного дорнования отверстий // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2020. Т. 25. № 7. С. 331–336.
7. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачёва Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. Т. 16. № 6. С. 20–26.
8. **Щедрин А.В., Игнаткин И.Ю., Чихачёва Н.Ю.** Системное формирование информационных баз данных характеристик методов обработки для реализации алгоритмических процедур искусственного технологического интеллекта // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 10. С. 444–451.
9. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Кострюков А.А.** Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой

заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т.13. № 4. С. 162—168.

10. **Совершенствование** охватывающего поверхностного пластического деформирования заготовок из алюминиевых сплавов / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 11. С. 518—522.

11. **Формулы** для прогнозирования силы комбинированного дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях применения металлолакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2017. Т. 18. № 11. С. 518—522.

12. **Математическая** модель для прогнозирования сил дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях противодавления металлолакирующих смазок / А.В. Щедрин и др. // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2019. Т. 20. № 2. С. 71—76.

13. **Новое** научное открытие в трибологии на основе самоорганизации / Д.Н. Гаркунов и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2019. № 6. С. 18—25.

14. **Трибологическая** концепция системного анализа-синтеза комбинированных методов деформирующей режущей обработки / А.В. Щедрин и др. // Техника машиностроения. 2001. № 4 (32). С. 53—59.

15. **Технологическо-экспериментальное** исследование и совершенствование методов дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях противодавления технологических смазок / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 11. С. 501—505.

16. **Воронцов А.Л.** Промышленное апробирование результатов исследований совмещенного процесса редуцирования-дорнования // Кузнечно-штамповочное производство, обработка металлов давлением. 2017. № 9. С. 3—10.

17. **Щедрин А.В., Алешин В.Ф., Игнаткин И.Ю., Чихачёва Н.Ю.** Исследование влияния угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики силовой динамики метода комбинированного дорнования отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 5. С. 212—216.

18. **Исследование** характеристик силовой динамики методов комбинированного дорнования отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 8. С. 360—365.

19. **Влияние** состава металлолакирующей смазки и технологии ее применения на контактные характеристики методов комбинированного дорнования отверстий / А.В. Щедрин и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2020. Т. 16. № 11. С. 504—510.



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



С.М. Гайдар, д-р техн. наук

(Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева),

М.Ю. Карелина, д-р техн. наук

(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ)),

А.М. Колокатов, А.В. Пыдрин, канд-ты техн. наук

(Российский государственный аграрный университет — МСХА имени К.А. Тимирязева)

E-mail: akolokatov@mail.ru

Влияние СОЖ на стойкость и износ токарных резцов

Рассмотрен процесс износа режущего инструмента при использовании различных типов смазочно-охлаждающих жидкостей, определена зависимость износа резца от пути резания при использовании различных технологических сред, проведен анализ результатов эксперимента и даны рекомендации по выбору смазочно-охлаждающей жидкости в процессе резания.

The process of wear of the cutting tool when using different types of cutting fluids (coolant) is considered, the dependence of the wear of the cutter on the cutting path when using different technological media is determined, the analysis of the experimental results is carried out and recommendations are given for the choice of coolant in the cutting process.

Ключевые слова: обработка металлов, режим резания, смазочно-охлаждающая жидкость, износ, стойкость резца.

Keywords: metal processing, cutting mode, cutting fluid, wear, resistance of the cutter.

На стойкость токарных резцов в процессе резания оказывают влияние различные условия обработки, механические свойства и качество обрабатываемого материала, режим резания, геометрические параметры рабочей части резца, методы охлаждения и применяемая смазочно-охлаждающая жидкость (СОЖ), материал рабочей части резца, качество доводки режущих кромок, вид обработки [1].

Задние поверхности токарного резца в процессе обработки трутся об заготовку, а передняя поверхность резца испытывает трение от сходящей по ней стружки, в результате трения изнашиваются режущие кромки резца. Для повышения стойкости токарных резцов необходимо уменьшить их износ за счет изменения условий обработки, а именно за счет применения СОЖ [2].

Применение СОЖ уменьшает трение и температуру в зоне резания, улучшает пластическую деформацию срезаемого слоя, тем самым препятствуя образованию нароста и соответственно повышая качество обработанной поверхности и стойкость резцов. Влияние СОЖ на износ резцов зависит от их свойств и состава.

Отношение величины износа резца ко времени его работы показывает интенсивность износа резца, которая зависит от свойств самого резца, геометрии его режущей части и от режима резания. Если измерить износ резца при обработке на разных скоростях резания, то можно установить, что чем больше скорость резания, тем больше износ резца [3, 10]. С увеличением толщины и ширины среза износ резцов также ускоряется, но в меньшей степени. При увеличении скорости резания поверхности резца изнашиваются быстрее [4, 8, 9].

Цель работы — исследование влияния различных типов СОЖ на стойкость и износ твердосплавных токарных резцов.

Для исследования выбрали резец токарный проходной отогнутый с пластиной из твердого сплава ВК8 с геометрическими параметрами: $\alpha = \alpha_1 = 8^\circ$; $\gamma = 8^\circ$; $\varphi = 45^\circ$; $\varphi_1 = 14^\circ$; $\lambda = 0$. В качестве материала обрабатываемой заготовки использована сталь 45, начальный диаметр заготовки 57 мм.

В качестве технологической среды выбраны водорастворимые СОЖ 10%-ной концентрации.

Образец 1: минеральная СОЖ с содержанием масла 80 %.



Образец 2: полусинтетическая СОЖ с содержанием масла 40 %.

В образцах 1 и 2 кроме минерального масла в составе присутствуют эмульгатор, ингибитор коррозии, биоцид, фунгицид и антипенная присадка.

Образец 3: синтетическая СОЖ, в которой минеральное масло отсутствует. Образец представляет собой неионогенное поверхностно-активное вещество — этаноламиды жирных кислот.

Исследования проводили на токарно-винторезном станке модели 16P25. Режим резания: глубина резания 0,5 мм; подача 0,2 мм/об; частота вращения шпинделя 590 мин⁻¹ [11]. Скорость подачи СОЖ во всех экспериментах составляла 5 л/мин.

Токарные резцы изнашиваются как по передней, так и по задней поверхности. Так как за критерий износа токарных резцов принимается допустимая величина износа h по задней поверхности резца, износ токарных резцов в исследованиях определяли только по задней поверхности [6, 7].

Замер износа токарных резцов проводили через 250 м пути резца L при обработке заготовки, который зависел от длины обточки l и диаметра заготовки D . При этом длину обточки заготовки в зависимости от пути резца определяли по формуле:

$$l = ns,$$

где n — частота вращения заготовки, необходимая для прохождения пути резца при обработке заготовки,

$$n = \frac{L1000}{\pi D};$$

D — максимальный диаметр заготовки, $D = 57$ мм;

s — продольная подача резца, мм/об.

В процессе исследований при точении заготовок их диаметр незначительно уменьшался, при этом скорость резания составила в среднем 100 м/мин. Было проведено четыре серии опытов в различных технологических средах, для каждой из которых была использована новая заготовка.

Износ задней поверхности резцов в каждой серии опытов измеряли с помощью лупы Бринелля и контролировали микроскопом Axiovert 40 MAT.

Для оценки противоизносных свойств СОЖ выбрали следующий критерий:

$$K_T = \frac{T(\Psi)}{T(\Phi)},$$

где $T(\Psi)$ и $T(\Phi)$ — стойкость резца в минутах при достижении определенной величины износа для различных технологических сред, мин.

Стойкость резца определяли по формуле:

$$T = \frac{L_h}{v},$$

где L_h — длина пути резанца при достижении износа h , м;

v — скорость резания, м/мин.

В табл. 1 представлены результаты экспериментальных исследований влияния технологической среды на износ резцов из твердого сплава ВК-8.

Таблица 1

Результаты экспериментальных исследований износа резцов при использовании различных технологических сред

Тип СОЖ	Путь резания L , м	Диаметр заготовки D , мм	Частота вращения заготовки n , мин ⁻¹	Длина обточки l , мм	Износ резца h , мм
Без СОЖ	250	57	1397	279	0,60
	500	56	2843	568	0,65
	750	54	4423	884	0,70
Образец 1	250	57	1397	279	0,20
	500	56	2843	568	0,45
	750	54	4423	884	0,65
Образец 2	250	57	1397	279	0,10
	500	56	2843	568	0,30
	750	54	4423	884	0,50
Образец 3	250	57	1397	279	0,05
	500	56	2843	568	0,17
	750	54	4423	884	0,30

Таблица 2

Зависимость износа резца от пройденного пути при использовании различных технологических сред

Тип СОЖ	Зависимость
Без СОЖ	$I = 0,0002L + 0,55$
Образец 1	$I = 0,0009L - 0,017$
Образец 2	$I = 0,0008L - 0,1$
Образец 3	$I = 0,0005L - 0,077$

Для каждого образца методом наименьших квадратов (линейная регрессия) получили зависимости износа резца от пути резания (табл. 2, рис. 1) [5].

В результате износа задней поверхности испытанных резцов около самой режущей кромки образовывалась площадка с задним углом $\alpha = 0$ (рис. 2). Степень износа по задней поверхности

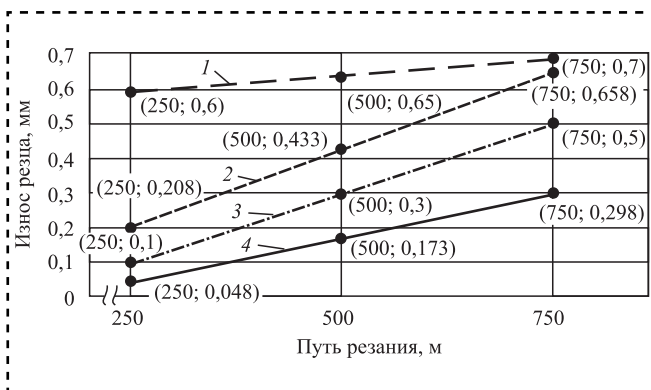


Рис. 1. Зависимость износа резца от пути резания: 1 — без СОЖ; 2 — образец 1; 3 — образец 2; 4 — образец 3

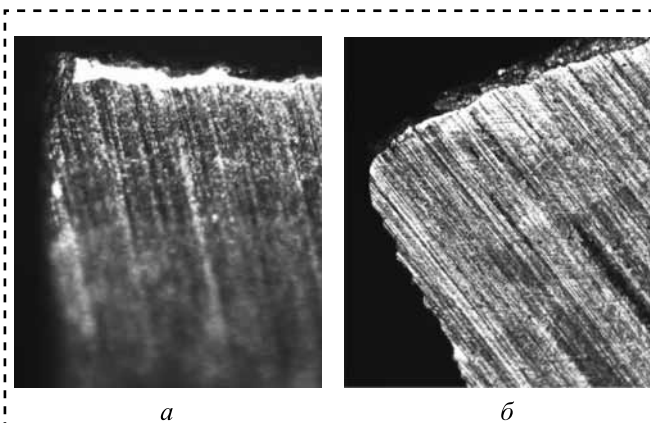


Рис. 2. Внешний вид износа резца по задней поверхности (опыт № 12): а — до испытаний; б — после испытаний

резца характеризуется шириной этой площадки износа.

На задней поверхности токарного резца наблюдается поясok износа, который делит заднюю поверхность резца на две части: с левой стороны — это изношенная поверхность, износ которой равен 0,3 мм и задний угол $\alpha = 0$, а с правой стороны — неизношенная задняя поверхность резца, задний угол которой $\alpha = 8^\circ$. На передней поверхности резца видны частички нароста.

При допустимой величине износа резцов, равной 0,35 мм, критерий оценки противозносных свойств образца 3 по отношению к образцу 1 составил $K_T = 2,06$, т.е. стойкость резцов при использовании образца 3 в два раза выше, чем стойкость резцов при использовании образца 1. Критерий оценки эксплуатационных свойств образца 3 по отношению к образцу 2 составил $K_T = 1,51$, т.е. стойкость резцов при использовании образца 3 в 1,5 раза выше, чем стойкость резцов при использовании образца 2.

Результаты экспериментов показали, что применение СОЖ значительно сокращает износ резцов. Наилучшие результаты по фактическому износу резцов показал образец 3. При этом критерий оценки эксплуатационных свойств образца 3 по отношению к образцу 2 и образцу 1 оказался наилучшим.

Выводы

1. Установлено, что применение СОЖ значительно сокращает износ токарных резцов. Состав СОЖ влияет на стойкость токарных резцов, так синтетическая СОЖ повышает стойкость в 2,06 раза по отношению к минеральной и в 1,51 раза по отношению к полусинтетической.

2. При разработке новых СОЖ необходимо вводить в состав комплекс присадок, содержащих поверхностно-активные вещества.

3. Оценка эксплуатационных свойств СОЖ прямым способом (непосредственно в процессе обработки на металлорежущих станках) позволяет осуществить выбор высокоэффективных составов, а также разработку и внедрение новых материалов при сокращении материальных и трудовых затрат.

**Библиографический список**

1. **Радзевич С.П.** Формообразование поверхностей деталей. Основы теории. К.: Растан, 2001. 592 с.
2. **Трение**, износ и смазка (трибология и триботехника) / А.В. Чичинадзе и др.; под общ. ред. А.В. Чичинадзе. М.: Машиностроение, 2003. 576 с.
3. **Barry J., Вурне G.** Cutting tool wear in the machining of hardened steels — part 1: alumina/tic cutting tool wear // *Wear*. No. 2. P. 139—151.
4. **Технологическая** наследственность в машиностроительном производстве / А.М. Дальский и др.; под ред. А.М. Дальского М.: Изд-во МАИ, 2000. 364 с.
5. **Гайдар С.М.** Планирование и анализ эксперимента: учебник. М.: "Росинформагротех", 2015. 548 с.
6. **Петрушин С.И., Губайдулина Р.Х.** Определение суммарной стойкости режущих инструментов при ступенчато переменном режиме резания // *Инновационные технологии в машиностроении: сборник трудов VIII Международной научно-практической конференции*. Юрга. Томск: Изд-во ТПУ, 2017. С. 29—32.
7. **Степанов А.А., Хаймович А.И.** Исследование процесса резания в динамическом режиме // *СТИН*. 2015. № 2. С. 33—37.
8. **Рюканов Ю.П., Абрамов В.П.** Оптимизация управления процессом и режимами резания токарной обработки конструкционных материалов // *Механизация строительства*. 2015. № 11 (857). С. 40—45.
9. **Чемезов Д.А.** Износостойкость сменной многогранной пластины при точении нержавеющей стали на различных режимах резания // *Theoretical & applied science*. 2016. № 7 (39). С. 57—64.
10. **Михайлов А.Н., Ивченко Т.Г., Петраева И.А.** Многокритериальная оптимизация режимов резания при точении инструментами с покрытиями // *Известия тульского государственного университета. Технические науки*. 2016. № 8-1. С. 159—166.
11. **Воронцов А.Л.** Определение оптимальных режимов резания // *Справочник. Инженерный журнал с приложением*. 2017. № S5. С. 2—5.

ЧИТАЙТЕ В СЛЕДУЮЩЕМ НОМЕРЕ:

Иванов А.А., Кретинин О.В. Сборка муфт предельного момента

Водолазская Н.В. Теоретические основы выбора параметров оснастки для сборочного процесса

Дубовик Е.А. Технологичность конструкции автомобильного станда К-303

Мигранов А.М., Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р. Исследование теплофизики резания металлов режущим инструментом с покрытием

Шишкарёв М.П. Элементы теории комбинированной обратной связи в составе адаптивных фрикционных муфт

Головкин П.А. Получение прутков из сплава НММц 38-2В методом ротационнойковки

Житников Ю.З., Житников Б.Ю. Обоснование параметров пневмоцилиндра и пружины в устройстве запрессовки цилиндрических ступенчатых резиновых уплотнений в отверстия собираемых узлов

Измайлов В.В., Новоселова М.В., Барчуков Д.А. Микрогеометрия поверхности газолазерного реза инструментальной стали

Лазарев С.И., Ломакина О.В., Буланов В.Е., Хорохорина И.В. Аналитическое описание механических нагрузок на пластины и торообразные оболочки аппаратов комбинированного типа

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: sboraka@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 24.02.2021. Подписано в печать 00.04.2021. 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.