ВЕСТНИК машиностроения

ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

9

2018

ИЗДАЕТСЯ С НОЯБРЯ 1921 ГОДА

Журнал входит в перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

Журнал переводится на английский язык, переиздается и распространяется во всем мире фирмой "Аллертон Пресс" (США)

ООО «Издательство «Инновационное машиностроение»

Адрес издательства:

107076, Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(499) 269-51-98

Адрес редакции:

107076, Москва,
Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Телефон: 8-(495) 661-38-80.
E-mail: vestmash@mashin.ru; vestmash@mail.ru
www.mashin.ru

Журнал зарегистрирован 19 апреля 2002 г. за ПИ № 77-12421 в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций
Учредитель: А.И. Савкин

Индекс: **27841** ("Пресса России")
Цена свободная

Отпечатано в ООО "Канцлер",
150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49.
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз".
119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1.
Сайт: **www.aov.ru**

Главный редактор А.И. САВКИН

РЕДАКЦИОННАЯ КОЛЛЕГИЯ:

Албагачиев А.Ю., д-р техн. наук, **Алешин Н.П.,** д-р техн. наук, акад. РАН, **Братухин А.Г.,** д-р техн. наук, **Воронцов А.Л.,** д-р техн. наук, **Гусейнов А.Г.,** д-р техн. наук, **Дмитриев А.М.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН (председатель секции обработки материалов без снятия стружки), **Драгунов Ю.Г.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Древаль А.Е.,** д-р техн. наук (председатель секции технологии машиностроения), **Кутин А.А.,** д-р техн. наук, **Омельченко И.Н.,** д-р техн. и экон. наук (председатель секции организации и экономики производства), **Кузин В.В.,** д-р техн. наук, **Попов Д.Н.,** д-р техн. наук, **Попов А.В.,** д-р техн. наук, **Рыбин В.В.,** д-р техн. наук, член-корр. РАН, **Трегубов Г.П.,** д-р техн. наук, **Сычев А.П.,** канд. физ.-мат. наук, **Скугаревская Н.В.** (ответственный секретарь)

СОДЕРЖАНИЕ

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

Нижегородов А. И. — Исследование механизма подачи сыпучих материалов энерготехнологического агрегата для обжига минерального сырья 3

Гордеев Б. А., Охулков С. Н., Плехов А. С., Шохин А. Е. — Измерение частотным методом торсионного момента на ведомом валу, соединенном магнитореологической муфтой с ведущим валом 8

Короткин В. И. — Обоснование применимости упрочненных зубчатых передач Новикова в качестве выходных ступеней многоступенчатых редукторов общемашиностроительного применения 14

Баранов П. Р., Носко А. Л. — Разработка серии крановых асинхронных двигателей с дисковыми тормозными устройствами 20

Феофанов А. Н., Шутиков М. А., Пономарев К. С. — Разработка производственных исполнительных систем в условиях цифрового производства 25

Тихомиров В. А. — Энергопоглощающие устройства дорожных ограждений 30

Проблемы трибологии — трения, изнашивания и смазки

Голубков А. К., Морозов А. В., Шпенев А. Г. — Исследование трибологических свойств материалов, применяемых в направляющих и накладках узла трения многодискового авиационного тормозного механизма 36

ТЕХНОЛОГИЯ МАШИНОСТРОЕНИЯ

Памфилов Е. А., Пыриков П. Г., Пилюшина Г. А., Данилюк В. А. — Применение магнитоупорядоченных электролитических покрытий для повышения эксплуатационных свойств элементов гидравлических систем 40

Слепцов В. В., Савкин А. В., Кукушкин Д. Ю., Дителева А. О. — Исследование процесса осаждения нанокластеров металлов на поверхность пористых материалов методом электрофореза 45

Овчинников Н. П., Смыслов А. Г. — Повышение ресурса секционных насосов главного водоотлива подземного кимберлитового рудника "Удачный" 48

Сычев А. П., Сычева М. А. — Влияние алюминиевого металлизационного покрытия на качество сварных соединений 53

Мухамедов А. А., Бердиев Д. М. — Повышение абразивной износостойкости сталей термической обработкой с предварительной подготовкой структуры . . 57

Сорокина С. А., Романов А. Д. — Исследование причин уменьшения долговечности пресс-формы термопластавтомата 59

Намазов С. Н., Джафарова А. А., Намазова З. А. — Структура и свойства оксидированных порошковых материалов на основе железа 63

Болотов А. Н., Горлов И. В., Рахутин М. Г. — Новый способ восстановления изношенных поверхностей методом пластического деформирования 67

Шайдурова Г. И., Васильев И. Л., Шевяков Я. С., Гатина Е. Р. — Особенности технологии биодеградации эпоксидных и фенолформальдегидных смол 72

Сурков В. А. — Исследование механических свойств порошка меди ПМС-1 при воздействии плазмы высокоточного индукционного разряда пониженного давления 75

Проблемы теории и практики резания материалов

Кудряшов Е. А., Смирнов И. М., Степанов Ю. С., Хижняк Н. А. — Улучшение работоспособности резцов при точении сложных профилей 77

Албагачиев А. Ю., Преображенская Е. В., Краско А. С., Страмцова Е. С. — Определение температурных изменений в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании жаропрочных сплавов 82

ЭКОНОМИКА И ОРГАНИЗАЦИЯ ПРОИЗВОДСТВА

Шушкин М. А., Ежов М. В. — Анализ рынка технологического оборудования IV поколения для производителей автокомпонентов в России 85

CONTENTS

DESIGN, CALCULATION, TESTS AND RELIABILITY OF MACHINES

Nizhegorodov A. I. — Research of the mechanism for feeding loose materials of an energy technological unit for roasting mineral raw materials

Gordeev B. A., Okhulkov S. N., Plekhov A. S., Shokhin A. E. — Measurement by the frequency method of the torsional moment on the driven shaft connected by a magnetorheological clutch to the drive shaft

Korotkin V. I. — Justification of the applicability of the strengthened Novikov's gears as output stages of multistage reducers of general machine-building application

Baranov P. R., Nosko A. L. — Development of a series of crane asynchronous motors with disc braking devices

Feofanov A. N., Shutikov M. A., Ponomarev K. S. — Development of production executive systems in digital production conditions

Tikhomirov V. A. — Energy-absorbing devices of road fencing

Problems oftribology — friction, wearing away and lubrication

Golubkov A. K., Morozov A. V., Shpenev A. G. — Research of tribological properties of materials used in guides and linings of a friction unit of a multi-disk aircraft braking mechanism

MANUFACTURING ENGINEERING

Pamfilov E. A., Pyrikov P. G., Pilyushina G. A., Danilyuk V. A. — Application of magnetically ordered electrolytic coatings for improvement the operational properties of elements of hydraulic systems

Sleptsov V. V., Savkin A. V., Kukushkin D. Yu., Diteleva A. O. — Research of the deposition process of metal nanoclusters on the surface of porous materials by the electrophoresis method

Ovchinnikov N. P., Smyslov A. G. — Increase of the resource of sectional pumps of the main dewatering of the "Udachny" underground kimberlite mine

Sychev A. P., Sycheva M. A. — Influence of aluminum metallization coating on the quality of welded joints

Mukhamedov A. A., Berdiev D. M. — Increase of abrasive wear resistance of steels by thermal processing with preliminary preparation of structure

Sorokina S. A., Romanov A. D. — Research of the reasons of durability decrease of a mold of a thermoplastic automatic machine

Namazov S. N., Dzhafarova A. A., Namazova Z. A. — Structure and properties of oxidized powder materials based on iron

Bolotov A. N., Gorlov I. V., Rakhutin M. G. — A new method for restoring worn surfaces by the method of plastic deformation

Shaydurova G. I., Vasil'ev I. L., Shevyakov Ya. S., Gatina E. R. — Features of biodegradation technology of epoxy and phenol-formaldehyde resins

Surkov V. A. — Research of mechanical properties of ПМС-1 copper powder under the effect of plasma of a high-precision induction discharge of reduced pressure

Problems of theory and practice of materials cutting

Kudryashov E. A., Smirnov I. M., Stepanov Yu. S., Khizhnyak N. A. — Improvement of cutting tools performance in turning of complex profiles

Albagachiev A. Yu., Preobrazhenskaya E. V., Krasko A. S., Stramtsova E. S. — Determination of temperature changes in cutting zone at high-speed milling of heat-resistant alloys

ECONOMY AND ORGANIZATION OF PRODUCTION

Shushkin M. A., Ezhov M. V. — Analysis of technological equipment market of IVth generation for manufacturers of auto components in Russia

Технический редактор *Т. А. Шацкая*
Корректор *Е. В. Комиссарова*

Сдано в набор 25.07.2018. Подписано в печать 19.08.2018.
Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,78.

Перепечатка материалов из журнала "Вестник машиностроения" возможна при обязательном письменном согласовании с редакцией журнала; ссылка на журнал при перепечатке обязательна.
За содержание рекламных материалов ответственность несет рекламодатель.

© ООО «Издательство "Инновационное машиностроение"», "Вестник машиностроения", 2018

КОНСТРУИРОВАНИЕ, РАСЧЕТ, ИСПЫТАНИЯ И НАДЕЖНОСТЬ МАШИН

УДК [(67.05 + 66.041): 62-868].001.57

А. И. НИЖЕГОРОДОВ, д-р техн. наук
(Иркутский национальный исследовательский технический университет),
e-mail: nastromo_irkutsk@mail.ru

Исследование механизма подачи сыпучих материалов энерготехнологического агрегата для обжига минерального сырья[1]

Проведены экспериментальные исследования опытного образца однофазного модуля энерготехнологического агрегата, используемого в качестве физической модели. Проверена возможность управления скоростью движения материала и временем его термообработки и подтвержден прогноз о снижении удельной энергоемкости обжига вермикулита до 86 мДж/м^3.

Ключевые слова: энерготехнологический агрегат, обжиг, минеральное сырье, время термообработки, чувствительность колебательной системы.

Experimental studies of a prototype of a single-phase module of an energy-technological unit used as a physical model have been carried out. The possibility of controlling the speed of material movement and the time of its heat treatment is verified and the forecast for reducing the specific energy consumption of burning vermiculite to 86 mJ/m^3 is confirmed.

Keywords: energotechnological unit, burning, mineral raw materials, heat treatment time, sensitivity of the oscillatory system.

В работе [1] было показано, что концепция электрических модульно-спусковых печей для обжига вермикулитовых концентратов и конгломератов, термообработки и термоактивации различных других минералов природного или техногенного происхождения исчерпала возможности дальнейшего совершенствования. Такие агрегаты способны обеспечить энергоемкость процесса обжига вермикулита 150÷160 мДж/м^3, но это предел.

Ограничение заложено в их принципе действия: поток сыпучей среды по наклонным модулям движется равноускоренно. Поэтому в верхней части модулей среднее расстояние между зернами сыпучей среды равно их диаметру, а зазор равен нулю. На выходе из модуля это расстояние многократно возрастает по сравнению с диаметрами зерен, тепловое поле здесь испускает тепловое излучение по большей части в пространство обжига, нагревая воздух, основания, стенки и термокрышки модулей. Кроме того, совершенно отсутствует возможность управления движением потока сыпучего материала.

Но другая форма организации движения этого потока в тепловом поле меняет дело. При уклоне в 15÷20° движение потока сыпучего материала может происходить только под действием вибрации [2], но при этом материал движется без постоянного нарастания скорости и расстояния между зернами не меняются. Сыпучая среда движется плотным потоком и большая часть приходящейся на нее тепловой мощности усваивается материалом в зависимости от его поглощательно-отражательной способности.

Другим фактором организации однонаправленного транспортного эффекта являются несимметричные колебания, которые могут быть реализованы с помощью нелинейных упругих элементов [3]. Кроме того, благодаря вибрации возможно управление скоростью движения сыпучей среды и, следовательно, временем термообработки.

Цель данной работы состоит в исследовании управляемого механизма подачи сыпучих материалов в энерготехнологический агрегат для обжига минерального сырья.

Концепция такого агрегата уже была представлена в работе [1], но здесь рассматривается упрощенная конструкция: система натяжения проволочных нагревательных элементов устранена. Вместо нее предложено панельное устройство с консольным закреплением ленточных нагревателей, не требующих натяжения.

На рис. 1 приведена схема опытного образца однофазного модуля энерготехнологического агрегата с вибрационной подовой платформой, предназначенного для использования в качестве физической модели, проведения экспериментов и отработки конструкции механизма подачи сыпу-

[1] Поддержано грантом ФГБУ "Фонд содействия развитию малых форм предприятий в научно-технической сфере". Договор № 1243 ГС 1/21693.

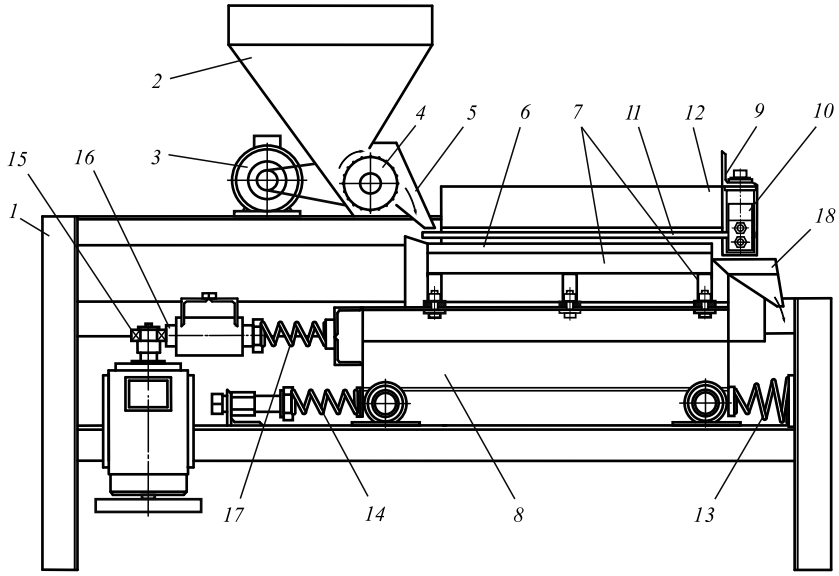
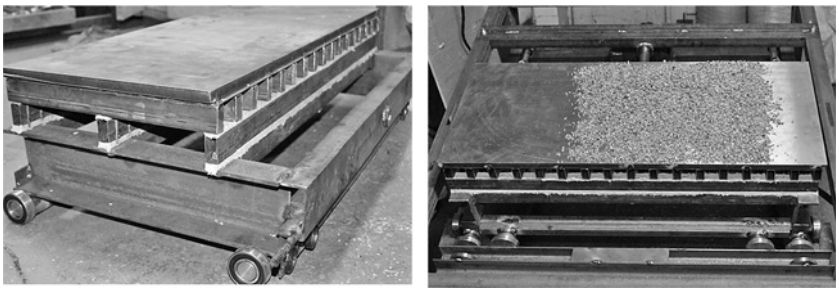


Рис. 1. Схема опытного образца однофазного модуля с вибрационной подовой платформой



а) *б*)

Рис. 2. Подовая платформа (*а*) и опытный образец модуля без нагревательной системы (*б*)

чих материалов на термообработку. Комплектный агрегат состоит из трех таких модулей и будет представлен в следующей статье.

Модуль содержит раму *1*, бункер *2*, привод *3* и дозирующий барабан *4*, подающий сырьевой материал по лотку *5*. Сплошная плита *6* из жаростойкой стали закреплена на пустотелых балках *7* коробчатого сечения, пространство внутри которых и между ними заполнено термоизолирующим материалом. Соединение элементов подовой платформы *8* выполнено посредством стержней и точечной сварки, чтобы исключить коробление балок *7* при нагреве плиты *6*. Между балками и рамой платформы проложены плотные термоизолирующие прокладки (рис. 2,*а*), устраняющие так называемые мостики холода и уменьшающие кондуктивные потери теплоты по металлическим элементам.

Платформа *8* установлена на роликах в направляющих рамы *1*. На панели *9* закреплены головки *10*, удерживающие полосовые нагреватели *11* над поверхностью плиты *6* с возможностью регулирования зазора между ними в пределах 2÷8 мм. Платформа закрыта съемной термоизолирующей крышкой *12*, образующей щелевидное пространство обжига, в котором сыпучий материал находится в течение 2,5÷5 с.

Кроме вибрационной подовой платформы к механизму подачи относится барабанный дозатор, конструкция и расчет которого рассмотрены в работе [4].

На рис. 1 модуль показан в горизонтальном положении, но его рабочее положение — наклонное, под углом 6÷19° к горизонтали.

Для усиления транспортного эффекта термообрабатываемого материала платформа зажата между пружинами *13* и *14*. Пружины "малого хода" *13* выполнены короткими (37 мм) и коническими, причем так, что между витками есть зазоры и при полном сжатии витки пружины полностью входят в опорный виток. Поэтому чем короче пружина, тем сильнее ее нелинейность будет сказываться на несимметричности колебаний подовой платформы.

При вращении эксцентрикового вала с подшипником *15*, плунжер *16* через пружину *17* возбуждает колебания платформы *8*, приводящие к одностороннему движению сырья. Платформа, перекатываясь на роликах, совершает низкочастотные колебания (f = 5÷10 Гц) вблизи резонансного пика ее амплитудно-частотной характеристики (АЧХ), поэтому регулировать скорость и время движения однослойного массива сыпучей среды можно изменением частоты возбуждения. Для сглаживания пульсации крутящего момента привода и пульсации угловой скорости на валу электродвигателя вместо вентилятора установлен маховик.

По лотку *18* готовый продукт ссыпается в бункер (на рис. 1 не показан).

В процессе исследований были проведены эксперименты:

по снятию АЧХ вибрационной подовой платформы;

по определению средних скорости и времени движения сыпучего материала на различных режимах работы механизма подачи.

При выполнении опытов бункер дозатора и панель с нагревательными элементами были сняты, а рама платформы прикреплена к бетонному основанию.

Вынужденные колебания подовой платформы задавались эксцентриком, закрепленным на валу приводного двигателя 5АИ 80 В6У2 мощностью 1,1 кВт с номинальной частотой вращения

вала n = 930 мин$^{-1}$. Для управления частотой колебаний использовали частотный преобразователь ACS 150, пригодный для приводов с мощностью электродвигателя до 4,0 кВт.

При измерениях использовали виброизмерительную аппаратуру National instruments Compact DAQ-9174 с модулем ввода С-серии NI 9234 и вибропреобразователь АР-85-100. Были получены среднеквадратичные (действующие) значения виброперемещения (мм), виброскорости (м/с) и виброускорения (м/с^2). Но для построения АЧХ использовали только пиковые значения виброперемещения и частоту возбуждения.

Исследовали область АЧХ вблизи резонанса, чтобы оценить степень нелинейности колебательной системы — подовой платформы модуля при "больших колебаниях". На рис. 3 показана АЧХ платформы, установленной на конических пружинах "малого хода".

Поведение колебательной системы не вписывается в классическую картину, свойственную линейным и нелинейным системам. Здесь при увеличении частоты возбуждения от 6,25 до 11,3 Гц платформа движется, как нелинейная система с так называемой мягкой характеристикой [2, 3]. Характерным признаком этого является скачкообразный переход с предрезонансного режима малых колебаний (на рис. 3 точка *а*) в зарезонансный (точка *б*).

Однако при убывании частоты возбуждения система проходит через резонанс плавно, без резких изменений режима колебаний, хотя ниспадающая ветвь АЧХ располагается почти отвесно, что свойственно линейным системам. По виду полученной АЧХ можно судить об относительно слабой нелинейности.

Гармонический анализ колебаний платформы в резонансе — сигнала виброперемещения $x = f(t)$ выявил наличие второй гармоники с частотой $2f$ и амплитудой

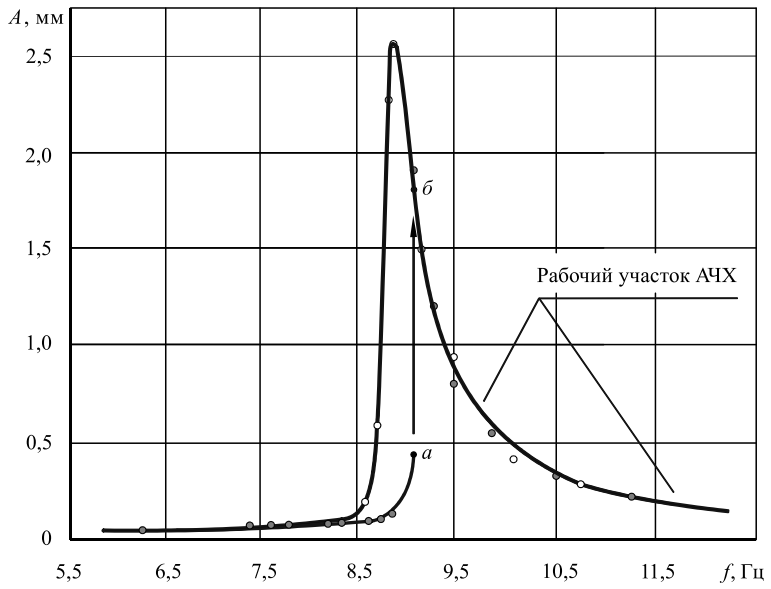


Рис. 3. Амплитудно-частотная характеристика вибрационной подовой платформы модуля

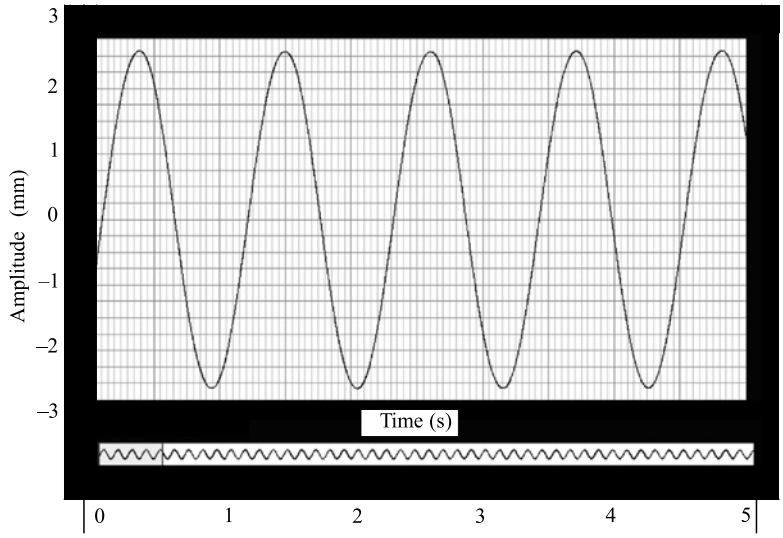


Рис. 4. Развертка сигнала виброперемещения платформы в резонансе

приблизительно в 12 раз меньшей, чем амплитуда основной гармоники, соответствующей частоте возбуждения.

Запись временнóй развертки колебаний платформы в резонансе, приведенная на рис. 4, показывает, что заметных нелинейных искажений в сигнале нет, колебания почти гармонические. Это означает, что транспортный эффект, обусловленный ожидаемой несимметрией колебаний платформы, не будет существенным. При проверке этого эффекта в горизонтальном положении была отмечена лишь тенденция к однонаправленному движению вспученного вермикулита. Поэтому главным фактором, определяющим поступательное однонаправленное движение вермикулита по платформе, все-таки остается угол наклона платформы, и опыты со вспученным материалом, проведенные при углах наклона 6, 9 и 19°, подтвердили это. Транспортный эффект при угле наклона 19° проявился в резонансном режиме весьма выражено, но из-за высокой добротности (узкий и вытянутый пик АЧХ)

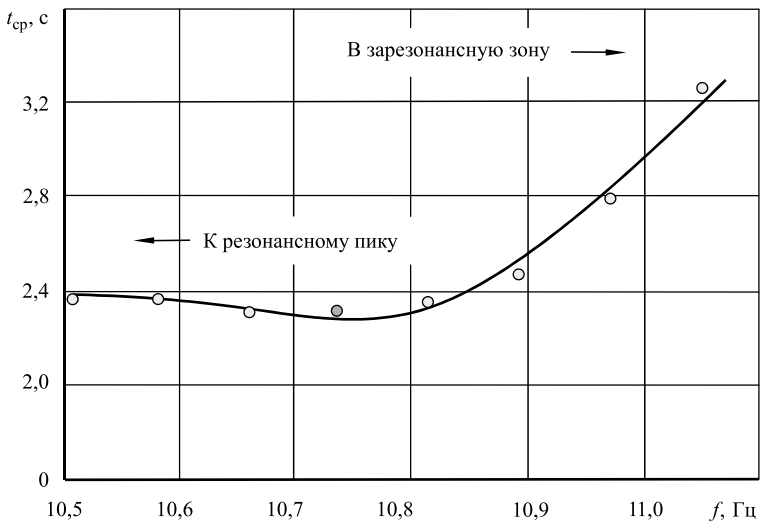


Рис. 5. Изменение среднего времени $t_{ср}$ движения метки в однослойном массиве в зарезонансной области

колебательная система чрезвычайно чувствительна к возможным флуктуациям собственной частоты и частоты возбуждения.

Чтобы обеспечить стабильность колебаний платформы и процесса вибрационной подачи вермикулитового концентрата или других термообрабатываемых минералов, нужно сохранять параметры вибрации в зоне, обозначенной на рис. 3 как рабочий участок АЧХ: здесь скорость перемещения материала поддается регулированию, а амплитуда колебаний не столь чувствительна к изменению частотного режима.

Второй задачей экспериментов было определение средней скорости $v_{ср}$ и среднего времени $t_{ср}$ движения сыпучего материала на подовой платформе (см. рис. 2, *б*). Из анализа АЧХ видно, что наиболее подходящей является зарезонансная зона.

Для опытов применяли холодный вспученный вермикулит с размерами зерен 2÷8 мм. Плита подовой платформы также была холодной (23÷24 °С).

Режим колебаний варьировался, но их частота изменялась вблизи резонансного пика колебательной системы. При проведении измерений рама опытного образца печи была выставлена под углом 19° к горизонтали.

На поверхность подовой платформы насыпали вспученный вермикулит, разравнивали его до получения однослойного массива, равномерно распределенного по поверхности без существенных зазоров между зернами. Для отслеживания движения на поверхность платформы укладывали метку в виде бумажного окатыша. При этом фиксировали ее положение относительно верхней кромки платформы. При длине подовой платформы $l_{пл}$ = 0,4 м участок пути, который проходила метка, составлял от 0,30 до 0,39 м.

Время фиксировали секундомером, а среднюю скорость в каждом опыте на каждом соответствующем участке $l_п$ пути рассчитывали по формуле

$$v = l_п/t.$$

Частоту $f_п$ вращения поля в обмотках статора приводного двигателя фиксировали по цифровому индикатору частотного преобразователя и пересчитывали на частоту f колебаний подовой платформы по формуле

$$f = (930/3000)f_п,$$

где 3000 — частота электрической сети, об/мин (50 Гц).

Так как в каждом опыте участки пути несколько отличались, то среднее время движения зерен вермикулита по всей длине платформы рассчитывали по формуле

$$t_{ср} = l_п/v_{ср},$$

а среднюю скорость по трем опытам определяли как среднеарифметическое по трем значениям.

Для примера в таблице приведены результаты опыта при частоте возбуждения подовой платформы 10,52 Гц.

Скорость v и время t движения вермикулита при f = 10,52 Гц

$l_п$, м	t, с	v, м/с
0,35	2,02	0,173
0,30	1,88	0,160
0,35	2,00	0,175

Примечание. Средняя скорость движения $v_{ср}$ = 0,168 м/с, среднее время $t_{ср}$ = 2,38 с.

На рис. 5 показана зависимость среднего по нескольким опытам времени $t_{ср}$ движения меток по поверхности подовой платформы от частоты f колебаний в узкой зарезонансной области.

При изменении частоты f колебаний от 10,5 до 10,85 Гц время движения вермикулитового потока изменяется мало. Небольшое снижение амплитуды A в этом диапазоне компенсируется незначительным увеличением угловой частоты ω от 65,5 до 67,7 рад/с. Поэтому виброускорение, определяемое при условии гармонических колебаний по формуле [5]

$$a = \omega A^2, \text{ м/с}^2,$$

также изменяется незначительно.

Однако дальнейшее повышение частоты колебаний приводит к увеличению виброускорения и времени движения вермикулитовых зерен по платформе и при частоте $f \approx 10{,}97$ Гц время движения становится равным 2,8 с, что приемлемо для процесса обжига вермикулитовых концентратов [4].

Недостатком является то, что время движения сыпучего материала и, следовательно, время его

термообработки слишком чувствительны к изменению частоты возбуждения, задаваемой частотным регулятором. Так, увеличение частоты от 10,88 до 10,97 Гц (всего на 0,83 %) приводит к увеличению времени обжига от 2,38 до 2,8 с, т. е. на 17,6 %. При такой чувствительности даже незначительные изменения тех или иных параметров колебательной системы (например, из-за нагрева) могут приводить к заметному изменению режима колебаний и, следовательно, режима обжига.

Чтобы максимально снизить чувствительность механизма подачи сырья нового энерготехнологического агрегата к возможным изменениям параметров вибрационной подовой платформы или частоты возбуждения, в качестве привода следует применять максимально оборотистый электродвигатель (например, на 3000 об/мин по синхронной частоте вращения поля в обмотках статора). Тогда в том же частотном диапазоне от 10,88 до 10,97 Гц (652,8÷658,2 об/мин) потребуется передача с передаточным отношением 4,59÷4,56. При этом для изменения частоты возбуждения системы на 0,1 Гц, потребуется частотное регулирование с бóльшим шагом, равным передаточному отношению, например с шагом 0,46 Гц. Флуктуация частоты источника электрической энергии или собственной частоты системы будет сказываться менее заметно.

Другим способом снижения чувствительности является усиление нелинейности колебательной системы. Благодаря более пологому резонансному пику, свойственному несимметричным колебательным системам [3], амплитуда в зарезонанснй зоне АЧХ будет изменяться менее заметно при одном и том же изменении частоты возбуждения.

Но опыт применения специальных конических пружин "малого хода" показал их низкую эффективность. Поэтому нужен другой способ создания нелинейной упругой характеристики колебательной системы, например применением таких элементов, как "гидравлическая пружина" [6]: при их деформации на 2÷6 мм жесткость системы будет изменяться на 20÷25 %.

При размерах в плане плиты подовой платформы 0,94 × 0,4 м и времени $t = 2{,}8$ с движения вермикулита со средним размером зерен 4 мм, определим, используя алгоритм расчета производительности, приведенный в работе [1], производительность одного модуля, м^3/ч:

$$П = \frac{V_\Sigma \cdot 3600}{t(1-k)} = \frac{0{,}000787 \cdot 3600}{2{,}8(1-0{,}365)} = 1{,}6,$$

где V_Σ — суммарный объем зерен вермикулита на подовой платформе, м^3; k — коэффициент пористости вспученного массива.

Продолжительность термообработки вермикулита 2,8÷3 с при температуре ≈700 °С гарантирует качественное вспучивание. Это подтверждено опытом производственной эксплуатации электрических модульно-спусковых печей [7].

Производительность для трехмодульной печи, каждый модуль которой подключен к одной фазе электросети, составит 4,8 м^3/ч. По сравнению с производительностью трехмодульной электрической модульно-спусковой печи, равной 1,75 м^3/ч [1], при одинаковой электрической мощности печей производительность и удельная энергоемкость обжига вермикулита в трехмодульной печи возрастают в 2,74 раза, а абсолютное значение энергоемкости обжига в новых энерготехнологических агрегатах может снизиться до 90 мДж/м^3.

Эксперименты проводились на холодной поверхности, так как провести их на раскаленной до 500÷600 °С металлической плите не представлялось возможным. Вполне вероятно, что высокая температура изменит силу трения и конечные результаты будут несколько иными.

Проведенные эксперименты дали обнадеживающие результаты:

1. Подтверждено положение о том, что посредством вибрационной подачи достигается движение сыпучей среды сплошным однослойным массивом, а именно этот фактор позволяет значительно уменьшить потери тепловой энергии и резко повысить производительность энерготехнологического агрегата.

2. Получены параметры — угол наклона, частота и амплитуда колебаний вибрационной подовой платформы, при которых достигается требуемое время термообработки материала.

3. Показано, что управление скоростью и временем движения сыпучего материала по платформе обеспечивается простым управлением частотой возбуждения.

4. Расчет производительности по экспериментальным данным показал, что прогноз существенного повышения энергоэффективности и производительности без дополнительного увеличения потребляемой мощности, сделанный в работе [1], небезоснователен.

В дополнение к приведенным выше сведениям обращаем внимание читателей на то, что в конце августа 2016 г. был проведен первый эксперимент по определению удельной энергоемкости обжига вермикулита в печи новой концепции. В опытах использовался вермикулитовый концентрат Кокшаровского месторождения Приморского края. На опытном образце однофазного модуля энерготехнологического агрегата с вибрационной подовой платформой, показанном на рис. 1, была достигнута удельная энергоемкость 81,6 мДж/м^3.

Но это тема другого исследования, которому будет посвящена следующая статья автора.

УДК 621.752.3

Б. А. ГОРДЕЕВ, д-р техн. наук, С. Н. ОХУЛКОВ, канд. физ.-мат. наук, А. С. ПЛЕХОВ, канд. техн. наук, А. Е. ШОХИН, канд. техн. наук (Нижегородский ГТУ им. Р. Е. Алексеева), oxulkovs@mail.ru

Измерение частотным методом торсионного момента на ведомом валу, соединенном магнитореологической муфтой с ведущим валом[1]

Рассмотрены новые подходы к измерению вязкости магнитореологических жидкостей, заполняющих соединительные муфты двух или более валов, под действием магнитного поля, основанные на измерении торсионных моментов. Доказана целесообразность замены дроссельных каналов в магнитореологических трансформаторах одним дроссельным каналом между коаксиальными цилиндрами.

Ключевые слова: магнитореологическая жидкость, вязкость, муфта, торсионные моменты, частотно-модулированные сигналы, частота биений, магнитореологический трансформатор.

New approaches to the measurement of the viscosity of magnetorheological liquids filling couplings of two or more shafts under the action of a magnetic field based on the measurement of torsional moments are considered. The expediency of replacement of throttling channels in magnetorheological transformers by one throttle channel between coaxial cylinders is proved.

Keywords: magnetorheological fluid, viscosity, coupling, torsional moments, frequency-modulated signals, beat frequency, magnetorheological transformer.

Магнитореологические жидкости (МРЖ) представляют собой суспензии микрочастиц магнитных материалов в органических маслах. Под действием магнитного поля частицы, распределенные в объеме дисперсной среды, образуют структуры, ориентированные вдоль силовых линий поля. При этом магнитное взаимодействие между частицами приводит к значительному изменению реологических свойств, поскольку образованные структуры препятствуют свободному перемещению суспензии и вызывают увеличение вязкости жидкости более чем в 10^5 раз, что зависит от материала частиц дисперсной фазы, дисперсионной среды, размеров частиц и их объемной концентрации, а также от других параметров [1, 2].

Основные параметры, характеризующие МРЖ: напряжения сдвига слоев; деформация слоев; изменение градиента скорости сдвигаемых слоев в зависимости от приложенного ортогонального внешнего магнитного поля, объемной концентрации частиц дисперсной фазы и температуры, коэффициента сдвиговой вязкости жидкости, определяемого приложенным внешним магнитным полем.

Главным показателем всех традиционных рабочих жидкостей является коэффициент кинематической вязкости [3, 4]:

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} = \frac{\mathrm{d}P_\tau}{\mathrm{d}S\frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}z}\rho},$$

где μ — динамический коэффициент вязкости; $\mathrm{d}P_\tau$ — элементарная величина силы вязкого трения, Н; $\mathrm{d}S$ — площадь соприкосновения слоев в частице жидкости, мм^2; $\mathrm{d}u/\mathrm{d}z$ — модуль градиента скорости; $\mathrm{d}u$ — разница скоростей на сдвиговых деформациях; $\mathrm{d}z$ — расстояние между слоями МРЖ.

[1] Работа выполнена при финансовой поддержке Российским научным фондом (проект № 15-19-10026).

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 3)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Нижегородов А. И.** Новая концепция энерготехнологических агрегатов для обжига минерального сырья с вибрационной подачей материала // Вестник машиностроения. 2016. № 12. С. 21—25.

2. **Вибрации** в технике: Справочник. В 6 т. Т. 4. Вибрационные процессы и машины / Под. ред. Э. Э. Лавендела. М.: Машиностроение, 1981. 509 с.

3. **Вибрации** в технике: Справочник. В 6 т. Т. 2. Колебания нелинейных механических систем / Под. ред. И. И. Блехмана. М.: Машиностроение, 1979. 351 с.

4. **Брянских Т. Б.** Трехмодульная электрическая печь для обжига вермикулита и других сыпучих материалов с вибрационной подачей сырья // Вестник ИрГТУ. 2016. № 5. С. 10—18.

5. **Измерение** параметров вибрации и удара / В. С. Шкаликов, В. С. Пеллинец, Е. Г. Исакович и др. М.: Изд-во стандартов, 1980. 280 с.

6. **Нижегородов А. И.** Анализ и синтез универсальной вибрационной машины с гидрообъемным возбуждением колебаний. Часть первая // Вестник машиностроения. 2017. № 11. С. 31—36.

7. **Нижегородов А. И.** Опыт эксплуатации электрических модульно-спусковых печей различных модификаций для обжига вермикулитовых концентратов // Огнеупоры и техническая керамика. 2014. № 9. С. 27—34.

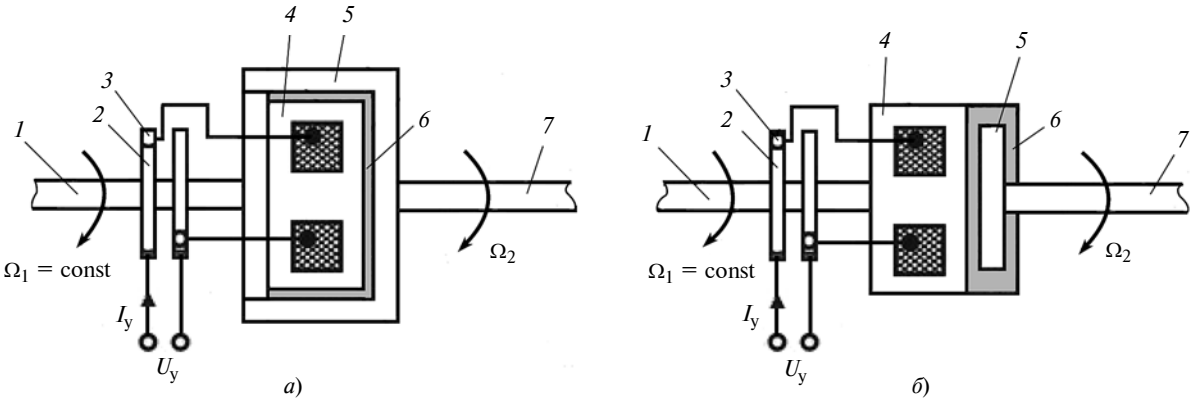


Рис. 1. Функциональные схемы цилиндрической (*а*) и дисковой с регулируемым рабочим зазором (*б*) магнитореологических муфт вязкого трения:

1 — ведущий вал; *2* — контактные кольца; *3* — токоподводящие щетки; *4* — коаксиальный внутренний цилиндр с индуктором; *5* — коаксиальный внешний цилиндр; *6* — рабочая МРЖ; *7* — ведомый вал; $I_у$, $U_у$ — сила и напряжение тока управления

Для любой реологической среды сдвиговая вязкость определяется отношением касательного напряжения к градиенту скорости, направленному к действующему магнитному полю. Если считать МРЖ линейно-вязкопластичной средой, то ее поведение описывается моделью Шведова—Бингама, учитывающей совместное влияние вязкости и пластичности на касательные напряжения, и сдвиговая вязкость определится как [1, 2, 5]:

$$\eta = \frac{\tau_y}{\dot{\gamma}} + \eta_p,$$

где τ_y — предельное напряжение сдвига (предел текучести), Па; $\dot{\gamma}$ — сдвиговая скорость, м/с; η_p — показатель консистенции МРЖ, являющийся аналогом коэффициента пластической вязкости, т. е. вязкости без магнитного поля.

На описанном выше эффекте основан принцип действия магнитореологических трансформаторов (МРТ) гидроопор [6—9]. Регулируя внешним магнитным полем вязкоупругопластичные свойства МРЖ, используемой в качестве рабочей среды, можно управлять определяемыми сдвиговыми напряжениями τ, перепадом давлений в гидравлической системе МРТ или упругими деформациями структурированной суспензии, в результате чего осуществляется демпфирование колебаний.

В связи с этим возникает задача исследования и применения МРЖ в системах управления движением исполнительных механизмов, в частности в станкостроении, для управления магнитореологическими соединительными муфтами [10—12]. Измерение торсионных моментов валов, соединенных муфтами, и динамической вязкости исследуемой МРЖ основано на зависимости вращающего момента $M_{вр}$, приложенного к внутреннему воспринимающему цилиндру ведомого вала цилиндрической муфты, от характеристик МРЖ, величины магнитного поля, площади и длины рабочего зазора [10—12].

Этот момент определяется соотношением

$$M_{вр} = Fr, \qquad (1)$$

где F — сила, приложенная к внутреннему воспринимающему цилиндру муфты; r — радиус этого цилиндра [13—15].

Сила, приложенная к воспринимающему цилиндру ведомого вала муфты с угловой скоростью $\Omega_2 = \Omega_{вр}$, определяется законом Ньютона:

$$F = \eta\Omega_{вр}S/l, \qquad (2)$$

где $\Omega_{вр} = 2\pi F_{вр}$ и S — угловая скорость и рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра ведомого вала муфты соответственно; l — зазор между внешним и внутренним воспринимающими цилиндрами; η — вязкость МРЖ [13, 14].

Подставляя соотношение (2) в формулу (1), получим:

$$M_{вр} = \eta\Omega_{вр}Sr/l. \qquad (3)$$

Если угловая скорость внутреннего воспринимающего цилиндра муфты $\Omega_{вр} = \Omega_2$ и размеры его постоянны, то вращающий момент $M_{вр}$ ведомого вала пропорционален вязкости η. Поэтому, зная вращающий момент на воспринимающем цилиндре муфты, можно определить прочность сцепления цилиндрической муфты с ведомым валом [13].

Функциональные схемы соединения ведущего и ведомого валов магнитореологическими муфтами приведены на рис. 1 [16].

При включении внешнего магнитного поля индуктора электромагнитная муфта с МРЖ сцепляется с ведомым валом. При этом возникает угловое рассогласование ведущего и ведомого валов исполнительного механизма, измерение которого является важнейшей задачей при диагностике работы всех соединительных муфт [10, 16].

Для измерения углового рассогласования необходимо фиксировать угол $\Delta\varphi$ проскальзывания в муфте, соединяющей ведущий и ведомый валы.

Данный угол относительного поворота ведущего и ведомого валов муфты определяется через угловые скорости ведущего (Ω_1) и ведомого (Ω_2) валов из выражения для динамического момента $M_{\text{д.м}} = M_{\text{вр}}$ цилиндрической муфты в режиме скольжения [10, 16]:

$$M_{\text{д.м}} = 2\pi l_{\max}\left(\tau_0 R_i^2 + \frac{\eta(\Omega_2 - \Omega_1)}{4\delta} R_i^3\right), \qquad (4)$$

где $l_{\max}$ и δ — максимальная длина и ширина рабочего зазора; R_i — радиус i-го зазора; τ_0 — предел текучести МРЖ, зависящий от приложенного магнитного поля.

Угловые скорости ведущего и ведомого валов определяются также и через первые производные углов поворота валов муфты [16]:

$$\Omega_1 = \frac{\mathrm{d}\varphi_1}{\mathrm{d}t}; \quad \Omega_2 = \frac{\mathrm{d}\varphi_2}{\mathrm{d}t}.$$

Проведя необходимые преобразования выражения (4), приходим к выражению для определения разности угловых скоростей ведущего и ведомого валов в виде:

$$M_{\text{д.м}} = 2\pi l_{\max}\tau_0 R_i^2 + 2\pi l_{\max}\frac{\eta(\Omega_2 - \Omega_1)}{4\delta} R_i^3. \qquad (5)$$

Из выражения (5) находим:

$$\Omega_2 - \Omega_1 = \frac{M_{\text{д.м}} 4\delta}{2\pi l_{\max} R_i^3 \eta} - \frac{\tau_0 4\delta}{l_{\max} R_i \eta}. \qquad (6)$$

Интегрируя выражение (6), получаем выражения для угла относительного поворота ведущего и ведомого валов муфты:

$$\Delta\varphi = \int\left(\frac{M_{\text{д.м}} 4\delta}{2\pi l_{\max} R_i^3 \eta} - \frac{\tau_0 4\delta}{l_{\max} R_i \eta}\right)\mathrm{d}\eta = \int\frac{M_{\text{д.м}} 4\delta}{2\pi l_{\max} R_i^3 \eta}\mathrm{d}\eta -$$

$$- \int\frac{\tau_0 4\delta}{l_{\max} R_i \eta}\mathrm{d}\eta = \frac{M_{\text{д.м}} 4\delta}{2\pi l_{\max} R_i^3}\ln\eta - \frac{\tau_0 4\delta}{l_{\max} R_i}\ln\eta =$$

$$= 4\delta\left(\frac{M_{\text{д.м}}}{2\pi l_{\max} R_i^3} - \frac{\tau_0}{l_{\max} R_i}\right)\ln\eta.$$

Окончательно выражение для угла относительного поворота ведущего и ведомого валов муфты имеет вид:

$$\Delta\varphi = 4\delta\left(\frac{M_{\text{д.м}}}{2\pi l_{\max} R_i^3} - \frac{\tau_0}{l_{\max} R_i}\right)\ln\eta. \qquad (7)$$

Диагностику соединительной муфты можно провести, применив частотный метод измерения вращающего момента на ее валах [17—19].

Частотный метод измерения вязкости магнитореологической жидкости в зазоре соединительной муфты

В работах [17—19] рассмотрен способ измерения частотным методом торсионных моментов неравномерно нагруженных валов. Именно этот способ измерения торсионных моментов можно применить и к вращающимся соединительным муфтам с МРЖ, соединяющим валы исполнительных механизмов [16].

При сцеплении валов муфтой происходит закрутка коаксиальных цилиндров муфты относительно друг друга [10—12, 16].

Установлено, что при частотном методе измерения момента вращающихся торсионных валов, соединенных магнитореологической муфтой, наблюдается частотный сдвиг между опорным и смещенным частотно-модулированными сигналами генераторов линейно изменяющейся качающейся частоты (ГКЧ). Это происходит при возникновении углового рассогласования между соединенными муфтой валами [16]. Применяются два генератора: ГКЧ$_{\text{о}}$ — опорного сигнала ($f_{\text{о}}$) и ГКЧ$_{\text{с}}$ — смещенного сигнала ($f_{\text{с}}$) (рис. 2, *а*) [17—19].

При сцеплении валов в муфте возникает торсионный момент, для измерения которого с помощью измерителя углового рассогласования исполь-

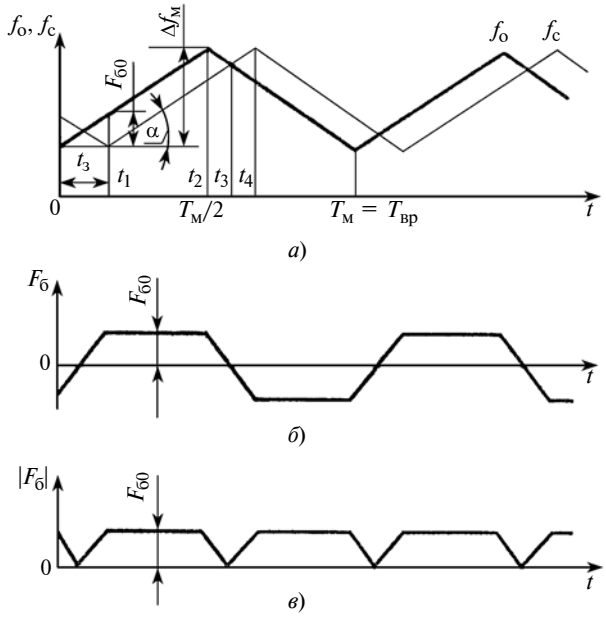


Рис. 2. Изменение во времени частот опорного ($f_{\text{о}}$) и смещенного ($f_{\text{с}}$) частотно-модулированных сигналов (*а*) и разностной частоты $F_{\text{б}}$ биений (*б*, *в*) в измерителе углового рассогласования ведущего и ведомого валов [13, 14, 18]

зуется симметричный линейный закон периодической модуляции частоты ГКЧ. Заметим, что на рис. 2, *а* масштаб не выдержан, так как всегда средняя частота $f_о \gg \Delta f_м$, где $\Delta f_м = 20 \div 50$ МГц — девиация частоты. Кроме того, в обозначении $\Delta f_м$ девиации частоты ГКЧ нижний индекс (м) указывает на широкополосную модуляцию их несущей частоты [17—20]. Частота, смещенного во времени сигнала на интервале от 0 до t_1, равном сдвигу времени запаздывания $t_з$ (см. рис. 2, *а*), изменяется под действием углового рассогласования (7) соединительной муфты таким же образом, как и частота $f_о$ опорного сигнала, но со сдвигом на время запаздывания $t_з = \Delta\varphi/\Omega_{вр}$ относительно частоты $f_о$ (см. рис. 2, *а*). Скорость изменения частоты двух ГКЧ одна и та же. В результате смещения колебаний ГКЧ возникает биение с разностной частотой $F_б$ биений.

Изменение частоты генераторов $ГКЧ_о$ и $ГКЧ_с$ согласно рис. 2, *а* составляет

$$F_б = t_з \mathrm{tg}\alpha = t_з \frac{\mathrm{d}f_о}{\mathrm{d}t} = \frac{\mathrm{d}f_о/\mathrm{d}t}{\Omega_{вр}} \Delta\varphi, \qquad (8)$$

т. е. пропорционально углу $\Delta\varphi$ рассогласования муфты [17—20].

Измерение частотного сдвига в измерителе углового рассогласования муфты основано на сравнении частоты опорного сигнала (от $ГКЧ_о$) и частоты смещенного сигнала (от $ГКЧ_с$). На выходе смесителя выделяется нулевая разностная частота $F_{б0}$ биений.

Реализация измерителя углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой по частоте биений

Измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов, соединенных муфтой, реализуется на измерении частоты биений следующим образом (рис. 3) [17—19].

С помощью установленных на ведущем и ведомом валах соединительной муфты кодовых дисков с фотоэлектрическими датчиками *1* и *2* снимаются сигналы частот вращения валов, соединенных муфтой (см. рис. 3, 4).

Функциональная схема испытаний магнитореологической муфты вязкого трения с парой трения диск—колодка в качестве нагрузки для измерения вязкости МРЖ и торсионного момента на ведомом валу муфты представлена на рис. 4.

Измерение вязкости МРЖ происходит в результате определения углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты *9*.

Сигналы частот вращения валов формируют модулирующие напряжения ГКЧ по закону симметричной треугольной пилы (см. рис. 2, *а*). Частоты

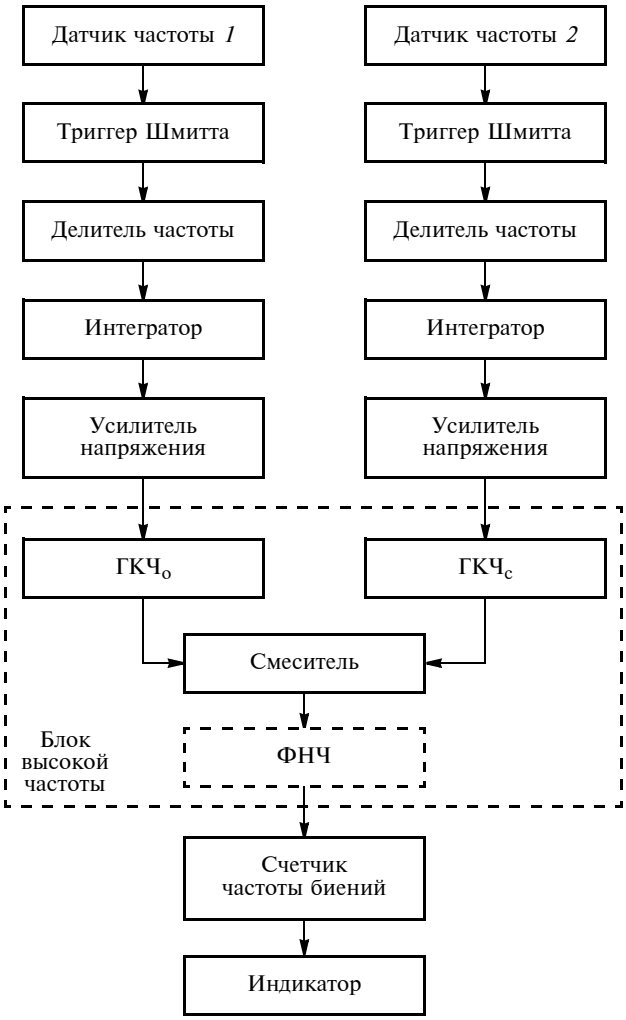


Рис. 3. Структурная схема устройства измерения углового рассогласования ведущего и ведомого валов на разностной нулевой частоте биений [13]

вращения валов соединительной муфты *9* синхронно и синфазно снимаются фотоэлектрическими датчиками *1* и *2*. (см. рис. 3, 4).

Сигналы с фотоэлектрических датчиков *1* и *2* сдвинуты по фазе друг относительно друга за время изменения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты *9* определенным торсионным моментом (см. рис. 3, 4).

При этом следует уточнить, что использование терминов *синхронность* и *синфазность* относительно сигналов с датчиков *1* и *2* правомерно только при постоянном торсионном моменте на валах, соединенных муфтой *9*, так как в противном случае синхронность и синфазность нарушаются.

Далее сохранившие фазовый сдвиг сформированные частотно-модулированные сигналы ГКЧ (опорный с датчика *1* с частотой $f_о(t)$ и сдвинутый вследствие углового рассогласования ведущего и ведомого валов муфты *9* сигнал с датчика *2* с частотой $f_с(t)$) подают на измеритель *7* углового рассогласования ведущего и ведомого валов (см. рис. 3, 4).

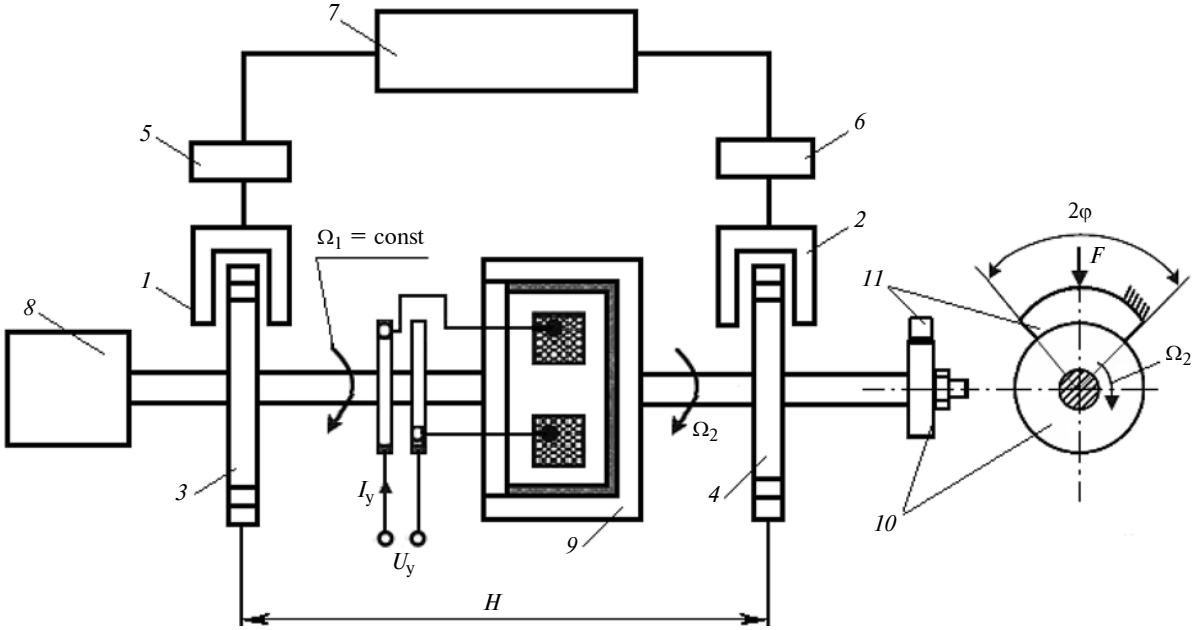


Рис. 4. Функциональная схема испытаний магнитореологической муфты вязкого трения с парой трения диск—колодка:
1, *2* — фотоэлектрические датчики; *3*, *4* — измерительные диски; *5*, *6* — преобразователи импульсов; *7* — частотный измеритель углового рассогласования ведущего и ведомого валов; *8* — электродвигатель; *9* — магнитореологическая муфта; *10*, *11* — диск и колодка пары трения; *H* — базовое расстояние (длина) муфты; $I_у$, $U_у$ — сила и напряжение тока управления

В измерителе углового рассогласования ведущего и ведомого валов на выходе смесителя установлен фильтр низкой частоты (ФНЧ) (см. рис. 3) с полосой пропускания $\Delta F_0 = F_{б0max}$.

Выход ФНЧ соединен с входом счетчика частоты биений, который преобразует частоту биений в значения углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты *9* (см. рис. 4). Счетчик состоит из формирователя прямоугольных импульсов, длительность которых соответствует половине периода частоты биений, и высокостабильного генератора тактовых импульсов (ГТИ) с тактовой частотой порядка 100 МГц. Использовать более высокую частоту нецелесообразно из-за погрешности фотоэлектрических датчиков *1* и *2*.

Поскольку условие линейной зависимости угла рассогласования муфты *9* от изменения момента на муфте сохраняется, то число импульсов ГТИ, занесенных в счетчик, пропорционально углу Δφ закручивания муфты.

Результат вычисления углового рассогласования ведущего и ведомого валов соединительной муфты *9* в виде значений угла Δφ индицируется индикатором.

Мгновенная частота биений равна абсолютному значению разности мгновенных значений частот опорного и смещенного сигналов

$$|F_б(t)| = |f_о(t) - f_с(t)|,$$

хотя формально можно учитывать знак частоты $F_б(t)$ [17—19].

Сказанное иллюстрирует рис. 2, *б*, *в*. Частота биений $F_{б0}$, которая в течение большей части периода модуляции $T_м = T_{вр}$ остается постоянной, является основной. Согласно рис. 2, *а* и формуле (8), $F_{б0} = \beta t_з$, где: $\beta = df_о/dt = 2\Delta f_м F_м$ — скорость изменения частоты ГКЧ$_о$; $\Delta f_м$ — девиация частоты; $F_м = F_{вр}$ — частота модуляции.

Из вышесказанного следует, что при изменении вязкости МРЖ под действием магнитного поля изменяется частота ГКЧ$_с$ (см. рис. 3), которая модулируется угловой скоростью Ω_2 ведомого вала. Это указывает на деформацию соединительной муфты *9*, или на проскальзывание ведомого вала (см. рис. 4).

Крутящий момент на вращающемся ведомом валу соединительной муфты *9* определяется выражением

$$M_{кр} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p, \qquad (9)$$

где Δφ — угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты (7); *H* — базовое расстояние (длина) муфты; *G*, J_p — модуль сдвига материала и полярный момент сечений ведущего и ведомого валов соединительной муфты.

Далее определяем крутящий момент на вращающемся ведомом валу муфты [17—19] с учетом выражения (7):

$$M_{кр} = \frac{\Omega_{б0}}{2\Delta f_м}\frac{GJ_p}{H} = \frac{2\pi F_{б0}}{2\Delta f_м}\frac{GJ_p}{H}. \qquad (10)$$

Приравнивая выражение (9) к выражению (10), получаем равенство

$$M_{\text{кр}} = \frac{\Delta\varphi}{H} GJ_p = \frac{2\pi F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} \frac{GJ_p}{H} = \frac{F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} 2\pi \frac{GJ_p}{H}. \quad (11)$$

Относительная величина $\frac{F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} 2\pi = \Delta\varphi$ в правой части выражения (11) представляет собой угол относительного поворота коаксиальных цилиндров муфты, выраженный в радианах.

Приравнивая выражение (11) к выражению (3), получаем равенство

$$M_{\text{кр}} = \eta \frac{(\Omega_{\text{вр}} Sr)}{l} = \frac{F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} 2\pi \frac{GJ_p}{H}. \quad (12)$$

Из равенства (12) определяем динамическую вязкость η исследуемой МРЖ в соединительной муфте:

$$\eta = \left(\frac{F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} 2\pi \frac{GJ_p}{H}\right)\left(\frac{l}{2\pi F_{\text{вр}} Sr}\right) = \frac{F_{\text{б}0}}{2\Delta f_{\text{м}}} \frac{GJ_p}{H} \frac{l}{F_{\text{вр}} Sr},$$

где $2\pi F_{\text{вр}} = \Omega_{\text{вр}}$ — угловая скорость; S — рабочая площадь внутреннего воспринимающего цилиндра ведомого вала муфты; l — зазор между внешним и внутренним воспринимающими цилиндрами; η — вязкость МРЖ.

Заключение

Рассмотренный метод измерения динамической вязкости МРЖ дает возможность исследовать рабочую жидкость с вязкостью, изменяющейся на несколько порядков. Изменение вязкости МРЖ, заполняющей соединительную муфту, позволяет оценить надежность сцепления ее ведущего и ведомого валов. Поскольку зазор между цилиндрами и коаксиальной муфтой находится в пределах $0{,}4 \cdot 10^{-3}$ м, то целесообразно выполнять дроссельные каналы в МРТ цилиндрической формы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Шульман З. П., Кордонский В. И.** Магнитореологический эффект. Минск: Наука и техника, 1982. 184 с.
2. **Магнитореологические устройства** активной виброизоляции и позиционирования для нанотехнологического оборудования / В. П. Михайлов, Г. В. Степанов, А. М. Базиненков и др. // Вестник МГТУ им. Н. Э. Баумана. Сер.: Приборостроение, спец. вып. Наноинженерия. 2010. С. 138—148.
3. **Системы** виброзащиты с использованием инерционности и диссипации реологических сред / Б. А. Гордеев, В. И. Ерофеев, А. В. Синев, О. О. Мугин. М.: Физматлит, 2004. 175 с.
4. **Башта Т. М.** Машиностроительная гидравлика. М.: Машиностроение, 1971. 672 с.
5. **Райхер Ю. Л., Русаков В. В.** Вращательная вязкость вязкоупругой магнитной жидкости // Коллоидный журнал. 2008. № 70. С. 85—92.
6. **Применение** магнитореологических жидкостей в машиностроении/ Б. А. Гордеев, С. Н. Охулков, А. С. Плехов, П. А. Злобин // Приволжский научный журнал. 2014. № 4. С. 29—42.
7. **Течение и релаксация** магнитореологической жидкости в дроссельных каналах гидроопор / Б. А. Гордеев, С. Н. Охулков, А. С. Плехов и др. // Вестник машиностроения. 2015. № 7. С. 32—38.
8. **Морозов Н.А, Казаков Ю. Б.** Нанодисперсные магнитные жидкости в технике и технологиях. Иваново: Иван. гос. энерг. ун-т, 2011. 264 с.
9. **К вопросу** создания цилиндрического магнитореологического трансформатора в ортогональных магнитных полях / Б. А. Гордеев, В. Г. Маслов, С. Н. Охулков, А. Н. Осмехин // Проблемы машиностроения и надежности машин. № 2. 2014. С. 15—21.
10. **Соловьев С. Н., Гурский А. Н.** Особенности проектирования исполнительных органов механотронных систем с магнитореологическими средами // Авиационно-космическая техника и технология. 2007. № 8. С. 145—149.
11. **Соловьев С. Н., Гурский А. Н.** Улучшение рабочих характеристик электромагнитных муфт // Авиационно-космическая техника и технология. 2009. № 7 (64). С. 75—77.
12. **Сизов А. П., Малков Ю. И.** Разработка и исследование магнитожидкостных муфт // Магнитные жидкости: научные и прикладные исследования: Сб. науч. тр. Минск. ИТМО АН БССР. 1983. С. 103—113.
13. **Крутоголов В. Д., Кулаков М. В.** Ротационные вискозиметры. М.: Машиностроение, 1984. 112 с.
14. **Корганова О. Г., Кузнецов В. А.** Ротационный вискозиметр.// Вестник самарского государственного технического университета. Сер.: Технические науки. Информационные технологии. 2012. № 1 (33). С. 55—60.
15. **Пирогов А. Н., Доня Д. В.** Инженерная реология: Учебное пособие. Кемерово: Кемеровский технологический институт пищевой промышленности, 2004. 110 с.
16. **Ганзбург Л. Б.. Федотов А. И.** Проектирование электромагнитных и магнитных механизмов: Справочник. Л.: Машиностроение. Ленингр. отд-ние, 1980. 364 с.
17. **Частотный метод** измерения крутящего момента вращающихся валов. / Б. А. Гордеев, С. Н. Охулков, А. С. Плехов и др. // Вестник машиностроения. 2015. № 2. С. 3—7.
18. **Частотный метод** измерения деформации кручения на вращающихся валах машин и механизмов / Б. А. Гордеев, В. В. Бугайский, В. И. Ерофеев, С. Н. Охулков // Вестник Волжской государственной академии водного транспорта. Надежность и ресурс в машиностроении. 2006. Вып. 16. С. 62—70.
19. **Пат. 2196309. Рос. Федерация.** Способ определения крутящего момента.
20. **Викторов В. А., Лункин Б. В., Совлуков А. С.** Радиоволновые измерения параметров технологических процессов. М.: Энергоиздат, 1989. 208 с.

УДК 621.833

В. И. КОРОТКИН, канд. техн. наук (Южный федеральный университет, г. Ростов-на-Дону),
e-mail korotkin@math.rsu.ru

Обоснование применимости упрочненных зубчатых передач Новикова в качестве выходных ступеней многоступенчатых редукторов общемашиностроительного применения[1]

Приведены сведения по созданию редукторов общемашиностроительного применения (РОП) с термоулучшенными и высокотвердыми зубчатыми передачами Новикова сравнительно невысоких степеней точности. Решением пространственных контактных задач теории упругости и моделирования показана целесообразность замены упрочненных высокоточных дорогостоящих эвольвентных передач на выходных ступенях РОП менее трудоемкими в изготовлении упрочненными передачами Новикова более грубых степеней точности. Даны предварительные расчеты создаваемых перспективных твердых высокоточных передач Новикова и показано их значительное преимущество в сравнении с эвольвентными аналогами.

Ключевые слова: редукторы общемашиностроительного применения, высокотвердые зубчатые передачи Новикова, степень точности.

The information is given on the creation of reducers for general machine-building applications (RGMA) with heat-improved and high-strength Novikov's gears of relatively low accuracy degrees. By the solution of the spatial contact problems of the theory of elasticity and modeling the expediency of replacing the hardened high-precision expensive involute gears at the output stages of the RGMA by less laborious in the manufacture of hardened Novikov's transmissions of coarser accuracy degrees is shown. Preliminary calculations of Novikov's promising solid high-precision gears are given and their considerable advantage is shown in comparison with involute counterparts.

Keywords: reducers for general machine-building applications, high-strength Novikov's gears, accuracy degree.

Создание в середине XX столетия М. Л. Новиковым принципиально нового типа зацепления [1] явилось выдающимся вкладом в развитие многих отраслей машиностроения, в том числе редукторостроения. На основе этого зацепления в короткие сроки был разработан целый класс зубчатых передач разных типов, получивших по имени их основоположника заслуженное название зубчатые передачи Новикова.

Поскольку передачи Новикова создавались, прежде всего, как передачи с высокой контактной прочностью, они быстро получили широкое распространение в нормализованном и термоулучшенном исполнении, когда лимитирующим видом отказа является именно контактная выносливость поверхностей зубьев. Эвольвентные передачи, имеющие ограниченную контактную прочность, не могли при таком использовании составить конкуренцию передачам Новикова, и поэтому во многих случаях были успешно заменены последними. Это коснулось таких отраслей, как нефтяное и горное машиностроение, судостроение, производство энергетических машин, компрессоров, и многих других, но особенно ярко проявилось в редукторостроении. Основными предприятиями в нашей стране, первыми освоившими крупносерийное и массовое производство редукторов общемашиностроительного применения (РОП) с зубчатыми передачами Новикова, были Ижевский и Майкопский редукторные заводы. Зубчатые передачи Новикова изготовлялись на базе исходного контура Урал-2Н (впоследствии — по ГОСТ 15023—76), с твердостью поверхностей зубьев $H \geq 300HB$, имели высокую экономичность, их технический уровень в 60—80-е годы прошлого столетия был не ниже технического уровня редукторов подобного типа, выпускаемых западными фирмами.

Дальнейшее совершенствование передач Новикова проводилось в направлении создания новых исходных контуров, приспособленных для высокой твердости поверхностно упрочненных зубьев, и разработки современных методик расчета и проектирования данных передач, что диктовалось возросшими требованиями к технико-экономическим показателям редукторов.

В этих рамках Ижевский ОАО "Редуктор" совместно с Ростовским госуниверситетом (РГУ) провел исследования нагрузочной способности нитроцементованных (с твердостью зубьев $H \geq 58HRC_э$) передач Новикова с разработанным в РГУ исходным контуром РГУ-5, который параллельно проверялся также для зубчатых пар в термоулучшенном варианте.

В течение 1978—1984 гг. на Ижевском заводе совместно с РГУ были проведены широкомасштабные сравнительные испытания зубчатых передач Новикова с указанным исходным контуром и

[1] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ (проект № 9.4726.2017/8.9).

эвольвентных аналогов 8—9-й степеней точности (по ГОСТ1643—81), которые, в частности, в высокотвердом варианте показали, что нагрузочная способность передач Новикова по контактной прочности в несколько раз, а по изломной — в 1,3 раза выше, чем аналогичных высокотвердых эвольвентных передач [2]. Отмечены также результаты, когда термоулучшенные передачи Новикова не уступали эвольвентным аналогам с высокотвердыми поверхностно упрочненными зубьями, что позволило в 1985 г. успешно внедрить термоулучшенные зубчатые передачи Новикова с исходным контуром РГУ-5 в тихоходных ступенях выпускаемых редукторов 1Ц2У-250 и 1Ц3У-250.

Результаты испытаний нитроцементованных передач Новикова были доложены Координационному совету при Минстанкопроме СССР, специально созданному для решения проблемы внедрения высокотвердых передач Новикова в редукторостроении. Координационный совет к тому времени располагал результатами, представленными также и другими организациями.

В табл. 1 указано примерное число испытанных в нашей стране к 1985 г. высокотвердых передач Новикова и эвольвентных передач, а в табл. 2 даны результаты сравнительных испытаний этих передач по изломной прочности, которая для упрочненных передач Новикова считается определяющей. Что касается контактной прочности, то по этому критерию передачи Новикова во всех случаях намного превосходили эвольвентные — они имели блестящие приработанные поверхности зубьев (приработка опережала возможное наступление питтинга). Исключение составляли только передачи с исходным контуром Урал-2Н, у которых наблюдались случаи питтинга в околополюсной эвольвентной зоне, а также некоторые экземпляры нешлифованных зубчатых пар с исходным контуром ДЛЗ-0,7-0,15. Эвольвентные передачи практически всегда имели прогрессирующий питтинг в виде средних и крупных раковин, нередко приводящих к поломокам зубьев.

После тщательного анализа и всесторонних обсуждений Координационный совет принял решение рекомендовать для высокотвердых зубчатых передач Новикова, применяемых в редукторостроении, исходный контур РГУ-5. Данный контур затем был доработан, запатентован в СССР и США, а затем стандартизован в рамках СНГ [3]. Передачи Новикова с данным исходным контуром прошли дополнительную проверку в нитроцементованном исполнении на Ижевском редукторном заводе и в цементованном исполнении во ВНИИРедукторе (г. Киев), показав в сравнительных испытаниях нагрузочную способность по изломной прочности в 1,4 раза выше, чем эвольвентные аналоги. Была изготовлена первая промышленная партия редукторов с такими передачами, которые эксплуатируются до настоящего времени без рекламаций на ряде предприятий страны.

В 1990 г. на Ижевском ОАО "Редуктор" была создана перспективная гамма цилиндрических двухступенчатых редукторов серии 6Ц2 с нитроцементованными зубчатыми передачами Новикова с твердостью зубьев $H \geq 58 HRC_э$ и с исходным контуром по ГОСТ 30224—96 [3]. Здесь были использованы такие резервные возможности оптимизации передач Новикова, как рациональное корригирование зубьев и увеличение модуля зацепления при сохранении межосевых расстояний ступеней и передаточных чисел редукторов. В результате этого предполагали повысить нагрузочную способность редукторов в 2 раза по сравнению с редукторами с эвольвентными нитроцементованными передачами и вывести их по техническим параметрам на уровень лучших мировых образцов, обеспечив показатель удельной массы (отношение массы редуктора к выходному вращающему моменту) порядка 0,048 кг/(Н · м). Одновременно начались работы по исследованию процессов финишной обработки (зубошевингования и зубошлифования) зубьев передач Новикова, оптимизация которых могла еще более повысить технические характеристики редукторов.

Отметим также, что в термоулучшенном исполнении передачи Новикова были внедрены в при-

Таблица 1

Число высокотвердых передач, испытанных в стране к 1985 г.

Организация, проводившая испытания	Зубчатые передачи	
	Эвольвентные	Новикова
ОАО "Редуктор" (Ижевск) — РГУ (Ростов н/Д)	26	54
ЛМИ (Ленинград)	Нет данных	9
ВНИИРедуктор (Киев)	19	13
НИИТМ (Ростов н/Д)	5	10
ВВИА им. Жуковского (Москва)	6	6
Всего:	56	92

Таблица 2

Усредненные значения соотношения γ нагрузочных способностей по изломной прочности высокотвердых зубчатых передач Новикова и эвольвентных аналогов

Исходный контур зубьев	γ	Зубья передач
РГУ-5	1,3	Нешлифованные
Урал-2Н (ГОСТ 15023—76)	0,9	Нешлифованные
Дон-63	1,17	Эвольвентные — шлифованные; передачи Новикова — нешлифованные, с увеличенным в 1,14 раза модулем
ДЛЗ-0,7-0,15	1,6	Шлифованные

водах нефтяных станков-качалок (ОАО "Редуктор" и завод "Ижнефтемаш"), где успешно эксплуатируются в настоящее время.

К большому сожалению, из-за известных событий 1991 г. не удалось в свое время завершить НИР по упрочненным передачам Новикова, а также по финишной обработке их зубьев. Эта работа затормозилась на долгие годы. Однако настоятельная необходимость в современных условиях поддерживать высокую конкурентоспособность выпускаемых редукторов, а также решать актуальные задачи возможного импортозамещения изделий заставила возобновить эти работы.

Следует подчеркнуть, что за рубежом давно ведутся интенсивные исследования по применению зацепления Новикова (там его называют зацепление W—N). Достаточно упомянуть такие страны, как США, Китай, Великобритания, Япония, Индия, Бельгия, Германия и др., по данным которых нагрузочная способность передач Новикова как минимум в 2—3 раза выше, чем эвольвентных. Это позволило использовать их, например, в главных редукторах вертолетов (фирма Westland Helicopter, Великобритания), в нефтепромысловом оборудовании (фирма Darco, США), в высокоскоростных турбинных установках большой мощности для пассажирских судов (предприятие ГНМЗ, провинция Шандунь, Китай) и др. Надо признать при этом, что в области технического обеспечения высокого качества передач Новикова промышленно-развитые страны в настоящее время находятся на более высоком уровне, чем Россия.

Особое внимание обратим на следующее. Стремление достичь высоких показателей зубчатого привода без использования малопроизводительных и дорогостоящих финишных операций (например, зубошлифования) привело к разработке передач Новикова с продольной модификацией поверхностей зубьев. Технология изготовления таких передач достаточно проста и не вызывает принципиальных затруднений, а положительный эффект от их применения по сравнению с немодифицированными передачами Новикова, как показывают исследования, весьма значителен [4, 5]. В наибольшей степени это характерно для высокотвердых передач Новикова, нагрузочная способность которых посредством продольной модификации может быть повышена в 2 раза. Разумеется, необходима экспериментальная проверка теоретически полученного результата. Но в случае его подтверждения (даже не в полной мере) нешлифованные модифицированные передачи Новикова могут составить достойную конкуренцию на мировом рынке поверхностно упрочненным высокоточным (шлифованным) эвольвентным передачам, что будет подлинным прорывом в развитии приводной техники и, в частности, редукторостроения.

По окончании наших исследований результаты применения модифицированных передач Новикова для РОП в дальнейшем будут опубликованы, а в настоящей статье покажем эффективность увеличения модуля передач Новикова (при сохранении межосевых расстояний ступеней и передаточных чисел РОП).

Эффективность этого способа обусловлена тем, что для передач Новикова указанное увеличение модуля приводит не только к снижению изгибных напряжений (как и у эвольвентных передач), но и к снижению контактных напряжений (в отличие от эвольвентных передач). Это утверждение основано на рассмотренных в ранее опубликованной работе [6] экспериментальных примерах, где модуль был увеличен на одну ступень стандартного ряда модулей [7]. Также заслуживают упоминания характерные примеры успешной замены упрочненных высокоточных эвольвентных передач на упрочненные передачи Новикова с увеличенным модулем. Например, хорошо известен случай эффективной замены эвольвентной передачи с цементованными шлифованными зубьями с модулем $m = 7$ мм на передачу Новикова с цементованными зубьями без шлифовки (исходный контур Дон-63) с $m = 8$ мм, вписанную в корпус редуктора троллейбуса ЗИУ-5, выпускаемого заводом им. Урицкого в г. Энгельсе [8]. Успешно эксплуатируются высокотвердые передачи Новикова повышенного модуля взамен эвольвентных на выходных ступенях крупногабаритных редукторов для металлургического оборудования, изготовляемых на предприятии ООО "СПИН" (г. Орел).

Прежде чем приступить к описанию результатов, охарактеризуем методы, с помощью которых эти результаты получены.

Применительно к зубчатым передачам Новикова за последнее время нами созданы математические модели для численного решения пространственных контактных задач напряженно-деформированного состояния (НДС) зубьев конечных размеров со сложными поверхностями, имеющими также нерегулярные области (например, торцы). При этом площадка контакта, размеры и форма которой заранее неизвестны и определяются в процессе решения задачи, может располагаться в любом месте по длине зуба вплоть до торца (в момент пересопряжения зубьев). В результате такого моделирования (для чего нами разработан пакет программ в среде ANSYS) получаем контактные и изгибные напряжения, а также жесткость зубьев в любом месте по длине зуба и таким образом находим так называемые коэффициенты влияния торцов зубчатого венца на эти параметры для конкретного расположения площадки контакта [9—11].

На основании данных по НДС проводится моделирование (с помощью программы NOVKS-17)

реального многопарного зацепления передачи Новикова, базирующееся на разработанной системе нелинейных уравнений, описывающей равновесие и совместность упругого перемещения контактирующих пар зубьев и включающей жесткость зубьев и реальные технологические погрешности изготовления и сборки зубчатых колес, соответствующие заданной степени точности [12]. Разбивая пошагово многопарное зацепление, получаем параметры НДС с учетом коэффициентов влияния торцов в любой фазе зацепления. Таким образом определяется "опасная" фаза, где напряжения максимальны. Эти напряжения, которые мы назвали критериальными, в сопоставлении с допускаемыми напряжениями и определяют нагрузочную способность передачи.

Описанная система методов дает достаточно объективную картину НДС зубьев передачи Новикова и существенно повышает достоверность результатов по сравнению с ранее применявшимися методами.

Для сопоставления напряженности зубьев передач Новикова и эвольвентных выберем выходные (тихоходные) ступени пяти моделей многоступенчатых РОП с межосевыми расстояниями $a_w = 100 \div 250$ мм и передаточным числом $u = 5$. Выбор именно выходных ступеней объясняется их, как показывают расчеты, наибольшей нагруженностью, определяющей работоспособность редуктора, а также сравнительно невысокими скоростями вращения зубчатых колес.

Расчеты эвольвентных передач выполнены строго по ГОСТ 21454—87 [13] с учетом небольших поправок. Так, при исследованиях с помощью моделирования было установлено, что определяемые по ГОСТу [13] коэффициенты, учитывающие неравномерность распределения нагрузки по длине контактных линий, занижены на 15÷17 % при расчетах контактных напряжений и на 10÷15 % при расчетах изгибных напряжений [14].

Исходными данными для расчета напряжений стандартных упрочненных ($H_{1,2} = 60HRC_э$) эвольвентных пар с исходным контуром по ГОСТ 13755—81 и шлифованными зубьями были: передаточное число $u = 5$, числа зубьев шестерни $z_1 = 16$ и колеса $z_2 = 80$ (т. е. $z_\Sigma = z_1 + z_2 = 96$), рабочая ширина зубчатого венца (длина зуба) $b_w = (0{,}33 \div 0{,}38)a_w$, модуль $m = 0{,}02a_w$, (как это принято в РОП), 6-я степень точности зубчатых колес в соответствии с ГОСТ 1643—81 как по нормам плавности (k_p), так и по нормам контакта (k_k), скорость вращения $v = 8$ м/с. Вращающий момент T_2 на ведомом колесе для постоянного нереверсивного режима в расчетах принимался удвоенным по сравнению с указанным в каталоге [15]. Передачи приняты без коррекции (по причинам, изложенным ниже), внешняя динамическая нагрузка отсутствует. По рекомендациям ГОСТа [13] во избежание прижогов и микротрещин при шлифовании зубья эвольвентных пар выполнены с протуберанцем.

В табл. 3 представлены результаты расчета, где β — угол наклона зубьев, ε_β — коэффициент осевого перекрытия, $(\sigma_H)_{эв}$, $(\sigma_F)_{эв}$ — напряжение соответственно по контактной и изгибной прочности.

По описанной выше методике проведен расчет зубчатых передач Новикова с исходным контуром по ГОСТу [3]. Предполагается, что все данные по материалу, термообработке зубчатых колес (следовательно, и по допускаемым напряжениям), а также по нагрузкам те же, что и для эвольвентных передач.

В табл. 4 приведены результаты расчета передач Новикова с исходным контуром по ГОСТу [3], 8-й и 9-й степеней точности (т. е. без финишной обработки зубьев). Модуль передач здесь увеличен сразу на две ступени [7] и равен примерно $0{,}032a_w$, в связи с чем при $u = 5$ и заданных межосевых расстояниях получаем $z_\Sigma = 60$, $z_1 = 10$, $z_2 = 50$. С целью соблюдения наиболее рациональных значений коэффициентов ε_β [4] в некоторых зубчатых парах, как видно из табл. 4, удалось несколько снизить ширину b_w зубчатого венца в сравнении с эвольвентными аналогами.

Чтобы нагляднее представить эффективность увеличения модуля, введем обозначения:

$(\lambda_H)_{6/8}$ — отношение $(\sigma_H)_{эв}$ при $k_{p,k} = 6$ к $(\sigma_H)_{Нов.}$ при $k_{p,\,k} = 8$;

$(\lambda_F)_{6/8}$ — отношение $(\sigma_F)_{эв}$ при $k_{p,k} = 6$ к $(\sigma_F)_{Нов.}$ при $k_{p,\,k} = 8$;

$(\lambda_H)_{6/9}$ — отношение $(\sigma_H)_{эв}$ при $k_{p,k} = 6$ к $(\sigma_H)_{Нов.}$ при $k_{p,\,k} = 9$;

$(\lambda_F)_{6/9}$ — отношение $(\sigma_F)_{эв}$ при $k_{p,k} = 6$ к $(\sigma_F)_{Нов.}$ при $k_{p,\,k} = 9$

и составим сравнительную табл. 5.

Таблица 3

Результаты расчета напряжений зубьев эвольвентных зубчатых пар 6-й степени точности ($k_p = k_k = 6$) с шлифованными зубьями и протуберанцем

Параметр	Зубчатая пара				
	1	2	3	4	5
T_2, Н · м	630	1260	2500	5000	10 000
a_w, мм	100	125	160	200	250
m, мм	2,0	2,5	3,15	4,0	5,0
$\beta°$	16,260205	16,260205	19,091053	16,260205	16,260205
b_w, мм	35	48	52	75	95
ε_β	1,560	1,711	1,719	1,671	1,693
$(\sigma_H)_{эв}$, МПа	**1310**	**1272**	**1279**	**1212**	**1199**
$(\sigma_F)_{эв}$, МПа	**503**	**463**	**433**	**413**	**391**

Таблица 4

Результаты расчета напряжений зубьев передач Новикова 8-й и 9-й степеней точности с нешлифованными зубьями

Параметр	Зубчатая пара									
	1		2		3		4		5	
T_2, Н · м	630		1260		2500		5000		10 000	
a_w, мм	100		125		160		200		250	
m, мм	3,15		4,0		5,0		6,3		8,0	
β°	19,091053		16,260205		20,364135		19,091053		16,260205	
b_w, мм	32		48		50		65		95	
ε_β	1,058		1,070		1,108		1,074		1,058	
$k_p = k_k$	8	9	8	9	8	9	8	9	8	9
$(\sigma_H)_{\text{Нов}}$, МПа	**1128**	**1255**	**1142**	**1263**	**1091**	**1201**	**949**	**1039**	**993**	**1069**
$(\sigma_F)_{\text{Нов}}$, МПа	**314**	**357**	**296**	**337**	**266**	**298**	**275**	**290**	**259**	**276**

Из табл. 5 видно, что напряженность эвольвентных пар 6-й степени точности превышает таковую пар Новикова: при 9-й степени точности — на 0÷16 % (контакт) и 37÷45 % (изгиб); при 8-й степени — на 11÷27 % (контакт) и 50÷62 % (изгиб). Уже такой результат позволяет надеяться на возможность замены высокоточных эвольвентных передач передачами Новикова более грубых степеней точности. Учитывая нелинейный характер связи между нагрузкой и критериальными напряжениями [9, 10] (последние изменяются медленнее, чем нагрузка), повышение нагрузочной способности передачи будет значительнее, чем снижение напряжения. Так, например, если для пары 4 Новикова 9-й степени точности, показавшей $(\sigma_H)_{\text{Нов.}}$ = 1039 МПа (см. табл. 4), мы захотим достигнуть контактного напряжения соответствующей эвольвентной пары $(\sigma_H)_{\text{эв}}$ = 1212 МПа (см. табл. 3), то придется, согласно расчетам, повысить нагрузку до 6975 Н · м, т. е. снижение напряжения в 1,167 раза (см. табл. 5) эквивалентно повышению нагрузки в 6975/5000 = 1,395 раза. По изгибу для того же примера имеем снижение напряжения в 1,424 раза, что эквивалентно повышению нагрузки до 8320 Н · м, т. е. в 8320/5000 = 1,664 раза.

Таблица 5

Отношения напряжений зубьев эвольвентных зубчатых пар 6-й степени точности к напряжениям зубьев передач Новикова 8-й и 9-й степеней точности

Параметр	Зубчатая пара				
	1	2	3	4	5
a_w, мм	100	125	160	200	250
$(\lambda_H)_{6/8}$	**1,161**	**1,114**	**1,172**	**1,277**	**1,207**
$(\lambda_F)_{6/8}$	**1,602**	**1,564**	**1,628**	**1,502**	**1,510**
$(\lambda_H)_{6/9}$	**1,044**	**1,007**	**1,065**	**1,167**	**1,122**
$(\lambda_F)_{6/9}$	**1,409**	**1,374**	**1,453**	**1,424**	**1,417**

Разумеется, при решении вопроса о повышении нагрузки, допускаемой зубчатыми парами, необходимо проверять прочность и жесткость валов, долговечность подшипников, термическую мощность редуктора и т. д.

Возникает естественный вопрос: нельзя ли добиться снижения напряженности в эвольвентных парах, применяя, например, корригирование, повышение модуля или продольную модификацию (бочкообразность) зубьев? Этот вопрос уже рассматривался в работе [12], напомним здесь об этом вкратце.

Известно, что угловое корригирование в косозубых эвольвентных передачах не приводит к снижению контактных напряжений, так как рост приведенного радиуса кривизны в полюсе компенсируется снижением коэффициента торцевого перекрытия и суммарной длины контактных линий. То же самое происходит при использовании нестандартных исходных контуров с увеличенным углом профиля. Повышение модуля в заданном межосевом расстоянии также не снижает, а даже несколько повышает контактную напряженность из-за упомянутого снижения того же торцевого перекрытия. Повышение нагрузочной способности эвольвентной передачи за счет снижения изгибных напряжений (что возможно при увеличении модуля) зачастую не может быть реализовано из-за контактных напряжений, которые, как правило, являются лимитирующими, находясь на уровне допускаемых напряжений или близко к ним. Что касается продольной модификации поверхностей зубьев, то она дает определенный эффект [14] (кстати, меньший, чем для передач Новикова), но он проявляется только начиная с 8-й степени точности и грубее, а при 6-й степени эффект отсутствует.

Таким образом, приведенные в статье сравнительные данные по двум типам зацеплений можно полагать достаточно обоснованными.

Выше было сказано, что перспективные работы по применению финишных операций (зубошлифования и др.) для передач Новикова были в свое время приостановлены. В настоящее время они возобновлены и находятся на стадии исследований. Завершение этих работ должно привести к более широкому применению передач Новикова, в частности, ими можно будет оснастить полностью все ступени РОП. С точки зрения нагрузочной способности это можно было бы сделать уже сейчас, однако мы полагаем, что на входных и промежуточных ступенях, где скорости вращения значительно выше, чем на тихоходных, целесообразно пока оставить высокоточные эвольвентные зубчатые пары, шлифованные зубья которых обеспечивают более благоприятные виброактивные и шумовые характеристики редуктора.

В заключение приведем результаты предварительного расчета перспективных пар Новикова, выполненных по 6-й степени точности (т. е. с шлифованными зубьями), а также отношения $(\lambda_H)_{6/6}$ и $(\lambda_F)_{6/6}$ напряжений зубьев эвольвентных передач к напряжениям зубьев передач Новикова при одинаковой 6-й степени точности сравниваемых типов зацеплений (табл. 6). Как видно, преимущества передач Новикова весьма значительны.

На основании изложенного можно сделать следующие выводы.

1. Упрочненные передачи Новикова с исходным контуром РГУ-5 или по ГОСТу [3] невысокой (8-й, 9-й) степени точности, т. е. с нешлифованными зубьями, могут с успехом заменить высокоточные (6-й степени точности) эвольвентные передачи с шлифованными зубьями на выходных (тихоходных) ступенях гаммы выпускаемых редукторов общемашиностроительного применения, что позволит исключить на первом этапе малопроизводительный дорогостоящий процесс зубошлифования, понизив себестоимость изготовления редукторов, и повысить их конкурентоспособность.

2. Завершение исследований по модификации поверхностей зубьев, а также отработке технологии изготовления и контроля упрочненных передач Новикова высоких степеней точности с шлифованными зубьями позволит проектировать и выпускать редукторы, технические характеристики и конкурентоспособность которых будет превосходить достигнутый к настоящему времени мировой уровень, и при необходимости с успехом решать задачи импортозамещения.

Таблица 6

Результаты расчета напряжений зубьев передач Новикова 6-й степени точности и отношений к ним напряжений зубьев эвольвентных пар 6-й степени точности

Параметр	Зубчатая пара				
	1	2	3	4	5
$(\sigma_H)_{\text{Нов}}$, МПа	**894**	**922**	**897**	**794**	**843**
$(\sigma_F)_{\text{Нов}}$, МПа	**265**	**251**	**237**	**247**	**235**
$(\lambda_H)_{6/6}$	**1,465**	**1,380**	**1,426**	**1,526**	**1,422**
$(\lambda_F)_{6/6}$	**1,898**	**1,845**	**1,827**	**1,672**	**1,664**

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Новиков М. Л.** Зубчатые передачи с новым зацеплением. М.: ВВИА им. Н. Е. Жуковского, 1958. 186 с.
2. **Веретенников В. Я., Короткин В. И., Болдырева Л. Г.** Исследование нитроцементованных цилиндрических зубчатых передач Новикова для редукторов общего назначения // Вестник машиностроения. 1984. № 6. С. 21—23.
3. **ГОСТ 30224—96.** Передачи зубчатые Новикова цилиндрические с твердостью поверхности зубьев не менее 35 $HRC_э$. Исходный контур: Межгосударственный стандарт / Межгос. совет по стандартизации, метрологии и сертификации. М.: Из-во стандартов, 1996. 5 с.
4. **Короткин В. И., Онишков Н. П., Харитонов Ю. Д.** Зубчатые передачи Новикова. Достижения и развитие. М.: Машиностроение-1, 2007. 384 с.
5. **Короткин В. И.** Оценка эффективности продольной модификации поверхностей зубьев цилиндрических зубчатых передач Новикова со стандартным исходным контуром по ГОСТ 30224—96 // Справочник. Инженерный журнал. 2015. № 12. С. 14—20.
6. **Короткин В. И., Онишков Н. П.** Эффективность увеличения модуля в зубчатых передачах Новикова со стандартными исходными контурами // Техника машиностроения. 2015. № 2. С. 37—44.
7. **ГОСТ 14186—69.** Колеса зубчатые цилиндрические передач Новикова. Модули. М.: Изд-во стандартов, 1969. 1 с.
8. **Росливкер Е. Г.** Прочность и жесткость зубьев передач с зацеплением М. Л. Новикова // Прочность корпусов судов и надежность деталей машин. Труды ГИИВТа. Вып. 138. Горький: ГИИВТ, 1975. С. 50—96.
9. **Короткин В. И., Газзаев Д. А.** Моделирование контактного взаимодействия зубьев колес зубчатых передач Новикова // Вестник машиностроения. 2014. № 11. С. 31—35.
10. **Короткин В. И., Газзаев Д. А.** Изгибная напряженность зубьев под действием распределенной нагрузки в различных фазах зацепления Новикова // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2014. № 2. С. 22—30.
11. **Короткин В. И., Газзаев Д. А., Онишков Н. П.** Фазовое перемещение зубьев колес цилиндрических зубчатых передач Новикова // Техника машиностроения. 2014. № 2. С. 33—38.
12. **Короткин В. И.** Сравнительный анализ напряженности зубьев и нагрузочной способности цилиндрических зубчатых передач Новикова и эвольвентных передач // Вестник машиностроения. 2016. № 9. С. 38—43.
13. **ГОСТ 21354—87.** Передачи зубчатые цилиндрические звольвентные. Расчет на прочность. М.: Изд-во стандартов, 1988. 125 с.
14. **Короткин В. И.** Цилиндрические эвольвентные зубчатые передачи с локальным контактом зубьев повышенной нагрузочной способности. Ростов н/Д: Изд-во ЮФУ, 2013. 100 с.
15. **Редукторы** и мотор-редукторы. Каталог. Ч. 1. М.: ВНИИТЭМР. 1987. 66 с.

УДК 612.313.333.2; 62-592.117

П. Р. БАРАНОВ, канд. техн. наук (Национальный исследовательский Томский политехнический университет),
А. Л. НОСКО, д-р техн. наук (МГТУ им. Н. Э. Баумана), e-mail: baranovp@tpu.ru, e-mail: nosko@bmstu.ru

Разработка серии крановых асинхронных двигателей с дисковыми тормозными устройствами

Приведены результаты разработки и натурных испытаний конструкции крановых асинхронных двигателей с дисковыми тормозными устройствами для серийного производства. Разработана оригинальная схема управления электромагнитным приводом тормозного устройства, обеспечивающая его быстродействие и повышение эксплуатационной надежности по сравнению с известными аналогами.

Ключевые слова: крановый асинхронный двигатель, дисковое тормозное устройство, электромагнитный привод, технологичность конструкции.

Results of development and full-scale tests of the design of crane asynchronous motors with disc brake devices for series production are given. An original scheme for controlling the electromagnetic drive of the brake device is developed, which ensures its speed and increase of operational reliability in comparison with the known analogues.

Keywords: crane asynchronous motor, disk brake device, electromagnetic drive, technological design.

Согласно требованиям безопасности грузоподъемных механизмов регламентируется обязательное оснащение каждого кранового электродвигателя при монтаже грузоподъемной машины нормально закрытым механическим тормозом [1]. Как правило, используются колодочные тормоза серии ТКГ и их аналоги [2, 3]. В ряде случаев для механизмов с относительно малыми приведенными моментами инерции движущихся масс используют асинхронные двигатели с пристроенными дисковыми тормозными устройствами. Данная модификация общепромышленной серии асинхронных двигателей имеет в обозначении букву "Е", например АИРМ112М4ЕУ3 [4]. К преимуществам этих двигателей следует отнести компактность и сокращение времени монтажа и настройки по сравнению с агрегатами "двигатель — колодочный тормоз". Однако устойчивость данных двигателей к внешним механическим воздействиям (М1 по ГОСТ 17516.1—90) и величина тормозного момента не всегда отвечают требованиям грузоподъемных машин. Поэтому задача разработки крановых асинхронных двигателей с пристроенными дисковыми тормозными устройствами (далее АДТ) является актуальной и направлена на повышение надежности и технического уровня отечественных грузоподъемных машин.

Асинхронные двигатели с дисковыми тормозными устройствами должны обеспечивать высокий технический уровень и отвечать следующим основным требованиям [2, 3]:

унификация и типизация технологического процесса серийного производства АДТ с базовой серией;

максимальная унификация основных узлов АДТ разрабатываемого изделия с электродвигателями базовой серии;

высокое быстродействие тормозного устройства, небольшие габаритные размеры и масса;

простота конструкции, удобство регулирования и настройки тормозного устройства;

высокий и стабильный тормозной момент;

надежность и минимальный износ фрикционных накладок тормозного устройства.

На базе крановых асинхронных электродвигателей серий МТКН и 4МТКН [5] ОАО "Сибэлектромотор", а также Национальным исследовательским Томским политехническим университетом (кафедра "Электротехнические комплексы и материалы") и МГТУ им. Н. Э. Баумана (кафедра "Подъемно-транспортные системы") разработана серия крановых электродвигателей с пристроенными тормозными устройствами дискового типа.

В качестве примера на рис. 1 приведена конструкция АДТ типа МТКН012-6ЕУ1, а в таблице —

Типоразмерный ряд тормозов дисковых пристроенных типа ТДП

Типоразмер	Исполнение	Тормозной момент, Н · м	Замыкающий элемент	Масса, кг	Электродвигатель	
					Мощность, кВт	Высота оси вращения, мм
ТДП-1	1 2	20÷80 80÷180	Пружины	8 18	1,5÷7,5 11,0÷18,5	90÷112 132÷160
ТДП-2	—	180÷460	Пружины	40	22÷30	160÷180
ТДП-3	1 2	460÷800 800÷1500	Пружины Торсионы	105 165	37÷45 55÷75	200÷225 225÷250
ТДП-4	—	1500÷2100	Торсионы	190	90÷132	250÷315

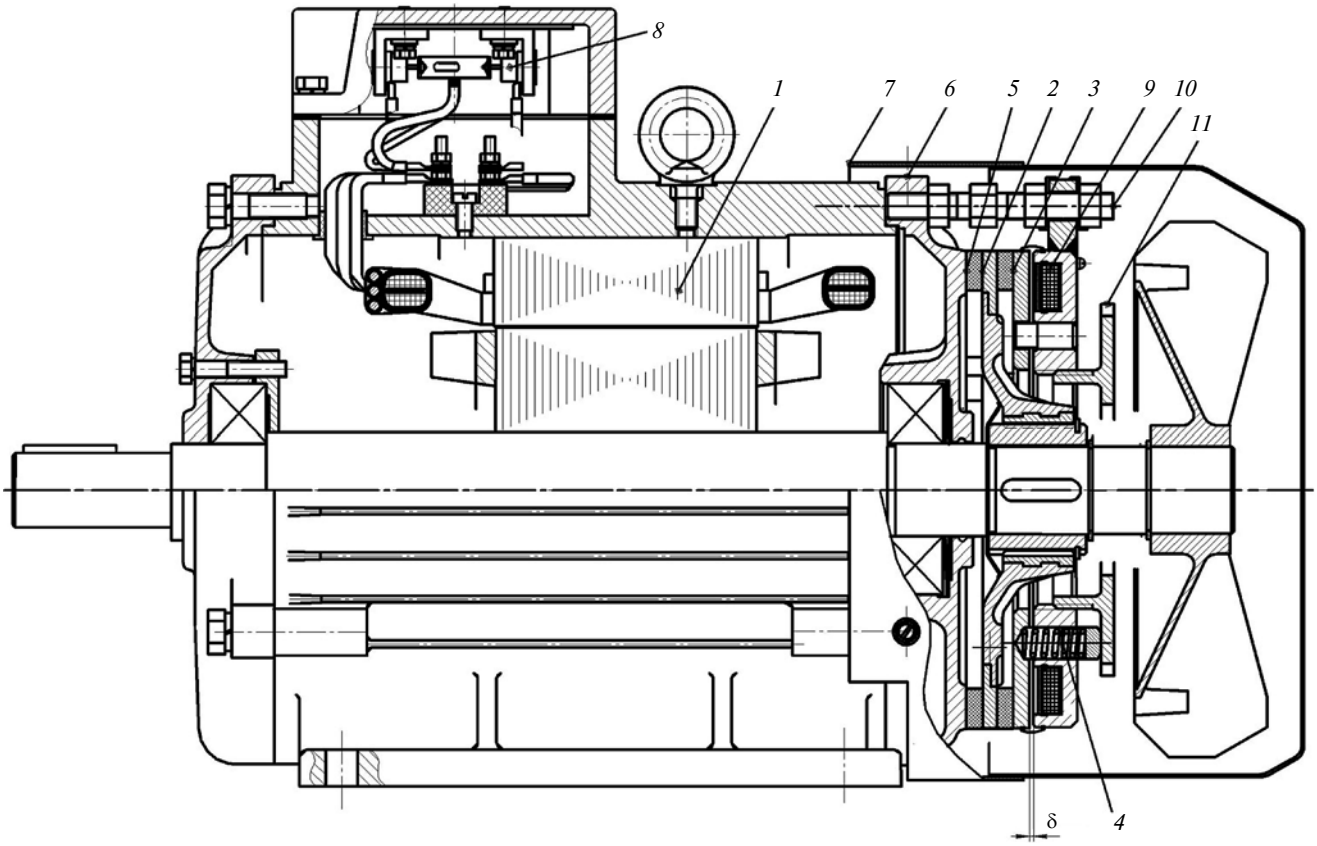


Рис. 1. Конструкция кранового асинхронного двигателя с дисковым тормозом

типоразмерный ряд тормозов дисковых пристроенных (ТДП).

Двигатель с ТДП работает следующим образом. При подключении напряжения на обмотку статора *1* (см. рис. 1) пусковой ток обеспечивает форсированное срабатывание электромагнита, якорь *3* освобождает тормозной диск *2*, установленный на шлицах вала, и ротор разгоняется. Ток статора удерживает якорь *3* при любом режиме работы. При отключении питания якорь *3* под действием пружин *4* отходит от сердечника и фиксирует тормозной диск *2* фрикционными накладками *5*, ротор останавливается.

В сравнении с базовой серией электродвигатель имеет более длинный вал, задний подшипниковый щит снабжен дополнительными приливами *6* для крепления электромагнита, кожух удлинен обечайкой *7*, закрепленной контактной сваркой. Крышка коробки выводов более высокая и служит для размещения мостового выпрямителя *8*. Остальные узлы и детали полностью унифицированы.

Отметим, что в настоящее время в РФ модификации электродвигателей с тормозными устройствами выпускаются электромашиностроительными предприятиями единично или мелкими сериями, двигатели трудоемки и дороги, настройки тормоза выполняются на стадии общей сборки. Представленная на рис. 1 конструкция позволяет в серийном производстве реализовать модульный принцип общей сборки: исключить настройки и подгонки. Тормозное устройство собирается на основе базовой детали — подшипниковом щите, на параллельном участке технологической линии. Тормоз и электромагнитный привод полностью монтируются на подшипниковом щите. На специальной оправке проводятся настройки зазоров и тормозного момента дискового тормоза. Проверенный и настроенный на щите сборочный узел направляется на общую сборку. Таким образом, время общей сборки двигателя с тормозным устройством практически не отличается от аналогичного показателя электродвигателя базовой серии. Это существенное преимущество представленной конструкции отличает ее от аналогов [6], стоимость которых много больше стоимости базового двигателя.

Предусмотрены определенные удобства для обслуживания и эксплуатации. Так, растормаживающий электромагнит *9* с якорем *3* повернут к подшипниковому щиту *6* и крепится шпильками *10* к его приливу. Воздушный зазор δ между якорем и сердечником регулируется с помощью стопорных гаек на шпильках. Такое расположение обеспечивает удобство настройки и стабильность тормозного момента. С помощью гайки *11* все тормозные пружины *4* одновременно или сжимаются, или ос-

лабляются. Таким образом, соответственно увеличивается или уменьшается тормозной момент.

Представленный на рис. 2 в качестве примера вариант исполнения ТДП-12 имеет фрикционную пару двустороннего трения, тормозной диск которой может перемещаться в осевом направлении, а замыкающее осевое усилие создается упругим элементом — центральной пружиной.

Тормоза можно пристраивать к корпусу электродвигателя, а также при наличии свободного хвостовика приводного вала механизма крепить к корпусу редуктора со стороны, противоположной приводному электродвигателю. Предусмотрено также размещение тормоза в виде законченной сборочной единицы на валу исполнительного механизма вместо колодочного или дисково-колодочного тормоза.

В зависимости от типоразмера тормоза существуют конструктивные исполнения: замыкающий элемент — пружины (центральные или периферийные) или цилиндрические торсионы; тормозной диск одно- или двустороннего трения.

Для каждой модели типоразмерного ряда предусмотрена возможность:

регулирования тормозного момента от номинального (максимального) до наименьшего значения (для данного типоразмера);

компенсации износа фрикционных накладок;

ручного растормаживания.

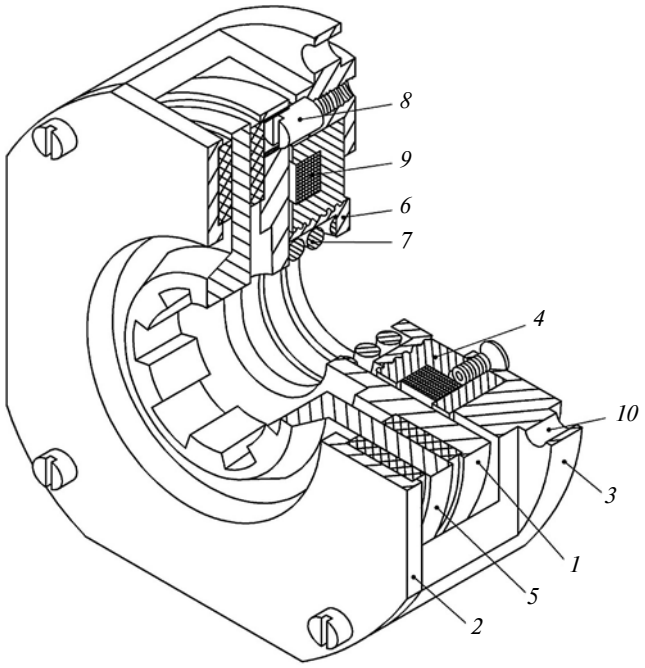


Рис. 2. Общий вид дискового тормоза (ТДП-12):

1 — якорь; *2* — диск упорный; *3* — корпус; *4* — магнитопровод; *5* — диск тормозной; *6* — гайка регулировочная; *7* — пружина; *8* — палец направляющий; *9* — катушка; *10* — крепежное отверстие

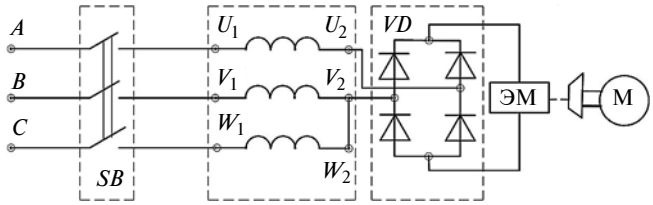


Рис. 3. Схема подключения электромагнитного привода дискового тормоза кранового асинхронного двигателя

Благодаря конструктивной простоте защиты ТДП от пыли и грязи их техническое обслуживание при эксплуатации практически сводится к замене изношенных фрикционных накладок.

При разработке серии крановых АДТ предусмотрены две модификации схемы электромагнитного привода тормоза: с форсированием электромагнита пусковыми токами двигателя; с форсированием и независимым питанием электромагнитного привода тормоза.

Первая модификация АДТ предназначена для широкого класса грузоподъемных механизмов с неуправляемым электроприводом: электротали, подъемники, механизмы передвижения и др., вторая — для механизмов с управляемым электроприводом, например, в комплекте с преобразователем частоты.

В данной статье рассматриваются АДТ первой модификации, которые отличаются простотой конструкции и схемы подключения. Традиционно в таких устройствах растормаживающий электромагнит включается последовательно с обмоткой статора [7], соединенной в звезду. Как правило, используется однофазный мостовой выпрямитель, минимально искажающий форму синусоидального тока статора [8]. Однако при изготовлении и испытаниях опытных образцов АДТ был выявлен существенный недостаток данной схемы управления: в ряде случаев наблюдались пробои изоляции силовых диодов на корпус.

Поэтому для повышения надежности электромагнитного привода тормоза разработали новую оригинальную схему управления (рис. 3) [9]. Для реализации схемы в коробку выводов двигателя вывели все шесть выводов с началами (U_1, V_1, W_1) и концами (U_2, V_2, W_2) фаз обмотки статора. Вход *VD* выпрямителя подключен между концами U_2 и V_2 фаз обмотки. Выход выпрямителя подключен к обмотке растормаживающего электромагнита *SB*. Конец W_2 третьей фазы соединен накоротко с концом другой фазы, образуя соединение обмотки статора "звезда".

В традиционной схеме [7] напряжения между корпусом, диодами и обмоткой равны фазному напряжению сети. В предлагаемой схеме управления (см. рис. 3) напряжения на диодах и обмотке электромагнита относительно корпуса многократно ни-

же напряжения сети. Следовательно, предложенная схема обеспечивает значительно больший ресурс надежной работы при прочих равных условиях.

Расчет параметров растормаживающего электромагнита, подключенного по предлагаемой схеме (см. рис. 3), имеет следующие особенности. Для обеспечения максимальной симметрии обмоток статора, т. е. для создания кругового магнитного поля двигателя сопротивление обмотки электромагнита должно быть, как минимум, на порядок меньше сопротивления фазной обмотки статора. При выполнении этого условия ток электромагнита будет практически равен току статорной обмотки и его увеличение или уменьшение зависит только от режима работы двигателя. Следовательно, при пуске ток электромагнита равен пусковому току и кратно выше его номинального значения, а форсированное срабатывание происходит автоматически. Поэтому при разработке электромагнитных приводов данного типа нет необходимости в сложных расчетах динамических показателей.

Важным исходным показателем при проектировании является суммарное осевое усилие тормозных пружин, которое должен преодолеть электромагнит при включении, определяемое по формуле [3]

$$N = M_т/(fR_{ср}z),$$

где $M_т$ — тормозной момент; f — коэффициент трения фрикционного материала по стали; $R_{ср}$ — средний радиус трения фрикционных накладок; z — число пар поверхностей трения.

При электромагнитном расчете приняли следующие допущения: противодействующее усилие якоря постоянно в течение всего рабочего хода; распределение индукции в воздушном зазоре равномерно; потоки рассеяния и выпучивания пренебрежимо малы [10, 11]. Допущения приняты с учетом особенностей конструкции растормаживающего электромагнита. Погрешность от введения допущений незначительна, так как растормаживающий электромагнит выполняется с коротким ходом, воздушный рабочий зазор δ изменяется, как правило, в диапазоне 0,5÷1,5 мм, а наружный диаметр магнитопровода превышает 100 мм [11].

Тогда площадь одного полюса можно определить по известной упрощенной формуле Максвелла [10, 11]:

$$S_п = N\mu_0/(B_\delta^2),$$

где N — противодействующее усилие пружин тормоза, которое необходимо преодолеть электромагниту при включении и для удержания якоря при установившемся режиме работы; μ_0 — магнитная проницаемость вакуума; B_δ — магнитная индукция в воздушном зазоре, величина которой выбирается в зависимости от марки стали магнитопровода электромагнита.

Высота под катушку и осевая длина зависят от числа w витков и сечения $s_{пр}$ обмоточного провода. Конструктивная схема тормозного электродвигателя (см. рис. 1) предусматривает расположение вентилятора за тормозным устройством. С одной стороны, такое расположение позволяет эффективно охлаждать растормаживающий электромагнит и дисковый тормоз, с другой стороны, сдвиг серийного вентилятора в осевом направлении от статора на величину осевой длины электромагнита и дискового тормоза увеличит сопротивление воздушному потоку и снизит интенсивность охлаждения статорной обмотки. Поэтому при проектировании электромагнитного привода одним из важнейших критериев оптимальности была его минимальная осевая длина. Такая особенность методики расчета электромагнита тормоза отличает его от известных традиционных расчетов электромагнитов [10, 11].

После предварительного определения геометрии электромагнита проводится электромагнитный расчет по известной схеме замещения [10, 11] и рассчитываются магнитодвижущие силы (МДС) при включении (в режиме форсирования) $F_{тр}$ при рабочем зазоре δ и в номинальном режиме $F_у$ при остаточном зазоре $\delta_о$. Магнитодвижущие силы, развиваемые электромагнитом, определяются по известным формулам:

$$F_{тр} = I_п w; \quad F_у = I_у w, \tag{1}$$

где $I_п$ и $I_у$ — силы тока соответственно в режимах пуска и установившимся; w — число витков, которое согласно формуле (1) определяется выражением

$$w = F_у/I_у. \tag{2}$$

В общем случае число витков электромагнита должно удовлетворять режиму пуска и установившемуся режиму согласно выражениям (1). Силу тока приняли равной наименьшему расчетному или экспериментальному значению. Рекомендуется использовать минимальную силу тока для режима холостого хода.

Сечение провода электромагнита можно определить, используя формулу (2) и формулу из работы [10] для расчета активного сопротивления катушки:

$$S_{пр} = F_у l\rho/(I_у R),$$

где l — средняя длина витка обмотки электромагнита; R — сопротивление обмотки; ρ — удельное сопротивление материала обмотки при температуре 20 °С.

Натурные испытания опытных образцов крановых электродвигателей 4МТКН132LB6ЕУ1 и МТКН012-6ЕУ1 проводили в аттестованной элек-

тромашинной лаборатории ОАО "Сибэлектромотор" при нормальных климатических условиях (температура 22±3 °С). Методы испытаний соответствовали ГОСТ 11828—86, ГОСТ 7217—87, ГОСТ Р 52689—2006. Тормозной момент двигателя измеряли динамометром, который закрепляли на рычаге, установленном на рабочем конце вала перпендикулярно оси вращения кранового двигателя. Тормозной момент определяли как среднеарифметическое значение трех — пяти последовательных измерений. Рабочий зазор δ между якорем растормаживающего электромагнита и сердечником определяли с помощью щупов при отключенном двигателе. Измерения проводили не менее чем в трех местах по окружности примерно через 120°. Номинальный тормозной момент двигателя выбирали кратным двум от номинального момента двигателя. Испытания на работоспособность проводили при рабочем зазоре δ = 0,7÷1,6 мм. При натурных испытаниях кранового двигателя 4МТКН132LВ6ЕУ1 получили следующие технические характеристики:

Номинальная мощность в режиме S4 120 вкл/ч при ПВ 40 %	7,5 кВт
Номинальное линейное напряжение обмотки статора, частота	380 В, 50 Гц
Номинальный момент на валу двигателя	80 Н·м
Номинальный тормозной момент	160 Н·м
Рабочий зазор электромагнита при испытаниях	0,7÷1,6 мм
Время задержки срабатывания тормоза не более:	
при пуске	0,01 с
при отключении	0,1 с
Среднее номинальное напряжение катушки электромагнита	2,5 В
Потребляемая мощность электромагнита в номинальном режиме	42 Вт
Температура перегрева обмотки относительно температуры окружающей среды статора/обмотки электромагнита	78/57*
Допустимая температура окружающей среды	−40÷+40 °С

* Класс изоляции обмоток Н (180 °С)

Динамические показатели тормозного устройства при включении и отключении определялись осциллографированием токов электромагнита при разных величинах аксиального хода δ якоря при номинальном тормозном моменте. Напряжение и силу тока тормоза контролировали по переменному напряжению (действующее значение на входе выпрямителя) и со стороны выпрямленного тока (среднее значение). Схема подключения тормоза к электродвигателю соответствует рис. 3.

Отметим, что номинальным режимом работы двигателя являлся режим S4 при ПВ 40 %, 120 вкл./ч. Тепловое состояние обмоток статора двигателя практически не отличалось от аналогичного показателя серийного базового аналога (без тормоза).

Сравнительные энергетические данные АДТ и базовых двигателей показали их практическое равенство. Незначительно отличались пусковые данные АДТ: снижение кратности пускового тока на 6,5 % и пускового момента почти на 8 % (в результате незначительной несимметрии кругового поля асинхронного двигателя). Однако указанные отклонения АДТ не выходят за пределы значений базовых двигателей, приводимых в каталогах.

Натурные экспериментальные исследования дисковых пристроенных тормозов подтвердили их эффективность: применение более твердых фрикционных полимерных материалов позволило увеличить ресурс фрикционной пары до 1÷2 млн торможений, установка дисковых тормозов вместо колодочных существенно уменьшить массу и габаритные размеры приводов механизмов ГПМ (до 20 и 40 % соответственно), сократить в разы затраты на эксплуатацию тормоза.

Выводы

1. Разработана конструкция крановых асинхронных двигателей с тормозным устройством, отвечающая требованиям технологичности при серийном производстве за счет унификации основных узлов, типизации технологического процесса сборки двигателей.

2. Разработан типоразмерный ряд дисковых пристроенных тормозов крановых асинхронных двигателей, отвечающих современным требованиям к крановым стопорным автоматическим тормозам, применение которых позволяет улучшить компоновку приводов механизмов грузоподъемных машин, существенно сократить их габаритные размеры, массу, эксплуатационные затраты.

3. Разработана оригинальная схема управления электромагнитным приводом тормоза, обеспечивающая необходимое быстродействие тормоза, повышение эксплуатационной надежности по сравнению с известными аналогами.

4. Даны рекомендации и предложены расчетные выражения для определения области проектирования токового электромагнитного привода тормоза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Правила** устройства и безопасной эксплуатации грузоподъемных кранов. ПБ 10-382—00. М.: НЦЭНАС, 2011. 268 с.

2. **Яуре А. Г., Певзнер Е. М.** Крановый электропривод: Справочник. М.: Энергоатомиздат, 1988. 344 с.

3. **Тормозные** устройства: Справочник / М. П. Александров, А. Г. Лысяков, В. Н. Федосеев, М. В. Новожилов; Под общ. ред. М. П. Александрова. М.: Машиностроение, 1985. 312 с.

УДК 65.012

А. Н. ФЕОФАНОВ, д-р техн. наук, М. А. ШУТИКОВ, К. С. ПОНОМАРЕВ (МГТУ "СТАНКИН"),
e-mail: feofanov.fan1@yandex.ru

Разработка производственных исполнительных систем в условиях цифрового производства

Показаны преимущества применения систем электронного документооборота на предприятиях. Приведен пример взаимодействия системы оперативного управления производством MES и системы электронного документооборота.

Ключевые слова: MES-система, система электронного документооборота, оптимальная загрузка, подшипники, планирование.

The advantages of using electronic document management systems at enterprises are shown. An example of the interaction of the MES operational management system for the production and the electronic document management system is given.

Keywords: MES-system, electronic document management system, optimal loading, bearings, planning.

Неотъемлемой частью современной экономики является развитие цифровизации. Системы электронного документооборота, а также различные информационные системы применяются во многих отраслях промышленности, в том числе и на машиностроительных предприятиях [1]. Одной из таких систем является Manufacturing Execution System (MES). Системы такого типа планируют технологические операции, выполняемые на определенных рабочих местах [2]. Также они дают возможность контролировать выпуск продукции путем анализа и оптимизации загрузки оборудования различного вида. Используя данные уровней планирования и контроля, MES управляют текущей производственной деятельностью в соответствии с поступающими заказами, требованиями конструкторской и технологической документации, актуальным состоянием оборудования, при этом преследуются цели достижения максимальной эффективности и минимальной стоимости выполнения производственных процессов. MES осуществляют связь в реальном времени производственных процессов с бизнес-процессами организации и улучшают финансовые показатели предприятия, способствуя повышению отдачи основных фондов, ускорению оборота денежных средств, снижению себестоимости, своевременности поставок, росту прибыли и производительности. Использование таких систем позволяет повысить возможность контроля функционирования предприятия, сэкономить временны́е ресурсы, увеличить производительность труда персонала. Внедрение таких информационных систем, как интегрированные системы оперативного управления производством, позволяет синхронизировать в автоматизированном режиме производственное расписание во времени, что актуально в современных условиях жесткой конкуренции во всех сферах производства [3].

В 1997 г. Международная ассоциация производителей и пользователей решений для промышленных предприятий (MESA) предложила функциональную модель, в которой были определены типовые обобщенные функции MES: контроль состояния и распределение ресурсов (RAS), оперативное/детальное планирование (ODS), диспетчеризация производства (DPU), управление документами (DOC), сбор и хранение данных (DCA), управление персоналом (LM), управление качест-

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 20)

4. **Унифицированная** серия асинхронных двигателей Интерэлектро // В. И. Радин, Й. Лондин, В. Д. Розенкноп и др.; Под ред. В. И. Радина. М.: Энергоатомиздат, 1990. 416 с.

5. **Сайт** предприятия ОАО "Сибэлектромотор": www.sibelektromotor.ru/

6. **Сайт** ОАО "Валдайский механический завод". Двигатели с электромагнитным тормозом. Каталог, цены. http://www.двигатель.рф/tormoz.html

7. **Баранов П. Р., Дементьев Ю. Н., Однокопылов И. Г.** Математическая модель асинхронного двигателя со встроенным электромагнитным приводом тормозного устройства // Известия Томского ПУ. 2006. Т. 309. № 1. С. 159—163.

8. **Электротехнический** справочник: Электротехнические изделия и устройства. В 3 т. Т. 2 / Под общ. ред. профессоров МЭИ (гл. ред. И. Н. Орлов) и др. М.: Энергоатомиздат, 1986. 712 с.

9. **Пат. 2604203 Рос. Федерация.** Электромагнитный привод тормоза форсированного пуска асинхронного двигателя.

10. **Сливинская А. Г.** Электромагниты и постоянные магниты. М.: Энергия, 1972. 247 с.

11. **Расчет** электромагнитного привода дисковых тормозных устройств асинхронных двигателей с заданным быстродействием [Электронный ресурс] = Calculation of the electromagnetic drive of induction motor disk brake mechanisms with the set operation speed / П. Р. Баранов, А. А. Шараевский // Науковедение: интернет-журнал. 2013. № 3 (16). 7 с.

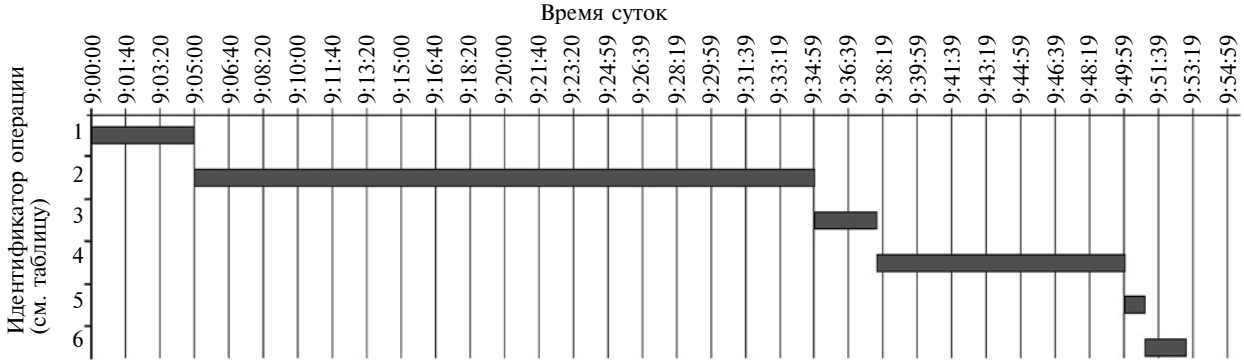


Рис. 1. Диаграмма Гантта выполнения измерений геометрических размеров партии подшипников

вом продукции (QM), управление производственными процессами (PM), управление техобслуживанием и ремонтом (MM) оборудования, анализ производительности (PA). В 2004 г. данная модель была переработана в модель C-MES (Collaborative Manufacturing Execution System), которая определила функции систем отдельных классов: управление техобслуживанием и ремонтом, оперативное/детальное планирование и управление документами. Вместе с тем добавились функции, которые являются внешними, но общими для всей цепочки создания ценностей на предприятии: работа с поставщиками, с заказчиками; общие финансовые показатели.

В 2007 г. ассоциация MESA предложила последнюю на сегодняшний день (третью) функциональную модель Strategic Initiatives Plant-to-Enterprise (P2E).

Вопросы, связанные с планированием производственной деятельности, нашли отражение в работах таких зарубежных ученых, как С. М. Джонсон, который предложил задачу планирования технологических операций на станках, и Д. О'Лири, занимавшийся планированием и управлением ресурсами предприятия, в работах других исследователей. Разработкой MES активно занимались известные зарубежные фирмы: Rockwell Automation, Gensym, Siemens, SAP и др. Большой вклад во внедрение MES на отечественные предприятия внесли ученые-разработчики Е. Б. Фролов, Р. Р. Загидуллин, С. Юсифов и др.

Однако вопросы, связанные с интеграцией систем планирования оптимальной загрузки измерительного оборудования и систем электронного документооборота, до настоящего момента мало изучены и недостаточно разработаны.

Интегрированные системы оперативного управления производством можно применять в области измерения и контроля серии однотипных деталей или изделий с использованием автоматизированного измерительного оборудования, например координатно-измерительной машины (КИМ). Изделия поступают на контроль партиями от разных поставщиков. Процентное содержание брака может зависеть от определенных факторов: нарушения технологических процессов при изготовлении изделия, различия в типах производственного оборудования, использования сырья разных видов и марок и т. д. Выявление партий изделий с наименьшим процентным содержанием брака позволит рационально рассчитать загрузку контрольно-измерительного оборудования путем присвоения приоритета контроля одних партий перед другими. Это даст возможность интенсифицировать процессы всей деятельности предприятия. В качестве примера можно рассмотреть подшипники как одно из важнейших изделий, применяемых в разных отраслях промышленности.

Инструментом достижения этих целей являются такие информационные системы, как MES.

Основой для решения задачи оперативного планирования в MES служит построение динамической компьютерной модели производства, которая путем имитационного моделирования описывает движение материальных потоков предприятия согласно технологическим маршрутам. Технологический маршрут визуализируется временной диаграммой, где каждой операции соответствует отрезок прямой, длина которого пропорциональна времени выполнения операции. Существует возможность оперативно вносить в MES изменения, касающиеся задержек поставок изделий, отказов в работе оборудования и изменений технологического процесса [4].

По данным компании Siemens, внедрение MES на промышленном предприятии обеспечивает следующие параметры его оптимизации: сокращение времени ввода данных, как правило, на 75 % или более; уменьшение продолжительности цикла производства в среднем на 45 %; сокращение в среднем объема бумажной отчетности между сменами на 61 %, бумажной документации — на 56 %, количества незавершенной продукции — на 24 %, объема брака — на 18 %, времени освоения новой продукции — на 27 %.

Как уже было отмечено выше, одной из функций MES является составление производственного расписания, которое визуализируется как диаграмма Гантта. Появляется возможность оперативно

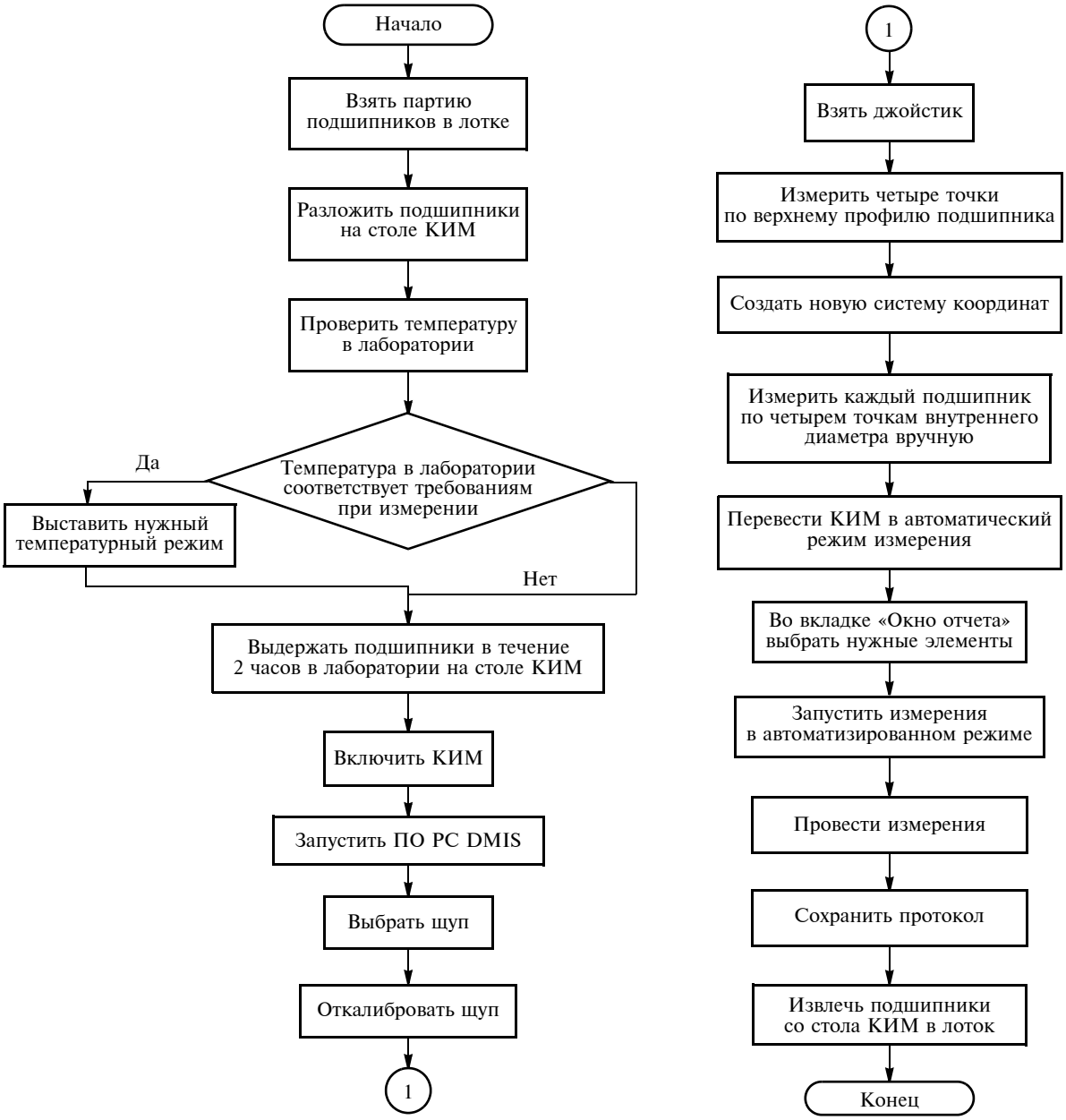


Рис. 2. Алгоритм проведения измерения геометрических параметров партии подшипников с помощью координатно-измерительной машины

оценивать временные затраты на контроль партий разных поставщиков одного и того же изделия.

Например, при контроле параметров такого изделия, как подшипники, на координатно-измерительной машине система MES позволяет получить график выполнения измерительных операций, приведенный на рис. 1. Продолжительность операций измерения геометрических параметров подшипников одной партии представлена в таблице, последовательность выполнения операций измерений показана на рис. 2.

Если одна из координатно-измерительных машин вышла из строя или по каким-либо причинам отсутствует возможность проводить на ней измерения параметров подшипников, то MES в автомати-

Данные процесса измерения геометрических параметров подшипника

Операция			
Идентификатор	Время начала/конца	Назначение	Длительность, мин
1	9:00/9:05	Закрепить изделие на гранитной плите КИМ	5
2	9:05/9:35	Выдержать изделие в условиях проведения измерений	30
3	9:35/9:38	Включить КИМ	3
4	9:38/9:50	Измерить партию изделий	12
5	9:50/9:51	Печать протокола	1
6	9:51/9:53	Снять партию изделий с гранитной плиты КИМ	2

зированном режиме перераспределит загрузку находящихся в рабочем состоянии средств измерений, пригодных для выполнения данной операции. При этом будут учитываться загруженность и технические характеристики средств измерений, а также приоритет выполнения контроля партий деталей на этих средствах измерений. После этого MES составит производственное расписание с учетом складывающейся ситуации, что позволит оптимально загрузить производственное оборудование. Кроме того, при возникновении необходимости есть возможность вносить изменения и в ручном режиме для обеспечения потребностей производства и функционирования предприятия.

Изменения, вносимые в базу данных MES, оказывают непосредственное влияние на производственное расписание. Следовательно, каждая новая версия расписания должна быть утверждена начальником участка, цеха или другим уполномоченным лицом. К тому же в целях идентификации версий производственного расписания необходимо обеспечить возможность их архивации. Это позволит отслеживать параметры измерительного оборудования в тот или иной промежуток времени. В связи с этим актуальна корреляция информационной системы (MES) с системами электронного документооборота.

По результатам измерения геометрических параметров подшипников в каждой партии составляется протокол измерения. При положительном результате измерения, что соответствует отсутствию бракованных подшипников, протокол должен быть передан для подготовки и выполнения следующего этапа технологического процесса по изготовлению изделия (сборка, монтаж, испытания). Если в партии обнаружено бракованное изделие, протокол должен быть рассмотрен и завизирован не только оператором, непосредственно обеспечивающим контроль геометрических параметров подшипников, но и вышестоящими руководителями (главным метрологом, главным технологом). Для повышения оперативности, а также исключения воздействия человеческого фактора актуальным является использование для указанных целей системы электронного документооборота.

Любая организация промышленной, финансовой, логистической и торговой сфер экономики должна использовать в процессе своей деятельности системы электронного документооборота. Системы такого типа призваны сократить временной аспект документооборота, снизить квантитативный параметр ошибочного контента, который обусловливается человеческим фактором при подготовке, исполнении и утверждении документа. Эти системы также обеспечивают надежность и контроль доставки и получения документов для исполнения, отслеживание изменений, вносимых в тот или иной документ, облегчают поиск различных версий документа, повышают надежность архивации документации. Применение систем электронного документооборота позволяет объективно реагировать на тренды развития экономических взаимосвязей с учетом цифровизации всех сфер общественных отношений.

Использование автоматизированных систем электронного документооборота в MES положительно сказывается на различных процессах деятельности предприятия, например на процессе контроля и измерения данных видов изделий. По результатам контроля MES в автоматизированном режиме формирует протокол измерения, который сразу же загружает в виде электронного документа (например, в формате *.doc или *.xls) в систему электронного документооборота и передает для утверждения контролеру — оператору измерительного оборудования. После утверждения данный протокол сохраняется в базе данных системы (которая, в свою очередь, входит в единое защищенное хранилище данных предприятия) и становится доступным для работы только сотрудникам, имеющим доступ к технологическому процессу участка, где будут применяться измеренные детали. Если в процессе измерения обнаружен брак, протокол после утверждения оператором может быть передан с помощью системы документооборота непосредственному начальнику, а далее — главному технологу, начальнику производства или другим ответственным уполномоченным лицам. Ответственные лица удостоверяют данный протокол своей электронной подписью, тем самым подтверждая свои полномочия и согласие с содержанием документа, а также защищая документ от внесения неправомочных изменений. Так обеспечиваются прозрачность в работе с документом, сам процесс документооборта и защита содержащейся в документе информации, повышается оперативность работы с ним, создается возможность однозначной идентификации документа и его архивации. Алгоритм данного процесса показан на рис. 3.

Электронная подпись представляет собой некоторый код, определяющий подлинность документа и его валидность, т. е. свойство, определяющее его законченность и готовность к использованию по назначению. Электронная подпись получается в результате вычисления хэша от сообщения и представляет собой последовательность байтов двоичной системы. После получения хэша происходит его шифрование с помощью закрытого ключа цифровой подписи, который известен только владельцу. Подписанный таким образом электронный документ отправляется получателю, который вычисляет хэш исходного документа и сравнивает его с получившимся при шифровании отправителем. Если оба хэша идентичны, содержимое документа не претерпело изменений.

Рис. 3. Алгоритм процесса использования протокола в среде электронного документооборота предприятия

Так обеспечивается возможность обнаружить непреднамеренные или умышленные изменения данных, содержащихся в электронном документе. Это повышает безопасность передачи данных любого вида, причем не только внутри конкретного предприятия, но и при передаче документа в стороннюю организацию [5].

Передача информации при интеграции системы электронного документооборота и MES осуществляется в обе стороны. Если MES необходимо получить данные из какого-либо документа, содержащегося в системе электронного документооборота, MES может найти его по ссылке, присвоенной данному документу системой электронного документооборота и переданной в MES. Следовательно, обеспечивается результативная взаимосвязь между двумя данными системами.

Взаимодействие систем электронного документооборота и MES обеспечивает повышение эффективности деятельности предприятия путем снижения временны́х затрат как на исполнение непосредственно технологических процессов, так и на сопутствующий этому технологическому процессу документооборот. Появляется возможность обеспечить оптимальную загрузку технологического оборудования с помощью автоматизации методов расчета производственного расписания. Вследствие этого сокращаются непроизводственные издержки, связанные с простоем или, наоборот, излишней загруженностью оборудования, снижается воздействие человеческого фактора при расчете степени изменения параметров технологического процесса. Повышается оперативность реагирования при отклонении характеристик процессов от нормы, появляется возможность практически мгновенно получать достоверную и защищенную информацию об аспектах функционирования предприятия. Повышаются прозрачность и контролируемость бизнес-процессов, безопасность и степень их защищенности. Все это позволяет увеличивать эффективность функционирования предприятия, а следовательно, повышает шансы на успешную борьбу за клиента в условиях конкурентной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Феофанов А. Н., Юнин И. Ю., Соломенцев Ю. М.** Создание мобильного портала для организации работы предприятия // Технология машиностроения. 2012. № 5. С. 70—73.

2. **Соломенцев Ю. М., Фролов Е. Б., Феофанов А. Н.** Оперативное планирование и управление машиностроительным производством на основе исполнительных производственных систем // Вестник машиностроения. 2017. № 8. С. 41—43.

3. **Соломенцев Ю. М., Фролов Е. Б., Феофанов А. Н.** Эффективное управление производством — основа потенциала технологической системы // Вестник машиностроения. 2017. № 5. С. 84—87.

4. **Феофанов А. Н., Амачиев Л. А.** Описание фрагмента программного обеспечения для автоматизированной обработки данных при верификации электронных изделий // Международный научно-исследовательский журнал. 2016. № 6 (48). Ч. 2. С. 15—17.

5. **Скворцов А. В., Схиртладзе А. Г., Чмырь Д. А.** Автоматизация управления жизненным циклом продукции: Учебник для студ. учреждений высш. проф. образования. М.: Издательский центр "Академия", 2013. 320 с.

УДК 62-754

В. А. ТИХОМИРОВ (ВА РВСН им. Петра Великого), e-mail: vatih@mail.ru

Энергопоглощающие устройства дорожных ограждений

Предложено для повышения безопасности дорожного движения применять в дорожных ограждениях энергопоглощающие устройства, обеспечивающие рассеяние кинетической энергии транспортных средств при столкновении с ограждением в результате пластической деформации демпфирующих элементов.

Ключевые слова: безопасность, дорожное ограждение, энергопоглощение.

For the improvement of road safety, it is proposed to use in road barriers energy absorbing devices, that provide dispersion of the kinetic energy of vehicles when colliding with a fence as a result of plastic deformation of damping elements.

Keywords: safety, road fencing, energy absorption.

В России вопросам безопасности дорожного движения уделяется большое внимание, однако аварийность на автомобильном транспорте остается высокой. Правительством РФ принята стратегия безопасности дорожного движения в России на 2018—2024 гг. [1], которая предполагает реализацию комплекса практических мер, оказывающих непосредственное воздействие на безопасность дорожного движения.

Движущийся автомобиль обладает огромной кинетической энергией, которая определяется формулой $T = mv^2/2$, где m — масса автомобиля; v — скорость автомобиля. При обычном торможении рассеяние кинетической энергии происходит за относительно продолжительное время в результате трения в элементах тормозной системы, а также колес при взаимодействии с дорожным полотном при их блокировке. При этом требуется значительное перемещение транспортного средства. При аварийной ситуации транспортное средство ограничено в перемещении, и кинетическая энергия расходуется на деформацию и разрушение самого транспортного средства и объекта столкновения. Для снижения последствий дорожно-транспортного происшествия (ДТП) предусмотрена пассивная безопасность, главной задачей которой является сохранение жизни человека, снижение числа и тяжести травм. Для этого предусматриваются конструкторские решения, обеспечивающие безопасную деформацию автомобиля при столкновении, и устройства внутренней безопасности (подушки и ремни безопасности, складывающиеся рулевые колонки и т. д.).

ДТП классифицируют по вероятности возникновения и их последствиям [2]. Самым опасным является наезд автомобиля на неподвижное препятствие. При этом число столкновений автомобилей с объектами, расположенными вне дорог, в городах составляет 14,4 % от всех ДТП, вне города — 28,7 %. Столкновения автомобилей с другими автомобилями составляют ≈35 % от всех ДТП, при этом самым опасным является лобовое столкновение. Для предотвращения лобовых столкновений автомобилей, наезда автомобиля на неподвижные препятствия, расположенные на обочине и в полосе отвода дороги, предотвращения движения транспортных средств в опасном направлении устанавливают ограждения, главным показателем которых является их удерживающая способность, не допускающая движения транспортных средств в запрещенном направлении.

Установка высокопрочных мостовых ограждений на мостах, путепроводах, виадуках, эстакадах, набережных и т. п. с максимальной удерживающей способностью необходима для предотвращения катастрофических последствий, но в остальных местах установки необходимо учитывать, что сами ограждения также являются препятствиями, столкновения с которыми сопряжены с серьезной опасностью. Чем выше прочность и удерживающая способность дорожного ограждения, тем больше столкновение с ним сопоставимо с наездом на неподвижное препятствие. Для легковых автомобилей есть опасность отброса транспортного средства от ограждения, что может вызвать столкновение с транспортными средствами, движущимися в том же направлении, и иметь более тяжелые последствия, чем выезд с полосы движения. При этом чем жестче столкновение, тем меньше скорость автомобиля после его отброса от ограждения будет отличаться от скорости до столкновения.

Для повышения безопасности на дорогах необходимо найти компромиссное решение двух противоположных задач: повысить прочность мостовых и дорожных ограждений для повышения их удерживающих способностей и повысить их демпфирующую способность, основанную в настоящее время на деформации и разрушении ограждений, для снижения последствий столкновения с ограждениями.

Таким образом, чтобы ограждение удерживало автомобиль от движения в запрещенном направлении, его конструкция должна быть максимально прочной, а это снижает эффективность рассеяния энергии столкновения, сокращает время удара, что повышает ударные нагрузки. Повышение же диссипативных функций ограждения снижает его удерживающую способность.

Для поиска решения поставленной задачи рассмотрим центральное столкновение твердого тела с неподвижной недеформируемой преградой. Тело

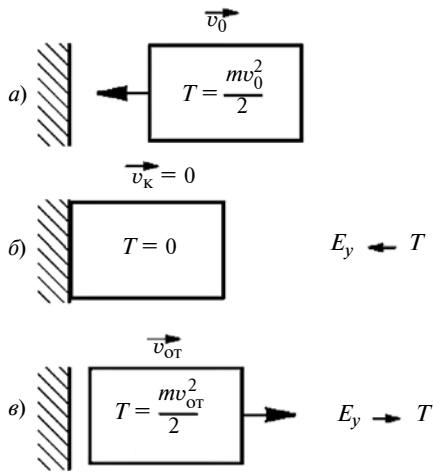


Рис. 1. Последовательность процесса столкновения твердого тела с неподвижной недеформируемой преградой и его состояния:

а — перед столкновением; *б* — полная остановка тела; *в* — отскок тела от преграды

массой m, движущееся со скоростью v_0, обладает кинетической энергией T (рис. 1, *а*). Столкновение имеет два этапа: первый — кинетическая энергия тела полностью переходит в потенциальную энергию упругой деформации, тело останавливается (рис. 1, *б*); второй — переход накопленной энергии упругой деформации в кинетическую энергию тела, отскакивающего в противоположном направлении от первоначального движения со скоростью $v_{от}$ (рис. 1, *в*).

Силу удара определяем по второму закону Ньютона:

$$F = ma = m\frac{v_0 - v_к}{t_с} = m\frac{v_0}{t_с}, \qquad (1)$$

где a — ускорение тела при ударе (в данном случае замедление); v_0 и $v_к$ — начальная и конечная скорости тела при столкновении (в данном случае $v_к = 0$); $t_с$ — продолжительность столкновения.

Удар начинается в момент соприкосновения тела торцом с преградой, при этом скорости точек, находящихся на торце, мгновенно становятся нулевыми. В следующий момент останавливается часть тела, находящаяся в сечении параллельном торцу и фактически прилегающая к нему. Данный процесс последовательно распространяется по всему телу, таким образом, происходит упругая деформация. При упругом ударе продолжительность столкновения равна сумме времени прохождения волны упругой деформации от места контакта с преградой до свободного торца тела (тело упруго деформируется) и времени прохождения волны упругой разгрузки от свободного торца тела до места контакта с преградой, при этом происходит отскок тела от преграды в результате перехода энергии упругой деформации в кинетическую энергию тела. Волны упругой деформации и разгрузки распространяются по телу со скоростью звука, что и определяет чрезвычайно малое время удара, а следовательно, большие ударные нагрузки (F) и возникающие при столкновении перегрузки ($F_{пер}$), определяемые выражением

$$F_{пер} = \sqrt{1 + \frac{a^2}{g^2}} = \sqrt{1 + \left(\frac{v_0}{gt_с}\right)^2}, \qquad (2)$$

где g — ускорение свободного падения.

Анализ выражений (1) и (2) показал, что при прочих равных условиях снизить силу F удара и возникающие перегрузки $F_{пер}$ можно только увеличением продолжительности столкновения.

Рассмотрим столкновение твердого тела с неподвижной недеформируемой преградой, оснащенной упругим элементом (рис. 2, *а*). Считаем, что энергоемкость упругого элемента равна кинетической энергии тела; упругое несовершенство, сопротивление окружающей среды и прочие не учитываем. Столкновение в данном случае состоит из двух этапов: первый — кинетическая энергия T тела полностью переходит в потенциальную энергию П сжатия упругого элемента, тело останавливается (рис. 2, *б*); второй — накопленная упругим элементом потенциальная энергия сжатия переходит в кинетическую энергию тела, которое отскакивает в обратном направлении со скоростью $|v_{от}| = v_0$ (рис. 2, *в*).

Рассматриваемое столкновение отличается от первого тем, что ударяющее тело, преодолевая силу сопротивления упругого элемента за время столкновения проходит расстояние l, что увеличивает время $t_с$ столкновения и уменьшает силу F удара и перегрузки $F_{пер}$. Общим является отскок тела от препятствия со скоростью $|v_{от}| = v_0$.

Третий вариант — твердое тело сталкивается с неподвижной недеформируемой преградой, оснащенной демпфером (рис. 3, *а*), который обеспечивает необратимое рассеяние кинетической энергии. Примерами таких устройств являются тормозные

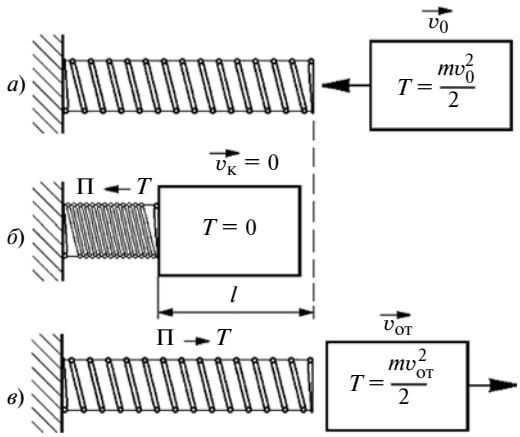


Рис. 2. Последовательность процесса столкновения твердого тела с неподвижной недеформируемой преградой, оснащенной упругим элементом (пружиной), и его состояния:

а — перед столкновением; *б* — полная остановка тела; *в* — отскок тела от преграды

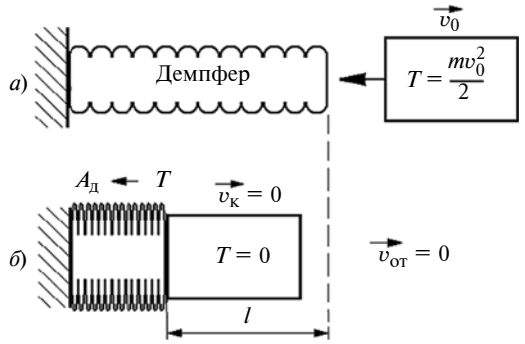


Рис. 3. Последовательность процесса столкновения твердого тела с неподвижной недеформируемой преградой, оснащенной демпфером, и его состояния:

а — перед столкновением; *б* — полная остановка тела

системы автомобилей, гидравлические амортизаторы, пластические энергопоглощающие элементы и т. п. Принимаем, что энергоемкость демпфера равна кинетической энергии тела.

В данном случае столкновение состоит из одного этапа, при котором в результате работы $A_д$ демпфера происходит полное и необратимое рассеяние кинетической энергии T тела, которое останавливается (рис. 3, *б*), т. е. отсутствует отскок тела от препятствия. В результате работы демпфера увеличивается время $t_с$ столкновения, что уменьшает силу F удара и перегрузки $F_{пер}$.

Анализ рассмотренных вариантов столкновения позволил сформулировать главные принципы эффективного дорожного ограждения:

главная функция ограждения — не позволять транспортному средству двигаться в определенном направлении;

при столкновении ограждение должно полностью и необратимо рассеять кинетическую энергию транспортного средства;

при столкновении возникающие нагрузки не должны превышать допустимые.

Для обеспечения требуемой удерживающей способности ограждение необходимо оснастить прочным неразрушаемым ограничительным элементом, например, профилированной полосой или тросом. При этом не исключается деформация данного элемента в допустимых пределах. Для рассеяния кинетической энергии и увеличения времени столкновения необходимы эффективные энергопоглощающие элементы и обеспечение определенного хода демпфера [3].

Дорожные и мостовые ограждения используют уже давно. При этом постоянно ведется поиск новых технических решений, но оптимальных конструкций еще не создано. Сегодня практическое применение находят ограждения простых конструкций. Это обусловлено огромной протяженностью автомобильных дорог и ограниченностью средств на производство, установку и ремонт ограждений. Наиболее распространенными конструкциями являются односторонние и двусторонние дорожные и мостовые ограждения из профилированных прокатных полос, соединенных с опорами жестким креплением.

На рис. 4, *а*, *б* представлены ограждения простых конструкций для разделения потоков встречных направлений.

В ограждении на рис. 4, *а* между профилированными полосами двух односторонних дорожных ограждений имеется большое свободное пространство. С каждой стороны дороги имеется сплошная линия, отделяющая непредназначенный для движения и остановки транспортных средств участок, что провоцирует недисциплинированных водителей на нарушение, в первую очередь, мотоциклистов.

На рис. 4, *б* профилированные полосы двухстороннего дорожного ограждения соединены между собой профилями, обеспечивающими жесткость конструкции и являющимися узлами крепления профилей к опорам ограждения.

Дорожные ограждения, устанавливаемые на обочинах дорог и мостовые ограждения, при всем многообразии конструкций аналогичны односторонним дорожным ограждениям, представленным на рис. 4, *б*.

Общим для рассматриваемых конструкций является возможность их оптимизации путем замены жестких узлов крепления профилированных прокатных полос с опорами ограждения на узлы крепления, обеспечивающие требуемую несущую способность в режимах ожидания и рассеяние кинетической энергии при столкновении [4]. Наличие свободного пространства между профилированными полосами, а также возможность выноса профи-

а)

б)

Рис. 4. Одностороннее (*а*) и двухстороннее (*б*) дорожные ограждения

лированных полос относительно опор ограждений позволяет обеспечить большой ход демпфирования, необходимый для эффективного рассеяния кинетической энергии транспортного средства при столкновении с ограждением. При этом удерживающая способность ограждения не снизится, так как она будет обеспечиваться профилированными полосами и опорами ограждения. А с учетом рассеяния энергии и увеличения продолжительности удара, а следовательно, снижения ударной нагрузки будет увеличиваться удерживающая способность ограждения.

При разработке энергопоглощающего узла крепления ограждения главными являются выбор оптимального способа рассеяния энергии и определение конструктивно-компоновочной схемы энергопоглощающего узла.

Требования к энергопоглощающим узлам крепления ограждения:

высокая удельная энергоемкость;

независимость силовой характеристики от скорости воздействия и температуры окружающей среды;

простота конструкции и ее технологичность;

простота технического обслуживания.

С учетом того, что столкновения носят случайный характер, а диапазон температур окружающей среды очень большой (отрицательные температуры зимой и положительные летом), данным требованиям отвечают демпферы, в которых рассеяние энергии удара осуществляется в результате пластического деформирования металлических элементов.

Анализ разных видов деформаций по их реализации в энергопоглощающих узлах показал целесообразность использования в демпферах деформации кручения цилиндрических элементов (торсионов) в пластической области диаграммы кручения [5].

Во-первых, по сравнению с другими видами деформаций удельная диссипация энергии (энергопоглощение, отнесенное к объему демпфирующего элемента) в данных демпферах максимальная, так как кручение по всему объему элемента вызывает одинаковое пластическое деформирование по всей длине. При этом в поперечном сечении обеспечивается равномерное напряженное состояние.

Во-вторых, при изгибе пластическая деформация и напряжения неравномерны по длине стержня и, как правило, сосредоточены в пластическом шарнире, что значительно снижает удельное энергопоглощение. В отличие от сжатия, при скручивании цилиндрические стержни не теряют устойчивости. В отличие от продольного растяжения, при кручении не образуется шейка. Следовательно, для большого амортизационного хода в энергопоглощающих узлах ограждения нерационально применять деформации сжатия, продольного растяжения и изгиба.

В-третьих, деформация кручением позволяет получить силовую характеристику, аналогичную

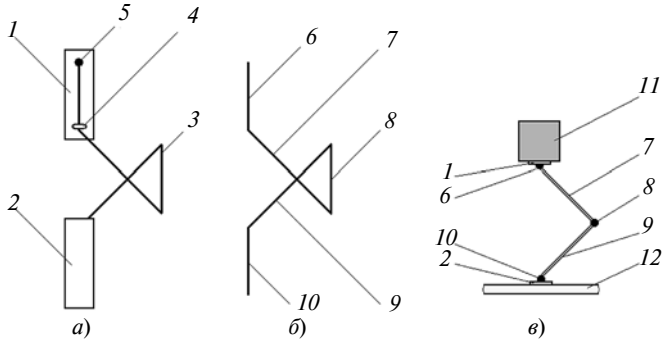


Рис. 5. Схемы простейшего энергопоглощающего устройства (*а*), его энергопоглощающего элемента (*б*) и установки устройства в дорожном ограждении (*в*):

1, *2* — основания энергопоглощающего узла; *3* — энергопоглощающий элемент; *4* — втулка; *5* — сварное соединение концов энергопоглощающего элемента с основаниями; *6*, *8*, *10* — рабочие участки энергопоглощающего элемента; *7*, *9* — раскосы (рычаги) энергопоглощающего элемента; *11* — опора ограждения; *12* — профилированная полоса

сухому трению (постоянная сила при перемещении), которая обеспечивает при заданном ходе минимальную нагрузку.

В энергопоглощающих узлах с деформацией кручением поступательное движение с помощью рычагов преобразуется во вращательное движение, обусловливающее скручивание торсионов.

На рис. 5, *а* представлен простейший энергопоглощающий узел, который состоит из оснований *1* и *2*, соединенных энергопоглощающим элементом *3*, который изготовлен из металлического прутка и имеет три рабочих параллельных участка *6*, *8*, *10*, соединенные между собой раскосами *7* и *9* (рис. 5, *б*). При сборке узла в цилиндрические отверстия втулок *4* вставляют рабочие части *6* и *10*, концы которых крепятся к основаниям сваркой (поз. *5*).

На рис. 5, *б* представлена схема установки энергопоглощающего узла крепления в дорожном ограждении (вид сверху).

Работа энергопоглощающего узла при столкновении транспортного средства с ограждением представлена на рис. 6, *а—в*.

В исходном состоянии раскосы *3*, *5* разведены на угол β, при этом максимальный ход демпфирования составляет X_{max} (см. рис. 6, *а*). Воздействие ударной нагрузки на профилированную полосу *7* (направление показано стрелкой), которая превышает суммарную силу сопротивления скручиванию рабочих частей *2*, *4*, *6* энергопоглощающего элемента, вызывает ее перемещение относительно неподвижной опоры *1*, при котором раскосы *3* и *5* сходятся. Схождение раскосов вызывает скручивание рабочих частей, при котором происходит рассеяние кинетической энергия транспортного средства. Если максимальная суммарная энергоемкость рабочих частей превосходит кинетическую энергию транспортного средства, то энергопоглощающий узел после остановки ограждением транс-

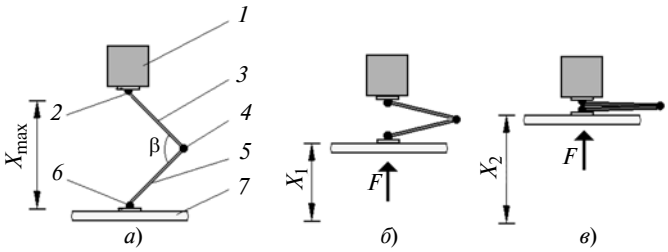


Рис. 6. Схемы исходного состояния (*а*), частичного деформирования (*б*) и полного срабатывания (*в*) энергопоглощающего узла при столкновении транспортного средства с ограждением:

1 — опора ограждения; *2*, *4*, *6* — рабочие участки энергопоглощающего элемента; *3*, *5* — раскосы (рычаги); *7* — профилированная полоса; x_1, x_2 — перемещения профилированной полосы относительно опоры ограждения

портного средства останется в частично деформированном состоянии (рис. 6, *б*). При их равенстве кинетическая энергия транспортного средства, рассеется при максимально возможном ходе демпфера $X_2 = X_{max}$, т. е. демпфирование осуществится полностью (рис. 6, *в*). Если кинетическая энергия транспортного средства превосходит максимальную суммарную энергоемкость рабочих частей энергопоглощающего узла, как и в предыдущем случае, рассеет максимально возможное количество энергии, но процесс столкновения продолжится. Это можно рассматривать как отдельное столкновение с обычным ограждением, только со значительно меньшей скоростью транспортного средств, а следовательно, с меньшей кинетической энергией и меньшими последствиями.

Увеличение диаметра энергопоглощающих элементов, изготовление их из материалов с большим пределом текучести, применение упрочняющей термической обработки повышают энергопоглощающую способность узла крепления в результате повышения момента сопротивления скручиванию. При этом для сохранения силовой характеристики, чтобы ограждение не стало недеформируемой преградой, надо увеличить плечо действующей силы увеличением длины раскосов, а следовательно, расстояния между опорой и профилированной полосой. Увеличить энергопоглощение можно повышением числа рабочих элементов узла.

На рис. 7 представлена конструкция энергопоглощающего узла с двумя энергопоглощающими элементами [6].

На рис. 8 показан макет ограждения с энергопоглощающими узлами данной конструкции и возможные варианты установки узлов крепления в ограждениях: *1* — один узел крепления соединяет профилированную полосу с опорой; *2* — узел крепления соединяет профилированные полосы; *3* — два узла крепления соединяют профилированную полосу с опорой.

На рис. 9 представлена конструкция дорожного ограждения, в которой профилированные полосы *3* крепятся к опорам *1* энергопоглощающим модулем *2*, в состав которого входят четыре энергопоглощающих торсионных элемента [7], каждый из которых состоит из четырех рабочих частей (*2*, *4*, *6*, *7*) (рис. 10, *а*), соединенных разведенными на заданный угол раскосами *5* и *9*. Для исключения нарушения параллельности рабочих части *6*, *7* установлен фиксатор *8*, не препятствующий их скручиванию.

Если сила *F* удара (рис. 10, *б*) превышает суммарную силу сопротивления скручиванию рабочих частей, то основания энергопоглощающего элемента сближаются на расстояние *x*, что обусловливает схождение раскосов и скручивание рабочих частей на угол φ и рассеяние кинетической энергии транспортного средства.

Сегодня на некоторых участках дорог устанавливают тросовые ограждения, разделяющие в основном транспортные потоки встречных направлений, для предотвращения отклонений транспортных средств от заданного направления следования (рис. 11, *а*, *б*). Они обладают высокой удерживающей способностью, но низкой энергоемкостью. Поэтому бóльшая часть энергии удара будет расходоваться на работу деформации и разрушения элементов автомобиля и опор ограждения. При высоких скоростях столкновения транспортного средства с тросовым ограждением высокая удерживающая способность при минимальном прогибе станет причиной возникновения недопустимых перегрузок. Повысить демпфирующие свойства тросовых ограждений можно установкой на концевых

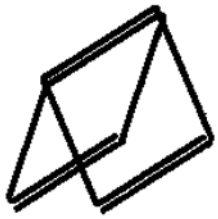


Рис. 7. Энергопоглощающий узел с двумя энергопоглощающими элементами

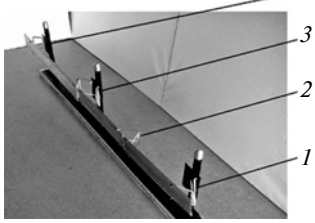


Рис. 8. Варианты установки энергопоглощающих узлов в ограждениях

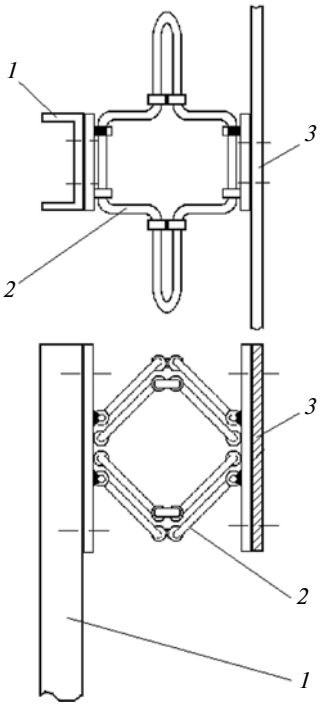


Рис. 9. Дорожное ограждение с энергопоглощающим модулем:

1 — опора ограждения; *2* — профилированная полоса; *3* — энергопоглощающий модуль

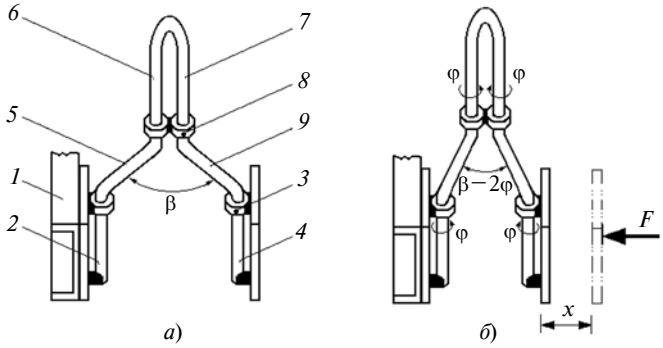


Рис. 10. Торсионный элемент энергопоглощающего модуля (*а*) и схема его работы (*б*):

1 — опора ограждения; *2*, *6*, *7*, *4* — рабочие части торсионного элемента; *5*, *9* — раскосы (рычаги) торсионного элемента; *8*, *3* — фиксаторы; β — угол установки торсионного элемента; φ — угол скручивания рабочих частей; *x* — перемещение профилированной полосы относительно опоры ограждения

Рис. 11. Тросовое ограждение (*а*) и его концевой участок (*б*)

участках энергопоглощающих устройств, например, дорнов, обеспечивающих рассеяние энергии воздействия в результате поперечного растяжения трубчатых элементов.

Модернизированное тросовое ограждение (рис. 12) состоит из стойки *1* с отверстиями, через которые проходят стальные тросы *2*, их концы, разведенные направляющим устройством *4*, соединены с дорновыми энергопоглощающими модулями *5*. Крышки последних крепятся к анкерным блокам *6* [8]. Заданное натяжение тросов обеспечивается стяжными устройствами *3*.

На рис. 13 представлена работа дорнового энергопоглощающего модуля при столкновении транспортного средства с модернизированным тросовым ограждением (для наглядности поперечное растяжение преувеличено). В исходном состоянии (см. рис. 13, *а*) в результате натяжения троса *3* стяжным устройством материал трубчатого рабочего элемента *2* в зоне контакта с дорном *1* находиться в упруго деформированном состоянии. Если столкновение транспортного средства с тросовым энергопоглощающим ограждением не критично (невысокая скорость, небольшой угол столкновения), ограждение сработает так же, как и аналог, т. е. не позволит транспортному средству отклониться от пути следования. В трубчатом рабочем элементе будут иметь место упругие напряжения, конструкция ограждения не деформируется. Если столкновение значительное, будет задействована демпфирующая система (см. рис. 13, *б*). Если сила *F* удара превысит силу сопротивления поперечному растяжению одного энергопоглощающего модуля, то дорн *1* переместится в трубчатом элементе *2*.

Кинетическая энергия транспортного средства расходуется на работу поперечного растяжения трубчатых элементов. Движение дорна будет осуществляться или до полного рассеяния кинетической энергии транспортного средства, тогда дорновый модуль останется в промежуточном положении или до тех пор, пока ход демпфирования не будет исчерпан полностью (см. рис. 13, *в*).

Если дорновые модули исчерпают ход демпфирования, а кинетическая энергия транспортного средства полностью не рассеется, работа тросового ограждения будет аналогична работе обычных тросовых ограждений. При этом в результате частичной диссипации кинетической энергии транспортного средства сила воздействия на ограждение уменьшится, что повысит удерживающую способность ограждения.

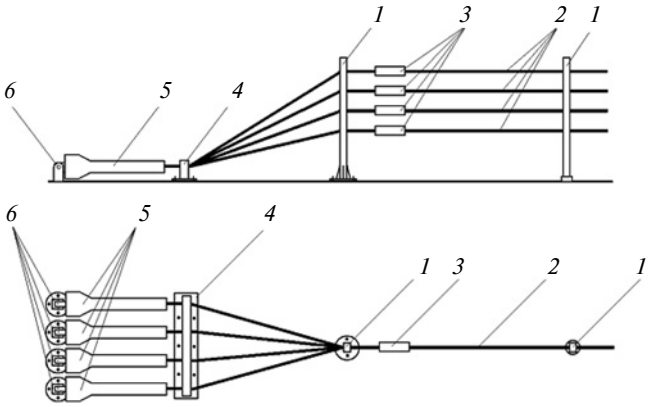


Рис. 12. Модернизированное тросовое ограждение:

1 — стойки; *2* — стальные тросы; *3* — стяжные устройства; *4* — направляющее устройство; *5* — дорновые энергопоглощающие модули; *6* — крепление дорновых энергопоглощающих модулей к анкерным блокам

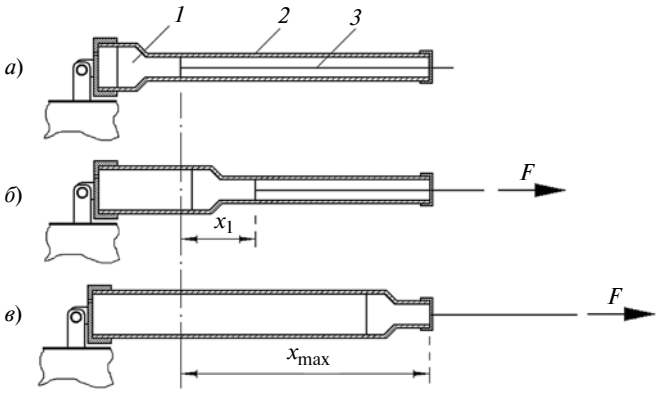


Рис. 13. Схемы исходного состояния (*а*), частичного деформирования (*б*) и полного срабатывания (*в*) дорнового энергопоглощающего модуля:

1 — дорн; *2* — трубчатый рабочий элемент; *3* — стальной трос

УДК 621.891

А. К. ГОЛУБКОВ (Авиационная корпорация "Рубин", г. Балашиха), А. В. МОРОЗОВ, канд. техн. наук, А. Г. ШПЕНЕВ, канд. физ.-мат. наук (Институт проблем механики им. А. Ю. Ишлинского РАН, г. Москва), e-mail: morozovalexei@mail.ru

Исследование трибологических свойств материалов, применяемых в направляющих и накладках узла трения многодискового авиационного тормозного механизма[1]

Исследованы трибологические свойства в паре трения накладка—направляющая в многодисковом тормозном механизме при торможении. Испытывали образцы из двух сталей (10Х18Н9БЛ и 38ХА) с упрочненным поверхностным слоем и без него.

Ключевые слова: многодисковый тормозной механизм, трение, направляющие, коэффициент трения.

The tribological properties in the lining-guide friction pair in a multi-disc braking mechanism under braking are studied. Samples were tested from two steels (10Х18Н9БЛ and 38ХА) with a hardened surface layer and without it.

Keywords: multi-disc brake mechanism, friction, guides, friction coefficient.

Большие массы и высокие скорости самолетов обусловливают значительные нагрузки на тормозные механизмы. Поэтому к надежности и эффективности многодисковых авиационных тормозных механизмов предъявляются высокие требования. Их работа во многом зависит от применяемых фрикционных материалов и эффективности передачи давления от блока цилиндров к опорному диску. Возникающие при этом потери давления обусловлены трением в узлах зацепления вращающихся и неподвижных тормозных дисков с ободом колеса и корпусом тормозного механизма. Как правило, для повышения ресурса углеродных тормозных дисков в зонах зацепления их армируют металлическими накладками, контактирующими с направляющими колеса и тормозного механизма. Таким образом, потери давления определяются силой трения в данных парах трения. Потери давления возникают при перемещении дисков вдоль направляющих и в процессе торможения. Данные потери зависят и от числа дисков в тормозном механизме. Так, при одинаковых условиях эксплуатации и используемых материалах потери давления в тормозном механизме с одиннадцатью дисками составля-

[1] Работа выполнена по государственному заданию № АААА-А17-117021310379-5 и программы президиума РАН 1.1.16 № АААА-А17-117121120017-2.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 30

Дорновые энергопоглощающие модули обладают высокой удельной энергоемкостью и стабильностью. Величина энергопоглощения и ход демпфирования дорнового модуля определяются конструктивными размерами (длиной, диаметром и толщиной трубчатых элементов), углом конусности дорна, а также зависят от материала трубчатых элементов.

Для определения параметров энергопоглощающих устройств ограждений в каждом конкретном случае можно использовать статистические данные по выявленным очагам аварийности и показателям столкновений. Для максимального снижения последствий столкновений можно применять ступенчатые энергопоглощающие устройства, состоящие из двух-трех поясов демпфирования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Стратегия** безопасности дорожного движения в РФ на 2018—2024 гг.: Распоряжение Правительства РФ от 8 января 2018 г. № 1-р.

2. **В. Н. Иванов.** Все об активной и пассивной безопасности автомобиля. М.: Астрель: АСТ, 2005. 175 с.

3. **Повышение** энергопоглощающей способности дорожных ограждений / А. С. Решенкин, В. А. Тихомиров, М. С. Дубовской и др. // Theoretical & Applied Science. 2015. № 10. С. 105—110.

4. **Научно-методический** аппарат оценки защищенности оборудования и аппаратуры подвижных агрегатов ракетных комплексов с применением модульного принципа создания ударопоглощающих устройств на базе торсионных амортизаторов / С. М. Першин, А. Н. Сова, В. А., Тихомиров С. Н. Шевченко // Двойные технологии. 2016. № 2 (75). С. 60—65.

5. **Тихомиров А. Г., Тихомиров В. А.** Противоударная защита транспортных средств // Грузовик. 2006. № 7. С. 58—60.

6. **Пат. 51632 Рос. Федерации:** МПК E01F 15/00. Торсионный энергопоглощающий элемент дорожного ограждения.

7. **Пат. 2555728 Рос. Федерации:** МПК E01F 15/00. Энергопоглощающее дорожное ограждение.

8. **Заявка на пат.** № 2018101895 от 18.01.2018. Тросовое энергопоглощающее ограждение.

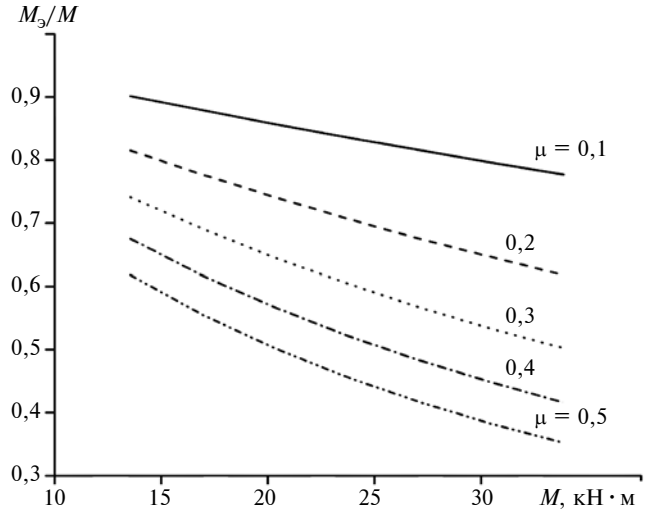


Рис. 1. Зависимости относительного тормозного момента $M_э/M$ от величины тормозного момента M при разных коэффициентах μ трения

ют 4,5÷5,5 МПа, а в тормозном механизме с тремя дисками они не превышают 0,7 МПа.

Стендовые испытания многодисковых тормозных механизмов показали, что эффективный тормозной момент в результате трения в узлах зацепления может быть меньше на 30÷50 % [1, 2] по сравнению с расчетной величиной.

Сила трения в узлах зацепления зависит от нормальной нагрузки, определяемой тормозным моментом, и коэффициента трения материалов сопрягаемых деталей. Это подтверждают расчеты, приведенные в работе [3] (рис. 1), в которой показано, что эффективность торможения снижается с повышением тормозного момента и коэффициента трения. Заметим, что данный расчет носит ориентировочный характер, поскольку не учитывает обратную связь эффективного тормозного момента с условиями трения.

На рис. 1 представлены изменения относительного тормозного момента $M_э/M$ (степень эффективности) в зависимости от величины тормозного момента M при разных коэффициентах трения. Анализ данных зависимостей показал, что для повышения эффективности работы многодисковых тормозных механизмов, особенно к которым предъявляются высокие требования по тормозному моменту, необходимо снижать коэффициент трения в контакте между накладками дисков и направляющими. Этого можно достигнуть использованием соответствующих материалов или нанесением антифрикционных покрытий.

В настоящей работе оцениваются коэффициенты трения при статическом и динамическом состояниях пары трения накладка—направляющая при использовании накладок из сталей двух разных классов в условиях, близких к условиям работы данной пары в авиационном тормозном механизме.

Для исследований использовали образцы двух видов, вырезанные из накладок.

Образец 1 выполнен из аустенитной коррозионно-стойкой стали 10Х18Н9БЛ с поверхностным азотированным слоем толщиной 0,15 мм. Твердость поверхностного азотированного слоя на образцах из коррозионно-стойкой стали составляла 63 *HRC*; твердость основного материала 18 *HRC*.

Образец 2 изготовляли из среднеуглеродистой среднелегированной стали, содержащей: 0,35 % C, 0,65 % Mn, 0,60 % Si, 1,16 % Cr, 0,45 % Mo и 0,32 % V (аналог стали 38ХА). Он также имел упрочненный поверхностный слой толщиной 0,15 мм с твердостью 53 *HRC*; твердость основного материала 33 *HRC*.

В качестве контртела во всех случаях использовали пластину (рис. 2, *а*), вырезанную из направляющей (сталь 50ХФА), размеры которой приведены на рис. 2, *б*.

Среднюю нормальную распределенную нагрузку p на контактирующие поверхности накладок и направляющих рассчитывали по тормозному моменту $M_т$, приходящемуся на один шип, с учетом радиусов действия нормальных сил, которые для вращающегося (ротор) и невращающегося (статор) дисков разные, а также площади контакта между накладкой и направляющей:

$$p = M_т/(NnRS), \quad (1)$$

где N — число пар трения; n — число шипов на одном диске; R — радиус действия нормальной силы; $S \approx 0{,}5$ см^2 — площадь контакта между накладкой и направляющей.

Для тормозного механизма по формуле (1) рассчитали давления: для ротора $p_р$ = 13,8 МПа, для

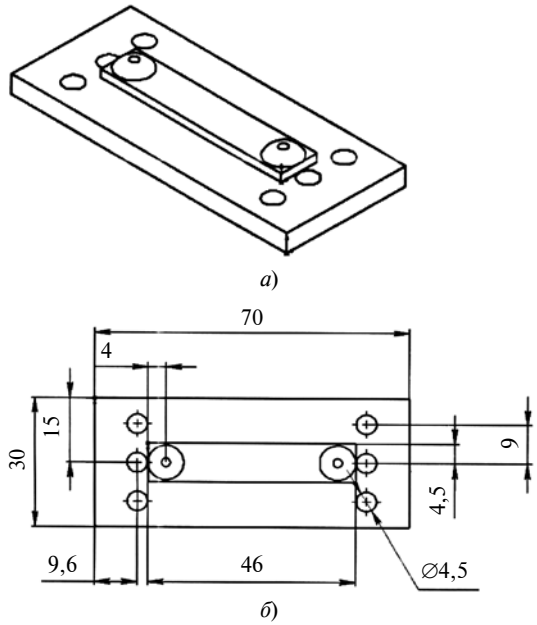


Рис. 2. Пластина в держателе (*а*) и ее параметры (*б*)

статора $p_{ст}$ = 21,4 МПа. Заметим, что давление на торцевой поверхности накладки существенно превышает давление на рабочей поверхности диска, которое составляет не более 1 МПа.

При определении скорости скольжения при коэффициенте трения в динамическом режиме использовали скорость смыкания дисков в тормозном механизме, в котором нажимной диск до смыкания проходит расстояние 45 мм за 0,8 с (установлено экспериментально), т. е. его скорость составляет 6 мм/с.

Для экспериментов были изготовлены цилиндрические образцы диаметром ≈6,8 мм и высотой 5 мм из двух исследуемых материалов, которые испытывали при давлении 5,5 МПа. Для снижения номинальной площади контакта с целью обеспечения более высокого давления (22 МПа) рабочие торцы образцов обработали до формы усеченных конусов с углом ≈6°; образец контактировал с пластиной торцом диаметром 3 мм. Испытывали образцы с упрочненным слоем рабочей поверхности и без него, удаляя его шлифованием на глубину 0,5 мм на установке Struers. Перед шлифованием образцы заливали смолой, после ее отверждения шлифовали в течение 4 мин шлифовальной бумагой 220 под нагрузкой в 15 Н.

Для обезжиривания и удаления загрязнений образцы очищали в ультразвуковой ванне в толуоле, затем в 95 %-м этиловом спирте. Притирку исследуемой пары образцов не проводили, так как могло произойти истирание имеющегося покрытия, что было недопустимо.

Исследования коэффициентов трения при статическом и динамическом режимах выполняли на трибометре CETR UMT-2 — приборе для определения фрикционных свойств различных материалов, который позволяет реализовать схему контактного взаимодействия палец—пластина. Палец — неподвижным цилиндрический образец. Пластина совершает линейное поступательное движение относительно прижатого к ней торцом цилиндрического образца. Исследования на данном приборе можно проводить при скоростях 0,001÷10 мм/с и нормальных нагрузках 2÷200 Н на воздухе и в жидкой среде. Путь трения образца задают, исходя из задачи исследования. При фрикционном взаимодействии исследуемой пары непрерывно записываются нормальные силы, сближение изнашиваемых тел, силы трения, пути трения и значения коэффициента трения.

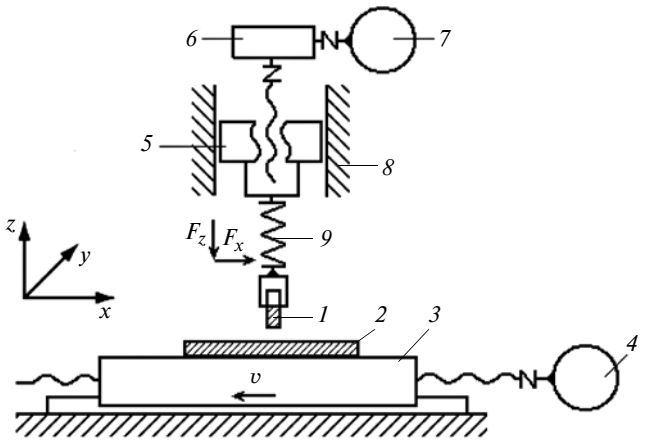


Рис. 3. Схема работы трибометра UMT-2

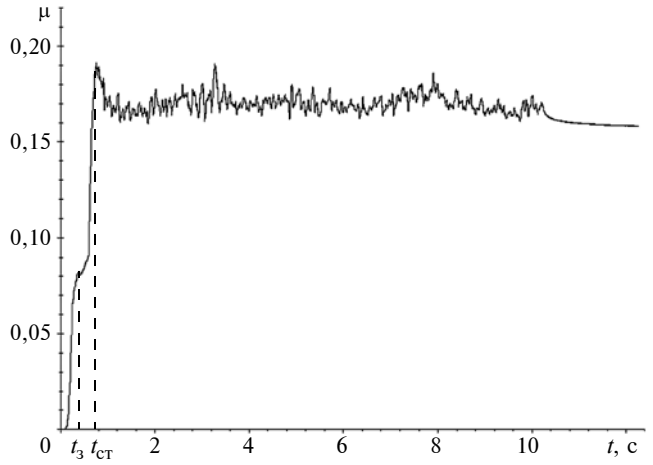


Рис. 4. Зависимость коэффициента трения μ от времени *t* испытания при *v* = 1 мм/с и *p* = 5,5 МПа:

$t_з$ — время выбора зазоров в самоустанавливающемся держателе образца; $t_{ст}$ — время статического режима

На рис. 3 представлены прибор, испытуемый узел трения и трибометр.

Методика испытаний приведена в работе [4]. Контртело — пластина *2* находится на столе *3*, который осуществляет линейное поступательное движение с помощью привода *4*. Образец *1* устанавливают в держателе, который смонтирован на упругом элементе *9*. Держатель обеспечивает самоустановку торца образца относительно поверхности трения. Нормальная нагрузка передается на образец через двухкомпонентный тензодатчик посредством винтовой передачи *5*, которая приводится в движение редуктором *6* и электродвигателем *7*.

Для оценки коэффициента трения $\mu_{ст}$ при статическом режиме была выбрана скорость скольжения *v* = 1 мм/с. Постоянное нормальное давление составляло 5,5 МПа. Путь трения задавали $S_{тр}$ = 10 мм, что соответствовало пути трения при эксплуатации исследуемой пары. Статический коэффициент трения определяли как значение коэффициента трения в момент перехода от сцепления к скольжению (рис. 4).

Во всех экспериментах реализовывали однонаправленное поступательное движение, характерное для исследуемого узла трения. Для изучения влияние нагрузки на коэффициент трения при динами-

ческом режиме было выбрано два давления: 5,5 и 22 МПа.

На рис. 5 представлено изменение коэффициента трения за время эксперимента при нормальной нагрузке 200 Н. За 0,9 с исследуемый образец проходит расстояние ≈4 мм и выходит на режим скольжения с постоянной скоростью. В интервале времени $0,9 > t > 2,6$ вычисляли средний коэффициент трения (среднее квадратическое отклонение).

В таблице представлены значения коэффициентов трения при перемещениях накладок по направляющей в многодисковом тормозном механизме при торможении для образцов (накладок) из сталей 10Х18Н9БЛ и 38ХА.

Анализ полученных данных показал, что образцы 2 с упрочненным поверхностным слоем имеют стабильный коэффициент трения 0,2÷0,3 во всех диапазонах исследуемых давлений (0,5÷22 МПа) при скоростях скольжения 1÷6 мм/с. Коэффициент трения для статического режима составлял 0,20÷0,25. После удаления упрочненного поверхностного слоя на глубину 0,5 мм коэффициент трения увеличился до 0,6÷0,7.

Образцы 1 имели нестабильные коэффициенты трения для статического и динамического режимов, которые по мере увеличения пути трения увеличились до 0,4÷0,6 во всех диапазонах исследуемых давлений и скоростей скольжения. При этом азотирование, которое повышало твердость, не снижало коэффициент трения.

Полученные результаты указывают на то, что высокое значение коэффициента трения для накладок из стали 10Х18Н9БЛ с азотированной поверхностью по стали 50ХФА может быть причиной высоких потерь тормозного момента в авиационном тормозном механизме.

Значения коэффициентов трения скольжения для образцов 1 (числитель) и 2 (знаменатель) с упрочненным слоем и без него при разных нагрузках

Номер испытания	*p*, МПа				
	5,5*	5,5	22	5,5	22
	Образцы с упрочненным слоем			Образцы без упрочненного слоя	
1	0,25/0,19	0,19/0,17	0,20/0,18	0,33/0,27	0,37/0,29
2	0,33/0,20	0,23/0,22	0,21/0,20	0,41/0,35	0,42/0,40
3	0,28/0,21	0,22/0,23	0,22/0,21	0,38/0,48	0,43/0,28
4	0,31/0,19	0,24/0,24	0,24/0,24	0,41/0,54	0,44/0,29
5	0,34/0,19	0,26/0,27	0,26/0,25	0,42/0,61	0,40/0,38
6	0,36/0,22	0,28/0,27	0,30/0,28	0,46/0,69	0,42/0,52
7	0,37/0,23	0,31/0,27	0,37/0,28	0,46/0,71	0,42/0,55
8	0,38/0,24	0,33/0,27	0,40/0,29	0,46/0,70	0,54/0,59
9	0,40/0,25	0,40/0,29	0,43/0,29	0,47/0,71	0,56/0,61
10	0,40/0,25	0,36/0,28	0,47/0,30	0,50/0,72	0,55/0,66
Среднее значение	0,34/0,22	0,28/0,25	0,31/0,25	0,43/0,58	0,46/0,46

Примечание. Давление 5,5* означает при статистическом режиме, остальные при динамическом.

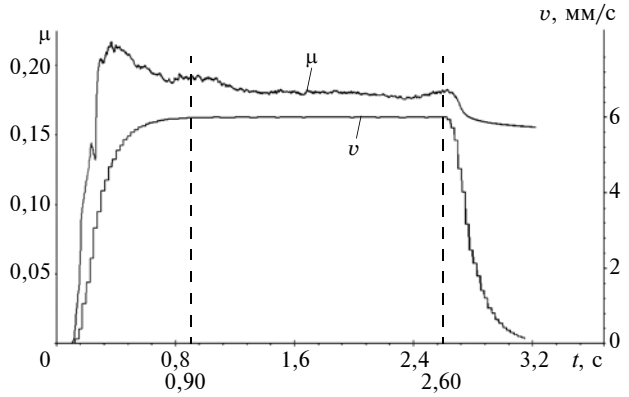


Рис. 5. Зависимости коэффициента трения μ и скорости *v* скольжения от времени *t* испытания при *v* = 6 мм/с, *p* = 22 МПа, $S_{тр}$ = 15 мм

Заметим, что коэффициент трения $\mu > 0,3$ для данной пары трения соответствует значению для фрикционных материалов, поэтому их использование не является оптимальным, особенно при высоких давлениях. Высокий коэффициент трения при статического режиме в данной паре трения может привести к заклиниванию и перекосу дисков. Это снизит тормозной момент и может даже стать причиной разрушения дисков [2].

Использование накладок из стали 38ХА с упрочненным поверхностным слоем, обеспечивающим низкий коэффициент трения в паре с направляющей, предпочтительнее.

Исследования по снижению коэффициента трения в паре накладка—направляющая следует продолжать. Решениями данной задачи могут стать: рациональный выбор материалов для данной пары трения; применение термической и других видов обработок рабочих поверхностей; нанесение на них антифрикционных покрытий.

В авиационных тормозных механизмах также используют стальную направляющую в паре с накладкой из композиционного углеродного материала. Исследование коэффициента трения для данной пары трения также имеет практический интерес.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **РТМ 24.090.19—76.** Машины подъемно-транспортные. Тормоза механические. Методы расчета.

2. **Албагачиев А. Ю.** Трибологические показатели покрытий деталей транспортных машин // Вестник науч.-техн. развития. 2015. № 1 (89). С. 3—7.

3. **Авиационные** тормоза с углеродными фрикционными дисками / Е. И. Крамаренко, В. В. Кулаков, А. М. Кенигфест и др. // Трение и износ. 2006. № 3. С. 290—298.

4. **Морозов А. В.** Экспериментальное определение статического и динамического коэффициентов трения скольжения эпиламированных материалов // Трение и износ. 2014. № 2. С. 114—120.

УДК 620.162

Е. А. ПАМФИЛОВ, П. Г. ПЫРИКОВ, доктора технических наук, Г. А. ПИЛЮШИНА, канд. техн. наук (Брянский ГТУ), В. А. ДАНИЛЮК, д-р филос. (Бэйханский университет, Китай, Пекин), e-mail: pyrikovpg@mail.ru

Применение магнитоупорядоченных электролитических покрытий для повышения эксплуатационных свойств элементов гидравлических систем

Предложено нанесение износостойких покрытий на элементы гидравлических систем путем их осаждения в магнитном поле. Разработан способ управления остаточными напряжениями и механическими свойствами формированием кристаллографической анизотропии.

Ключевые слова: гидравлическая система, магнитное поле, электролитическое покрытие, износостойкость, анизотропия, механические свойства.

It is proposed to apply wear-resistant coatings on the elements of hydraulic systems by depositing them in a magnetic field. A method for controlling residual stresses and mechanical properties by the formation of crystallographic anisotropy is developed.

Keywords: hydraulic system, magnetic field, electrolytic coating, wear resistance, anisotropy, mechanical properties.

Надежность работы гидравлических приводов, к которым относятся агрегатированные узлы насосных станций, распределительная аппаратура, следящие и силовые системы, во многом зависит от окислительных, механических и молекулярно-механических воздействий, которые они испытывают при эксплуатации, приводящих к потере герметичности и кинематическим нарушениям, что снижает технологическую стабильность систем.

Для повышения противоизносных и противоокислительных свойств поверхностных слоев деталей часто применяют различные способы электролитической обработки. Сопрягаемые элементы сложноконтурных прецизионных пар трения, работающие в условиях значительных тепловых и механических нагружений и испытывающие многоцикловую усталость (например, опорные шейки кулачковых валов, шейки шатунов, детали золотниковых механизмов и гидрозамков), подвергают электролитическому хромированию.

Однако эффективность электролитического осаждения покрытий неоднозначна. Основная сложность при электролизе заключается в формировании благоприятных сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое или их минимизации, чтобы исключить растрескивание покрытия при эксплуатации, с сохранением прочности и высокой твердости покрытия.

Одним из решений данной задачи является применение магнитоупорядоченного осаждения покрытия на основании магнитной анизотропии кристаллических состояний большинства осаждаемых металлов. Для обоснования режимов и способов обработок целесообразно проанализировать причины потери работоспособности некоторых элементов гидравлических приводов и особенности полеориентированного кристаллообразования во внешне индуцируемых магнитных полях.

В аксиально-поршневых насосах отказы наступают в результате искривления шатунов, изнашивания сферических и торцевых поверхностей (рис. 1), поршневых отверстий, посадочных мест в блоке цилиндров, шеек валов, центрального шипа, шлицов, поршней. Шестеренные насосы выходят из строя в результате изнашивания втулок (рис. 2), внутренней поверхности и посадочных мест корпуса и крышек. Повторяющиеся ударные нагрузки, вызванные высоким давлением, приводят к усталостному изнашиванию и загрязнению системы продуктами изнашивания [6].

В стальном блоке цилиндров с бронзовыми втулками и на втулке распределителя, как правило, наблюдаются прижоги и задиры (см. рис. 1, *в*, *г*), возникающие в результате превышения допустимой частоты вращения, нарушения режима жидкостного трения, разрушения масляной пленки между поршнем и втулкой блока, а также между распределителем и шипом вследствие попадания абразивных частиц.

Изнашивание сферических поверхностей блока цилиндров и распределителя (см. рис. 1, *а*, *б*) происходит из-за попадания загрязняющих частиц в рабочую жидкость, что нарушает плотное прилегание сферы блока цилиндров и распределителя, герметичность между соседними отверстиями блока

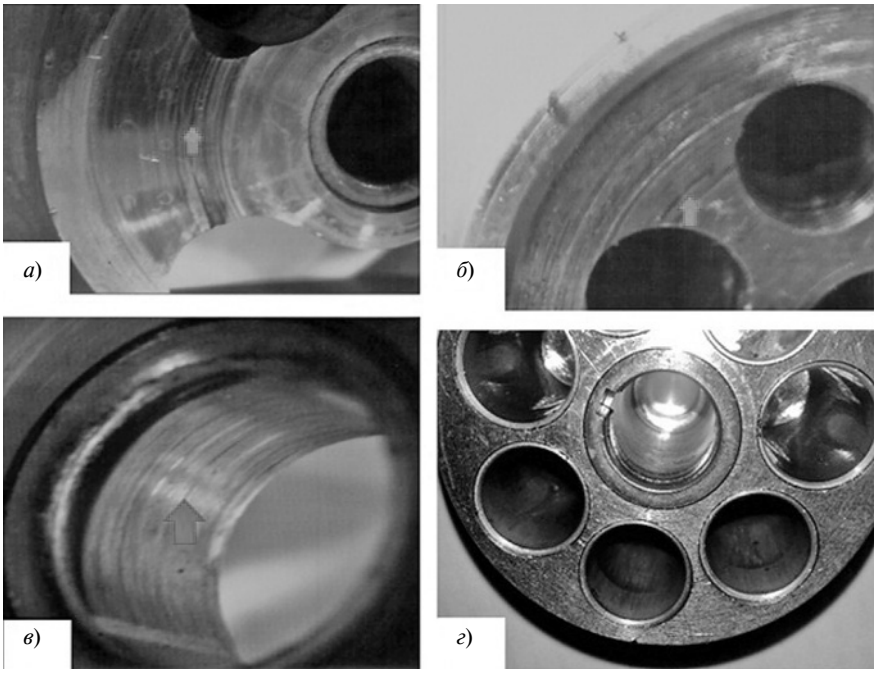


Рис. 1. Характерные износы деталей аксиально-поршневых насосов:
а — распределителя; *б* — блока цилиндров; *в* — втулки распределителя; *г* — втулок под поршни

цилиндров, что обусловливает снижение подачи насоса.

Детали шестеренного насоса испытывают динамические нагрузки, приводящие к изнашиванию подшипников и снижению подачи и даже к отказу. Наблюдаются изнашивания рабочих поверхностей зубчатых колес (см. рис. 2), увеличение торцевых зазоров в результате изнашивания сопрягаемых поверхностей зубчатых колес и опорных втулок (рис. 3), на которых образуются кольцевые задиры и волнистость. Изнашивание сопровождается колебаниями давлений в системе, неравномерной работой и разгерметизацией. Изнашивание деталей является основной причиной снижения подачи и номинального давления, повышения температуры, которая способствует образованию окисных пленок на поверхностях деталей и усталостным разрушениям.

Основным видом изнашивания деталей насосных установок является коррозионно-механический. Скорость изнашивания зависит от интенсивности образования поверхностных слоев и их разрушения в процессе трения [7].

На рис. 4 показана схема формирования покрытия многослойной структуры на режущей части инструмента с помощью магнитных полей. В квадратных скобках показаны обозначения кристаллических структур слоев покрытия разных ориентаций. В табл. 1 показаны кристаллографические направления деформации при разных типах кристаллических решеток.

Учитывая ориентирование кристаллических элементов, управляемое направлением магнитного поля [1], структуру покрытия можно представить в виде слоев, отличающихся разной кристаллографической упорядоченностью, которая создает анизотропию механических свойств покрытия [5]. Это позволяет путем комбинации толщин слоев получать покрытия с требуемыми свойствами с учетом эксплуатационных нагрузок F (табл. 2).

Многозональная структура покрытия обеспечивается послойным осаждением материала путем изменения направления магнитного поля — от параллельного направления относительно поверхности до направления параллельного вектору эксплуатационной нагрузки F. Продолжительность осаждения при каждом направлении магнитного поля определяется формулой

$$T = 1{,}2h/I,$$

Рис. 2. Износы рабочих поверхностей зубьев шестеренного насоса

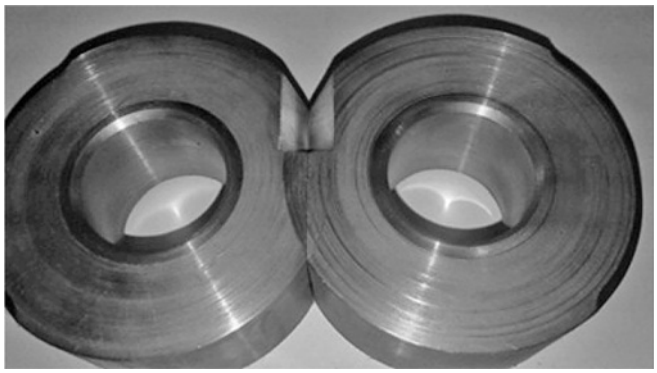


Рис. 3. Износы поверхностей опорных втулок шестеренного насоса

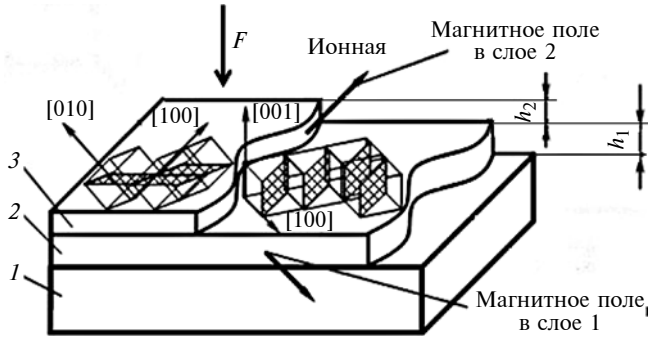


Рис. 4. Схема формирования покрытия многослойной структуры с разными составами химических элементов и их ориентацией (острые скобки) и ориентацией кристаллических элементов (квадратные скобки):

1 — основной материал; *2* — слой с 10÷30 % Cr, Fe, Co—W, Co—Ru; *3* — слой с 20 % Co <100>, 50 % Co <110>, 10÷16 % Zn—Ni

где h — толщина слоя; I — интенсивность формирования покрытия.

Кристаллографическое направление каждого слоя устанавливают в зависимости вида нагружения, обеспечивая максимальное сопротивление деформации, создаваемой данным нагружением.

При параллельном направлении магнитного поля относительно обрабатываемой поверхности в основном материале формируются магнитострикционные напряжения растяжения, которые интенсифицируют диффузионные процессы, повышающие глубину диффузного слоя и адгезионную составляющую.

При нормальном направлении магнитного поля образуются магнитострикционные напряжения сжатия, повышающие плотность покрытия, сжимающие устья микротрещин и препятствующие расслоению. Поэтому в дальнейшем, формируя эксплуатационную толщину покрытия, направление поля переориентируют для обеспечения магнитострикционных напряжений сжатия.

Ориентацией индуцированным магнитным полем оси легчайшего намагничивания в формирующихся кристаллах покрытия обеспечивается требуемое кристаллографическое направление, которое образует заданную текстуру.

При формировании анизотропных электролитических покрытий использовали образцы из сталей 30ХГСА и 38Х2МЮА. Назначения создаваемых покрытий — обеспечение высоких твердости, контактной износостойкости, коррозионной устойчивости, чувствительности к высоким давлениям и температурам.

Для обезжиривания применяли раствор, г/л: 15÷45 едкого натрия; 15÷25 силиката натрия; 10÷20 ортофосфата натрия; 10÷20 пирофосфата натрия; трилон Б2-6; 0,1÷0,5 авироля ОГ. Режим обезжиривания: температура t = 70÷80 °С, продолжительность T = 2÷3 мин, плотность тока J = 3÷10 А/дм^2; снимали травильный шлам (после обезжиривания) при температуре t = 15÷30 °С в течение 2÷5 с в растворе, г/л: 70÷80 HNO_3, 80÷100 H_2SO_4; травильный шлам удаляли при температуре t = 135÷145 °С в течение 30÷150 мин в растворе, г/л: 400÷600 NaOH, 200÷250 $NaNO_2$.

Рабочую поверхность образцов покрывали разными по толщине (от 0,01 до 0,5 мм) слоями хрома при t = 55 °С, J = 55÷65 А/дм^2 и напряжении U = 8÷12 В, используя раствор из 150÷250 г/л CrO_3 и 2,5 г/л H_2SO_4.

Осаждение осуществляли в поле тороидального индуктора.

При осаждении многослойных покрытий между создаваемыми слоями и основным материалом необходимо обеспечить высокую адгезию, которая снижается вследствие остаточных напряжений и эпитаксии [4]. Это вызывает значительные технологические сложности. Добиться требуемой адгезии можно подбором осаждаемых материалов в

Таблица 1

Кристаллографические направления деформации при разных типах кристаллических решеток

Тип кристаллической решетки	Направление легчайшего намагничивания	Свойства		
		упругие	пластические	прочностные
Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК)	[100]	[111]	[100]—([111])	[111]
Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК)	[111]	[111]	[100]—([110])	[110]
Гексагональная решетка (ГПУ)	[0001]	[1000]	[0001]—([2110])	[0001]

Таблица 2

Преимущественные виды деформации при разных кристаллографических направлениях в зависимости от кристаллической решетки

Тип кристаллической решетки	Кристаллографическое направление				
	<100>	<111>	<110>	<1000>	<0001>
Объемно-центрированная кубическая решетка (ОЦК)	П Р	У УП Р	—	—	—
Гранецентрированная кубическая решетка (ГЦК)	П Р	У УП Р	Р	—	—
Гексагональная решетка (ГПУ)	—	—	—	У УП Р	П Р

Обозначения деформаций: У — упругая, П — пластическая, УП — упругопластическая, Р — разрушения.

слоях покрытия и уменьшением блоков мозаики и очередности убывания на единицу заряда ядра атомов. Адгезионные свойства покрытия значительно зависят от кристаллографической ориентации — осаждаемые кристаллы образуют близкие к параллельности когерентные плоскости с кристаллами основного материала. При этом установлено, что величина остаточных напряжений зависит от угла их разориентации.

Индуцирование материала при осаждении покрытия в магнитном поле и остаточная намагниченность изменяют кинетику восстановительных реакций, создавая дополнительную энергию кристаллизации по направлению индуцирования. При этом эпитаксия оказывается полеориентированной и минимизирует остаточные напряжения между слоями при плоскопараллельном расположении когерентных кристаллографических плоскостей, в качестве которых выступают плоскости с наименьшим энергетическим потенциалом [2]. Это повышает адгезию и исключает необходимость в формировании промежуточного аморфного слоя при одновременном увеличении толщины функциональных слоев. При этом исключается необходимость в строгом ранжировании осаждаемых металлов по номеру заряда ядра атомов (очередность осаждения), что расширяет его функциональные возможности, так как позволяет включать в структуру покрытия только металлы с заданными функциональными свойствами, что повышает сопротивляемость изнашиванию покрытия при разных внешних воздействиях. Если материал покрытия не обладает магнитными свойствами, управление эпитаксией можно обеспечить накоплением в материале подложки механической энергии, например, при поверхностно-пластическом деформировании и последующем нагревании.

С учетом вышеизложенного ориентацию вектора магнитной индукции устанавливали исходя из характера нарушения сплошности покрытия: при расслоении параллельно поверхности вектор магнитной индукции ориентировали параллельно подложке, при перпендикулярном расслоении — перпендикулярно. Таким образом, вектор магнитной индукции оказывался однонаправленным с вектором растягивающих напряжений. При этом уменьшение деформационной составляющей обеспечивали ориентированием статистически превалирующих плоскостей скольжения в кристаллах наружных (функциональных) слоев параллельно направлению силы трения.

При увеличении коэффициента температурного линейного расширения (КТЛР) материала повышается изнашивание. При этом существует связь магнитных свойств металлов с КТЛР: ферромагнитному состоянию металла соответствует низкий КТЛР, парамагнитному состоянию — высокий КТЛР. При формировании покрытие многослойной структуры следует последовательно от слоя к слою уменьшать КТЛР, управляя их магнитодинамическим состоянием, что обеспечит гетеродиффузию и повысит адгезионное схватывание покрытия с основным материалом, а также плотность рабочих (верхних) слоев.

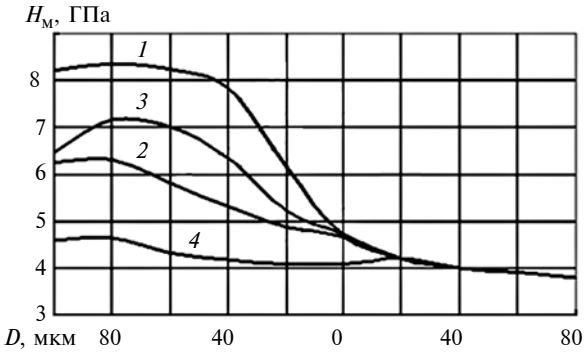


Рис. 5. Зависимости изменения микротвердости $H_м$ от расстояния D до границы раздела Cr—Fe (покрытие — основной материал) при толщине покрытия 0,1 мм для текстурированных в направлениях <111> (*1*); <110> (*2*); <100> (*3*) и нетекстурированного покрытия (*4*)

Исследования микротвердостей текстурированных покрытий, в состав которых входил хром, показало, что изменение микротвердости в зависимости от кристаллографического упорядочения составляет до 40 %.

На рис. 5 показано изменение микротвердости по толщине покрытия. Твердость хрома 830÷850 *HV* соответствовала прогнозируемому диапазону значений и существенно превосходила твердость стальной подложки.

Заметим, что при осаждении в магнитном поле в верхних слоях текстурированных покрытий микротвердость практически не изменяется. У образцов с нетекстурированными покрытиями наблюдалось некоторое понижение микротвердости, что, вероятно, связано с поверхностным дефектообразованием.

При анализе влияния кристаллографического направления на анизотропные свойства покрытия было отмечено, что при постоянном направлении приложения нагрузки в зависимости от ориентации направления <111> микротвердость покрытия изменяется. При параллельном расположении направления <111> относительно поверхности образца деформация развивается преимущественно в плоскости (011), которая является эквивалентом плоскости скольжения (110). Вследствие этого микротвердость становится соизмеримой с микротвердостью, характерной для текстурирования в направлении <100>, при котором деформирование протекает в плоскости (110).

Установление признаков анизотропии материала покрытия, в частности, его пластических свойств, оцениваемых по микротвердости, позволило не

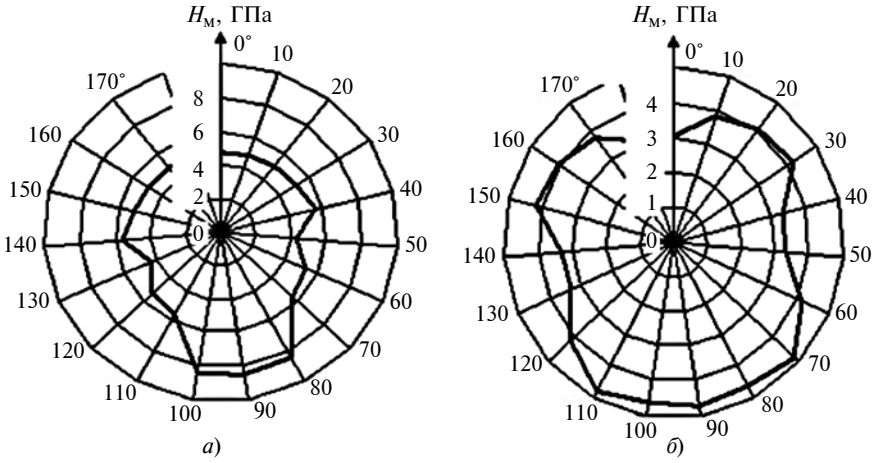


Рис. 6. Диаграммы микротвердостей $H_м$ покрытий из хрома при разных углах ориентации вектора магнитной индукции для кристаллографических направлений <111> (*а*) и <110> (*б*) (0 и 180° соответствуют параллельному расположению относительно подложки; направление нагрузки соответствует 90°)

только убедиться в возможности их обеспечения магнитным полем, но и в эффективности использования кристаллографического упорядочения.

На рис. 6 приведены диаграммы микротвердости покрытия из хрома от кристаллографической ориентации и вектора внешней нагрузки.

Установлено, что распределения микротвердостей при разных кристаллографических ориентациях разные. Это объясняется разной ориентировкой плотноупакованной плоскости кристалла в системе скольжения, так как трансляция развивается при разных напряжениях. Таким условиям соответствуют положения, например, для направления <111> в диапазоне 45÷50° (см. рис. 6, *а*).

В других положениях (до максимального значения при 90°) системы трансляции выражены неявно, микротвердость выше.

Положительные экстремумы сопротивляемости деформации для кристаллов, текстурированных в направлении <100>, отмечены при углах 0÷45° и 45÷90°, которым не соответствует параллельное расположение превалирующих плоскостей скольжения (111) и (110) относительно деформирующей нагрузки. При этом они не находятся под углом 45°, при котором критическое напряжение сдвига наименьшее.

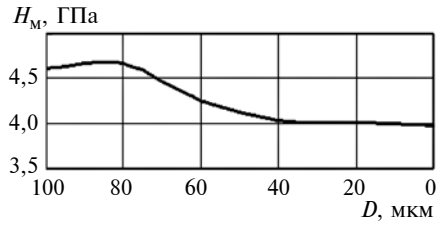


Рис. 7. Распределение микротвердости $H_м$ по толщине покрытия Cr—Fe при ориентации направления <111> параллельно поверхности подложки

Это подтверждает и анализ распределения микротвердостей по толщине слоя: в зависимости от кристаллографического направления <111> микротвердость может быть близкой к максимальной при текстурировании в направлении <100> (см. рис. 5, 7).

Характеры распределения остаточных напряжений в покрытиях с разными структурами и условиями формирования примерно одинаковые. Отсутствие на поверхности напряжений объясняется сложностью их определения из-за дефектности наружных слоев. Установлено, что осаждаемые в магнитном поле покрытия отличаются знаком остаточных напряжений, перешедших в зону благоприятных сжимающих напряжений. При этом осаждение промежуточного (диффузионного) и защитного слоев системы Zn—Ni ввиду более выраженных пластических свойств снижает напряженность в верхних слоях покрытия и в диффузионном слое. Это предотвращает микрорасслоение с подложкой и трещинообразование. Отсутствие разрушений адгезионного характера свидетельствует о минимизации эпитаксии.

Установлено, что отсутствие промежуточного или защитного слоев повышает напряженное состояние. При формировании структуры покрытия в виде монослоя из однонаправленных кристаллографических направлений <111> имеют место значительные остаточные напряжения, которые не аннигилируют вплоть до диффузионного слоя и в его пределах изменяют знак, постепенно снижаясь.

При формировании диффузионного слоя кристаллографическим направлением <100> остаточные напряжения возникают преимущественно вследствие эпитаксии. Однако облегченные условия деформации в этом направлении вследствие большого числа трансляционных систем скольжения, существующих в ОЦК-решетке, в пределах ювенильных поверхностей оказываются достаточными для подавления образования остаточных напряжений, которые остаются практически нулевыми в поверхностном слое размером 0,08÷0,10 мм.

Управление кристаллографическими направлениями не отражается на формировании остаточных напряжений, поскольку границы кристаллов оказываются когерентными вплоть до заданного соответствия регламентированного кристаллографического направления вектору деформирующей нагрузки.

При осаждении покрытий в магнитном поле остаточных напряжений сжатия в покрытиях не наблюдается. Имеют место остаточные напряжения

УДК 686.4

В. В. СЛЕПЦОВ д-р. техн. наук., А. В. САВКИН канд. техн. наук, Д.Ю КУКУШКИН, А. О. ДИТЕЛЕВА (МАИ), e-mail: savkin@mati.ru, 1525395@mail.ru

Исследование процесса осаждения нанокластеров металлов на поверхность пористых материалов методом электрофореза[1]

Рассмотрено формирование покрытия на всей поверхности высокопористого материала на основе активированной углеродной ткани из коллоидного раствора металлов для электродных материалов и конструкций из полимерных композиционных материалов. Эксперименты показали возможность металлизации пористых углеродных материалов нанокластерами металлов размером 2÷10 нм методом электрофореза без снижения их исходной пористости.

Ключевые слова: формирование покрытия, высокопористые материалы, колоидный раствор металлов, нанокластеры металлов, метод электрофореза.

The formation of the coating on the entire surface of the highly porous material based on activated carbon fabric from a colloidal metal solution for electrode materials and structures made of polymer composites is considered. Experiments have shown the possibility of metallizing the porous carbon materials by metals nanoclusters of 2÷10 nm using electrophoresis method without reducing their original porosity.

Keywords: coating formation, highly porous materials, colloidal metal solution, metal nanoclusters, electrophoresis method.

Миниатюризация электроники привела к тому, что основные части объема и массы многих устройств составляют объем и массу источника питания, к которому предъявляются все возрастающие требования по длительности автономной работы, величине запасенной энергии, числу циклов перезарядки и сроку службы, который должен быть не менее срока службы самого электронного устройства. В результате возникла необходимость резкого повышения энергетических характеристик источников тока, что может быть достигнуто применением микроэлектронных технологий и нанотехнологий при их производстве [1, 2].

Приоритетными направлениями совершенствования миниатюрных источников электрической энергии стали химические источники тока, в первую очередь литиевые батареи и суперконденсаторные структуры. Уступая химическим источникам тока по удельной энергии, суперконденсаторы значительно превосходят их по удельной мощности и стабильности зарядно-разрядных характеристик в широком температурном диапазоне.

Микроэлектронные технологии и нанотехнологии востребованы для улучшения параметров электродных материалов как основных элементов химических источников тока и суперконденсаторных структур [3, 4].

Перспективные электродные материалы должны удовлетворять нескольким критериям: развитая удельная поверхность, высокая электропроводность, доступность пористой структуры

[1] Работа выполнена при поддержке Минобрнауки РФ, уникальный идентификатор проекта RFMEFI57717X0275.

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 34)

растяжения, которые вследствие дефектности на поверхности меньше и увеличиваются в глубину, достигая максимальных значений на границе с подложкой. Это свидетельствует о значительном влиянии поляризационных эффектов, связанных с активацией основного материала на начальных этапах осаждения.

Таким образом, экспериментально доказана эффективность осаждения покрытий на детали гидравлических приводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Пат. 2224826 Рос. Федерации:** МПК[7] C25D5/10. Способ получения покрытий на металлических поверхностях заявитель и патентообладатель.

2. **Пат. 2275445 Рос. Федерации:** МПК C25D5/10. Способ формирования гальванических покрытий заявитель и патентообладатель.

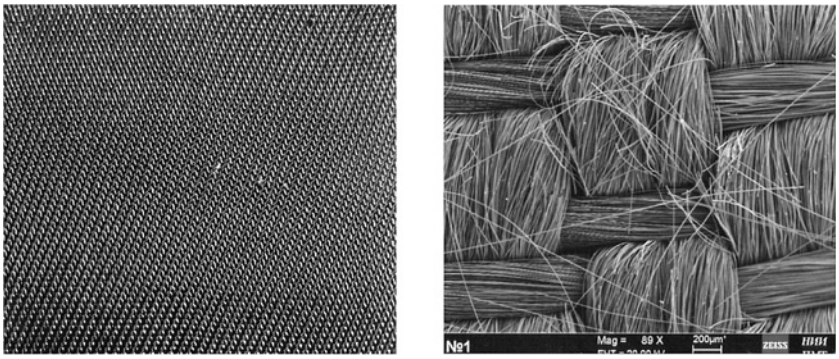
3. **Вассерман Г., Гревен И.** Текстуры металлических материалов. М.: Металлургия, 1963. 360 с.

4. **Теория** образования текстур в металлах / Я. Д. Вишняков, А. А. Бабарэко, С. А. Владимиров, И. В. Эгиз. М.: Наука, 1979. 329 с.

5. **Адамеску Р. А., Гельз П. П., Матюшов Е. А.** Анизотропия физических свойств металлических материалов. М.: Металлургия, 1984. 248 с.

6. **Повышение** герметичности неподвижных разъемных соединений гидросистем машин и оборудования лесного комплекса / Е. А. Памфилов, П. Г. Пыриков, Г. А. Пилюшина, С. В. Тяпин // Изв. вузов. Лесной журнал. 2013. № 1 (331). С. 56—62.

7. **Пилюшина Г. А., Тяпин С. В.** Обеспечение герметичности гидравлических соединений: Актуальные проблемы лесного комплекса. 2008. Т. 2. С. 35—39.



а) *б*)

Рис. 1. Фотография исходного бусофита (*а*) и снимок с увеличением (*б*)

смачиванию, химическая инертность к конструктивным материалам и т. п. Наиболее полно перечисленным требованиям соответствуют углеродные материалы различной степени пористости [5—10]. Одним из перспективных материалов в этой группе считается тканный углеродный материал — бусофит (рис. 1) [11].

Емкость конденсатора зависит в первую очередь от величины поверхности, которая у углеродных материалов может увеличиваться по сравнению с геометрической поверхностью в 10^3—10^5 раз. Кроме высокоразвитой поверхности электродные материалы должны иметь низкое электрическое сопротивление как вдоль слоя, так и поперек, так как это определяет внутреннее сопротивление источника, ограничивающее силу его выходного тока. Для снижения электрического сопротивления бусофита и создания электродного материала на его основе необходимо решить две задачи. Во-первых, нанести сплошной слой металла на поверхность бусофита, который будет являться токосъемником и снизит внутреннее сопротивление, что можно сделать, используя, например, магнетронное напыление. Во-вторых, надо нанести слой металла на каждую нить бусофита, который, с одной стороны, понизит их электрическое сопротивление, а с другой — увеличит удельную поверхность. Помимо применения такой технологии в производстве конденсаторных структур, ее можно будет применить и для металлизации волокон полимерных композиционных материалов, например, в целях получения пассивной радиочастотной метки идентификации.

Для решения данной задачи предлагается использовать технологию осаждения нанокластеров металлов на поверхность пористых материалов методом электрофореза. Как известно, частицы нанометрового размера обладают рядом уникальных свойств. Они несут положительный заряд, а их электрофизические и физико-химические свойства определяются размерами нанокластера. Поэтому основной задачей является получение частиц металла с нужным размерным диапазоном и последующее позиционирование их в поровое пространство методом электрофореза. При этом наночастицы должны быть равномерно распределены по поверхности.

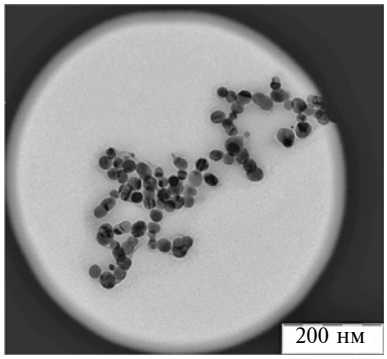


Рис. 2. Полученные нанокластеры серебра различных размеров

В исследованиях использовали серийную углеродную ткань бусофит Т-40 и схожие углеродные материалы Бусофит Т-1, Бусофит Т, Бусофит ТМ-4. На нити бусофита наносили нанокластеры никеля и серебра из гидрозоля. Нанокластеры металлов получали методом электроимпульсного диспергирования в результате электрического разряда между электродами, изготовленными из соответствующего металла и погруженными в дистиллированную воду [12]. Межэлектродное расстояние составляло 100 мкм, зазор воздушного разрядника — 1 мм, напряжение на конденсаторе — до 3 кВ, емкость конденсатора — 1000 пФ. Получаемые таким образом нанокластеры металлов представлены на рис. 2.

При таком режиме синтеза были получены коллоидные растворы серебра и никеля, в которых исходные размеры нанокластеров составляли 25÷40 нм и 2÷10 нм соответственно.

Для металлизации бусофита нанокластерами металлов методом электрофореза были разработаны экспериментальный лабораторный реактор (рис. 3, *а*) и его 3D-модель (рис. 3, *б*).

Бусофит *3* помещали между электродами *2* и *5*, после чего реактор заполняли коллоидным раствором с нанокластерами серебра или никеля и подключали к источнику питания переменного тока напряжением 40 В. Коллоидные частицы имеют заряд, поэтому они могут двигаться в электрическом поле. Достигая электрода, частицы теряют заряд и слипаются — коллоидный раствор коагулирует на поверхности материала.

На рис. 4, *а*—*г* представлены снимки металлизированных волокон бусофита, полученные с помощью электронно-лучевого микроскопа. Как видно, никель осаждается на бусофит тонким слоем (рис. 4, *б*), а серебро на поверхности бусофита формируется в виде крупных наночастиц и кристаллитов (рис. 4, *а*), разви-

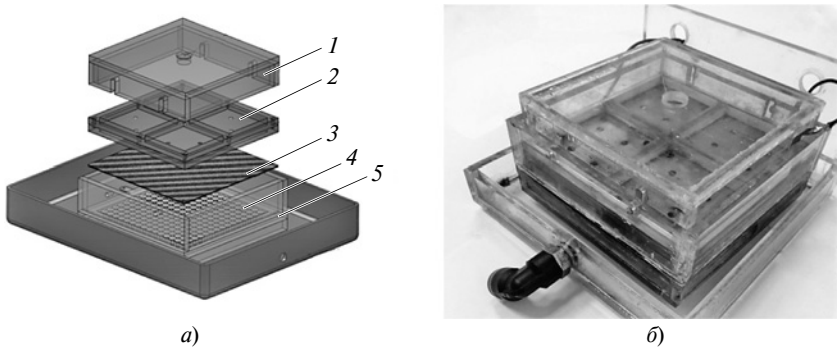


Рис. 3. Установка для нанесения наночастиц металлов:
1 — верхняя прижимная крышка; *2* — металлический электрод, закрепленный в верхней крышке; *3* — углеродная ткань «бусофит»; *4* — основание; *5* — нижний электрод

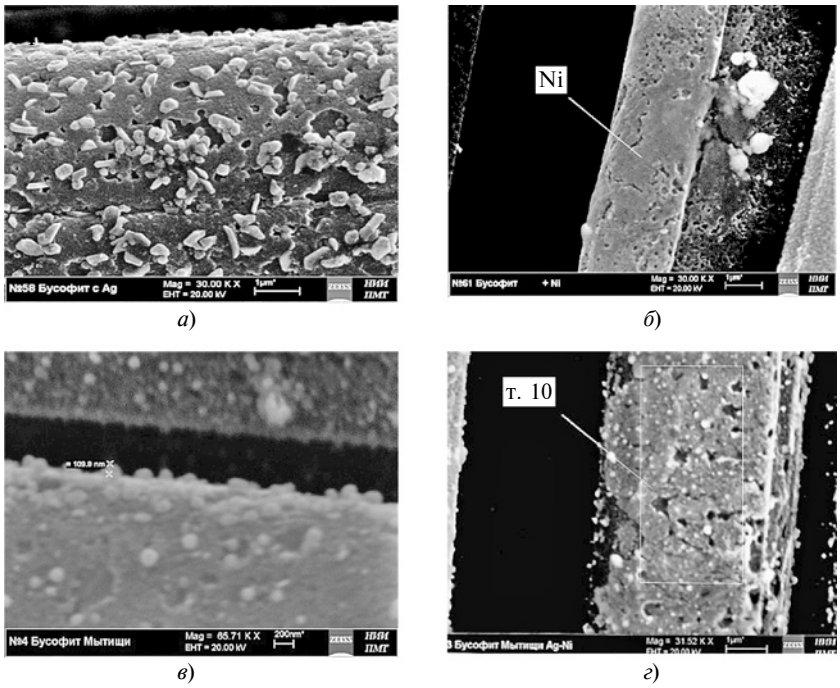


Рис. 4. Нить бусофита, металлизированная серебром (*а*), никелем (*б*), серебром по никелю (*в*, *г*)

вая поверхность волокна. Эксперимент по осаждению серебра на предварительно металлизированные никелем волокна бусофита тоже не позволил получить единый слой серебра, которое осаждалось на подслой никеля также, как и на исходный бусофит (рис. 4, *в*, *г*). По-видимому, такой результат металлизации связан с исходным размером нанокластеров металлов: тонкопленочные покрытия получаются из нанокластеров с размерами 2÷10 нм, а наночастицы и кристаллиты формируются из нанокластеров более крупной фракции.

Таким образом, показана возможность металлизации пористых материалов нанокластерами металлов методом электрофореза без снижения их исходной пористости. Такая обработка дает возможность формирования покрытия на всей поверхности высокопористого материала, что снижает электрическое сопротивление и стабилизирует параметры электродного материала.

Для дальнейшего изучения процесса металлизации высокопористых материалов планируется использовать градуированные коллоидные растворы с меньшим разбросом размеров нанокластеров из различных металлов и сплавов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Nanostructured** materials for advanced energy conversion and storage devices / A. S. Arico, P. Bruce, B. Scrosati at al. // Nature Materials. 2005. V. 4. P. 366—377.
2. **Hybrid** Nanostructures Based on Two-Dimensional Nanomaterials / X. Huang, C. Tan, Z. Yin, H. Zhang // Advanced Materials. 2014. V. 26. Is. 14. P. 2185—2204.
3. **Scrosati B.** Nanomaterials: Paper powers battery breakthrough // Nature Nanotechnology. 2007. V. 2. P. 598—599.
4. **High-power** lithium batteries from functionalized carbon-nanotube electrodes / S. W. Lee, N. Yabuuchi, B. M. Gallant at al. // Nature Nanotechnology. 2010. V. 5. P. 531—537.
5. **Optical** and Electrical properties of quantum-dimensional Multilayer Structures Based on Carbon Films / V. V. Sleptsov, V. M. Elinson, A. M. Baranov, S. A. Tereshin // Wide Band Gap Electronic Materials NATO ASI. Series 3. High Technology. 1995. V. 1. P. 257—264.
6. **Li X., Wei B.** Supercapacitors based on nanostructured carbon // Nano Energy. 2013. V. 2. Is. 2. P. 159—173.
7. **Pandolfo A. G., Hollenkamp A. F.** Carbon properties and their role in supercapacitors // Journal of Power Sources. 2006. V. 157. Is. 1. P. 11—27.
8. **Metal-free** supercapacitor with aqueous electrolyte and low-cost carbon materials / N. Blomquist, T. Wells, B. Andres at al. // Scientific Reports. 2017. V. 7. Article number: 39836.
9. **Weinstein L., Dash R. /** Supercapacitor carbons // Materials today. 2013. V. 16. Is. 10. P. 356—357.
10. **Carbon** Nanomaterials for Advanced Energy Conversion and Storage / L. Dai, D. W. Chang, J.-B. Baek, W. Lu // Small. 2012. V. 8. Is. 8. P. 1130—1166.
11. **Improved** Symmetric Supercapacitive Performance of Binder-free PANI/Carbon Fiber Composites / M. V. Astakhov, R. R. Galimzyanov, A. A. Klimont at al. // Current Nanoscience. 2016. V. 12. Is. 1. P. 83—89.
12. **Electric** discharge technology of production and diagnosis of metallic hydrosols with nanosized particles / N. N. Ostroukhov, A. Y. Tyanginskii, V. V. Sleptsov, M. V. Tserulev // Inorganic Materials: Applied Research. 2014. V. 5. Is. 3. P. 284—288.

УДК. 621.671.22

Н. П. ОВЧИННИКОВ, канд. техн. наук (Северо-Восточный федеральный университет им. М. К. Аммосова, г. Якутск), А. Г. СМЫСЛОВ (Удачнинский ГОК АК "АЛРОСА", г. Удачный), e-mail: ovchinnlar1986@mail.ru

Повышение ресурса секционных насосов главного водоотлива подземного кимберлитового рудника "Удачный"

Предложен способ для очистки от механических примесей шахтных вод, поступающих в водосборники главного водоотлива, учитывающий особенности подземного кимберлитового рудника "Удачный", который позволит снизить интенсивность гидроабразивного изнашивания деталей секционных насосов.

Ключевые слова: подземный кимберлитовый рудник, секционный насос, гидропята, гидроабразивное изнашивание, гидроциклон, водосборник-илоотстойник.

The method is proposed for purification from mechanical impurities of mine waters entering the reservoirs of the main dewatering system, taking into account the features of the "Udachny" underground kimberlite mine, which will reduce the intensity of hydroabrasive wear of the sectional pump parts.

Keywords: underground kimberlite mine, sectional pump, hydrostatic, hydroabrasive wear, hydrocyclone, water silt-silt.

Эксплуатация водоотливных установок на подземных кимберлитовых рудниках "Удачный", "Мир" и "Интернациональный" (АК "АЛРОСА") показала, что наработка между капитальными ремонтами секционных насосов составляет 1334÷6860 ч [1, 2]. Ежегодно на капитальные ремонты данных насосов затрачиваются десятки миллионов рублей, поэтому увеличение межремонтных наработок насосного оборудования является весьма актуальной задачей.

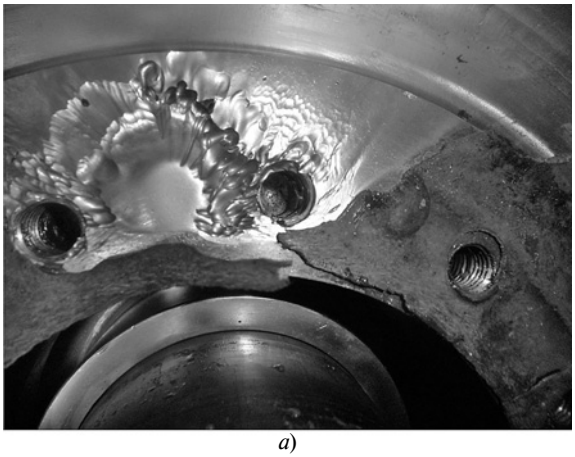
Основной причиной выхода из строя секционных насосов является изнашивание вращающихся роторных деталей, сопряженных с неподвижными корпусными деталями (рис. 1, *а*, *б*).

Интенсивное изнашивание объясняется продолжительной работой секционных насосов в аварийном режиме, т. е. при критическом осевом смещении (2,8÷3 мм) ротора в сторону всасывания. Критическое смещение ротора вызвано, как правило, неудовлетворительными состояниями деталей (диска и кольца) гидропяты секционного насоса [3, 4].

Статистика по эксплуатации секционных насосов на рудниках АК "АЛРОСА" показала, что по шкале Чеддока между средним ресурсом K секционного насоса до капитального ремонта и средней наработкой T гидропяты до отказа существует связь: уравнение регрессии $K = 5{,}497T + 243{,}83$; коэффициент детерминации $R^2 = 0{,}58$; значимость $F = 0{,}078$, которая по F-критерию Фишера для данной эмпирической формулы составляет 10 %.

Изнашивание деталей гидропяты, как правило, вызвано интенсивным гидроабразивным взаимодействием взвешенных примесей, которые содержатся в откачиваемой шахтной воде (рис. 2, *а*, *б*). Работы [1—7] также подтверждают, что причиной преждевременной потери работоспособности деталей центробежных насосов является гидроабразивное изнашивание.

Статистические исследования (табл. 1) показали, что при сильном загрязнении шахтной воды, что характерно для подземных кимберлитовых рудников, наработка T гидропяты во многом зависит от гидравлических параметров (факторы X_5, X_8) секционных насосов, твердости механических примесей (фактор X_2), времени разгона и торможения



а)

б)

Рис. 1. Механические повреждения базовых деталей секционных насосов:

а — крышка нагнетания насоса JSH-200 (Mackley Pumps", Удачнинский ГОК); *б* — рабочее колесо насоса НЦС(К) 180-700 (ООО "Линк-Продукт", Мирнинский ГОК)

Таблица 1

Результаты статистических исследований

Показатель	Фактор	R^2	F
Содержание механических примесей размером более 0,2 мм, г/л	X_1	0,489	0,122
Твердость механических примесей в шахтной воде, ГПа	X_2	0,545	0,094
Минерализация шахтной воды, г/л	X_3	0,316	0,245
Водородный показатель	X_4	0,314	0,247
Номинальный напор, м	X_5	0,673	0,045
Суточная наработка насоса, ч	X_6	0,201	0,372
Время разгона и торможения насоса, с	X_7	0,61	0,0066
Скорость воды на выходе, м/с	X_8	0,61	0,066

корпусно-секционного электронасосного агрегата (фактор X_7).

Была установлена многофакторная зависимость: уравнение регрессии $T = -108{,}13X_8 - 65{,}21X_2 - 0{,}26X_5 + 1712{,}1$; $R^2 = 0{,}937$; $F = 0{,}092$. Значимости полученного уравнения множественной регрессии проверяли F-критерием Фишера, что позволило вывести из уравнения фактор X_7.

Анализ имеющихся средневзвешенных значений X_2, X_5 и X_8 показал, что наиболее неблагоприятные условия для гидропяты у насосов главной водоотливной установки подземного кимберлитового рудника "Удачный", средневзвешенное значение наработки T для данных насосов составляет всего 351,6 ч.

В главной водоотливной установке используются пять насосов JSH 200 и один насос НЦС(К)350-1100, в которых используется электродвигатель Emit sSh560H4D мощностью 2000 кВт; номинальная подача данных насосов 350 м^3/ч; номинальный напор 1100 м.

Так как значения X_2, X_5 и X_8 в ближайшее время нельзя снизить по ряду объективных причин, то для увеличения межремонтных интервалов будем искать другие решения.

Несмотря на незначительную значимость ($a = 0{,}1$) зависимости $t = f(X_1)$ при $P = 0{,}9$, между ее переменными по шкале Чеддока существует определенная взаимосвязь (см. табл. 1). Значительное содержание абразивных примесей в высоконапорном и высокоскоростном потоке шахтной воды, создаваемым насосами JSH-200 или НЦС(К) 350-1100, создает агрессивную рабочую среду для металла [1].

Добиться приемлемого содержания механических примесей в шахтных водах, откачиваемых из водосборников рудника "Удачный", пытались несколькими способами.

Наиболее применяемый способ снижения концентрации механических примесей в шахтной воде — предварительное осветление в водосборниках. Однако содержание механических примесей в шахтных водах рудника "Удачный" оказалось в разы выше прогнозируемого и их осветление в проектных водосборниках объемами 1100 и 900 м^3 оказалось малоэффективным. Кроме того, повышенная загрязненность привела к частому заиливанию, что потребовало дополнительных затрат на их обслуживание. Время заиливания водосборников варьируется от 7 до 30 дней.

Требуемого снижения механических примесей не удалось добиться и установкой сетчатых фильтров на всасывающих трубопроводах насосов. К тому же данные фильтры оказались подвержены систематическим закупориваниям взвешенными крупными частицами (рис. 3), что повлекло за собой аварийное отключение насосного оборудования. Поэтому был необходим эффективный способ очистки шахтных вод от твердой фазы.

Анализ публикаций [8—13] по данному вопросу показал, что все известные решения для рудника "Удачный" малоэффективны. Насосная установка [8], оборудованная системой гидроциклонов, обеспечивающих постоянный приток очищенной воды в торцевые уплотнения и узел гидропяты, не предусматривает защиту от гидроабразивного изнашивания рабочих зубчатых колес и заиливания водосборников.

а)

б)

Рис. 2. Гидроабразивные износы дисков гидропяты:

а — секционного насоса JSH-200 (Удачнинский ГОК); *б* — насоса НЦС(К) 400-660 (Мирнинский ГОК)

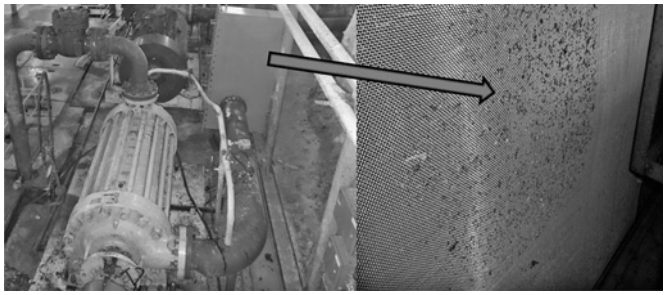


Рис. 3. Сетчатый фильтр на всасывающем трубопроводе насоса

Низкую эффективность водоотливной установки [9] обусловливает трудоемкий механизированный способ очистки водосборников от механических примесей. Очистка шахтных вод, описанная в работе [9], используется на многих подземных рудниках и шахтах и в том числе на рудниках АК "АЛРОСА".

Существенным недостатком водоотливной установки, представленной в работе [10], является то, что предусмотренное взмучивание механических примесей вызывает интенсивное гидроабразивное изнашивание деталей насосов.

Основным недостатком, сдерживающим применение на руднике "Удачный" водоотливной установки, описанной в работе [11], является то, что при последовательной работе насосов их отдельные узлы со стороны всасывания оказываются под давлением, превышающим допустимое (более 0,2 МПа). Это может привести к аварийной остановке насосного оборудования.

Несмотря на ряд достоинств — повышенная надежность, высокая энергоэффективность, которые обеспечиваются обесшламливанием шахтной воды в пластинчатом сгустителе-осветлителе и выдачей сгущенной пульпы в вагонетку с последующим ее применением в качестве закладочного материала, внедрение на руднике "Удачный" водоотливной установки, представленной в работе [12], невозможно из-за значительных размеров, обусловленных производственными особенностями. Кроме того, на данном руднике закладка выработанного объема не выполняется.

Одним из сдерживающих факторов использования установки, описанной в работе [13], является отсутствие на мировом рынке малопроизводительных погружных насосов с напором свыше 1100 м.

В свое время руководство рудника рассматривало приобретение гидроциклонов, которые хорошо себя зарекомендовали на разных горно-обогатительных предприятиях. Однако приглашенные специалисты выразили единое мнение о том, что при существующей схеме водоотлива применение гидроциклонов нецелесообразно ввиду того, что гидростатическое давление на выходе из трубы, используемой для сброса шахтных вод с верхних горизонтов (−295, −305, −320, −334, −345, −365, −380, −398, −460 и −480 м) в водосборники главного водоотлива, на конце которой предполагался монтаж гидроциклона (−580 м), достигает 2 МПа, а допустимое давление на входе в гидроциклон составляет 0,45 МПа [14]. К тому же на руднике отсутствуют водосборники-отстойники, которые необходимы для осветления сгущенной пульпы.

Таким образом, применение на данном руднике гидроциклонов возможно только при использовании дополнительного насосного оборудования для питания гидроциклонов шахтной водой из водосборников главного водоотлива и сооружении дополнительных водосборников-отстойников.

Для эффективного использования гидроциклонов необходимо следующее:

1) подобрать гидроциклоны и питающее насосное оборудование, исходя из объема поступающих шахтных водопритоков в водосборники главного водоотлива и поперечного сечения горных выработок рудника;

2) определить места установки машин;

3) рассчитать оптимальные параметры водосборников-отстойников;

4) выбрать (или разработать) способы удаления и транспортировки твердой фазы сгущенной пульпы из водосборников-отстойников на поверхность рудника.

Для решения поставленных задач использовали материал по функционированию рудника "Удачный", наработки по борьбе с гидроабразивным изнашиванием деталей центробежных насосов [12, 13] и эксплуатации гидроциклонов [14, 15], результаты экспериментальных исследований на лабораторной электронасосной установке на базе консольного насоса К8/18, оборудованной гидроциклоном (далее гидроциклон-образец), исследования шахтной воды из водосборников главного водоотлива рудника "Удачный".

Средневзвешенная подача насосов главной водоотливной установки рудника "Удачный" составляет 380 м^3/ч. С учетом высоты горных выработок рудника ($h_{выр}$ = 4,5 м) наиболее приемлемым является гидроциклон ГЦ-710 (табл. 2) [14].

Необходимую производительность рассчитываем по формуле [15]

$$Q_г = 15{,}5 K_d K_\alpha D_{вх} D_{сл} \sqrt{p_{вх}},$$

Таблица 2

Геометрические параметры гидроциклонов

Параметр	Гидроциклон	Гидроциклон-образец
$C/D_г$	5,0	4,1
$D_{вх}/D_г$	0,28	0,30
$D_{сл}/D_г$	0,34	0,40

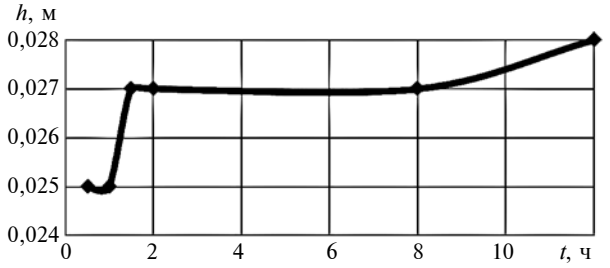


Рис. 4. Зависимость времени *t* осаждения механических примесей от уровня *h* твердой фазы

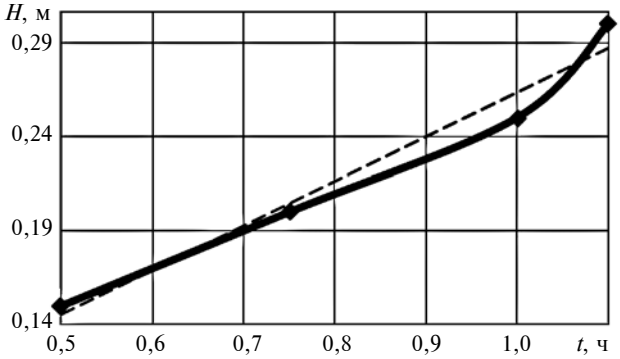


Рис. 5. Зависимость времени *t* осаждения механических примесей от высоты *H* шахтной воды при *h* = 0,025 м

где K_d — коэффициент, зависящий от диаметра гидроциклона; K_α — коэффициент, определяемый конусностью гидроциклона; $D_{вх}$ — внутренний диаметр входного патрубка; $D_{сл}$ — внутренний диаметр сливного патрубка; $p_{вх}$ — манометрическое давление на входе в гидроциклон.

Необходимая производительность составила $Q_г$ = 380 м^3/ч, ее можно добиться повышением манометрического давления $p_{вх}$ до 0,15 МПа.

Так как в данном случае шахтные воды являются химически активными, то в качестве насосного оборудования, питающего гидроциклоны, целесообразно использовать погружные насосы фирмы Flygt, которые следует установить в нишах осветляющих резервуаров, так как вода в них практически статична, а гидроциклоны находятся в непосредственной близости к водосборникам-отстойникам.

Для расчета параметров водосборников-отстойников необходимо знать производительность гидроциклонов по пескам и время оседания механических примесей.

Анализ результатов экспериментальных испытаний на лабораторной насосной установке показал, что при $p_{вх}$ = 0,15 МПа производительность $Q_п$ гидроциклона-образца по объему составляет 12 % от производительности $Q_г$.

Необходимое манометрическое давление на входе в гидроциклон-образец было достигнуто дросселированием шаровым краном, установленном на всасывающей линии насоса, и зафиксировано с помощью манометра, установленного на спиральном отводе насоса.

Конструктивные параметры гидроциклона-образца: C = 275 мм; $D_г$ = 67 мм; $D_{вх}$ = 20 мм; $D_{сл}$ = 26,6 мм; $D_п$ = 4,8 мм; они близки к параметрам гидроциклона ГЦ-710 [15]: $D_г$ = 710 мм; $Q_г$ = 260 м^3/ч при $p_{вх}$ = 0,1 МПа; длина × ширина × высота 1165×1205×3270 мм.

Экспериментально получена зависимость времени t осаждения механических примесей от уровня h твердой фазы (рис. 4), которая позволила установить, что в емкости при высоте H = 0,15 м шахтной воды через 0,5 ч осаждается 90 % твердой фазы, остальная часть (10 %) осаждается через 12 ч.

Уравнение линейной регрессии $H = 0{,}2363t + 0{,}0271$, описывающее экспериментально установленную корреляционную зависимость (рис. 5), позволяет с высокой достоверностью определить время t осаждения большей части (90 %) твердой фазы отобранной шахтной воды.

Для расчета параметров водосборников-отстойников используем уравнение линейной регрессии и формулы, приведенные в работе [12]:

$$V_в = Q_{ГЦ} t_в,$$

где $V_в$ — рабочий объем водосборника-отстойника; $Q_{ГЦ}$ — прогнозируемая производительность гидроциклона ГЦ-710 по пескам (в данном случае $Q_п$ = 45,6 м^3/ч); $t_в$ — время осаждения механических примесей в водосборнике-отстойнике (значения $t_в$ аналогичны значениям t);

$$F_в = \frac{V_в}{H_в},$$

где $F_в$ и $H_в$ — площадь поперечного сечения и высота водосборника-илоотстойника.

Варианты параметров водосборников-отстойников представлены в табл. 3.

Исследования показали, что наиболее подходящим способом очистки водосборника от шламовых отложений является способ, приведенный в работе [13], так как он позволяет удалять шлам со всей площади водосборника.

Для транспортировки шлама на поверхность можно использовать применяемый в настоящее времени на руднике способ, при котором удаляемые из водосборников главного водоотлива шла-

Таблица 3

Варианты параметров водосборника-отстойника

$H_в$, м	$t_в$, ч	$V_в$, м^3	$F_в$, м^2
0,50	2,00	91,20	182,40
0,75	3,06	139,54	186,05
1,00	4,12	187,87	187,87
1,25	5,17	235,75	188,60
1,50	6,23	284,09	189,39

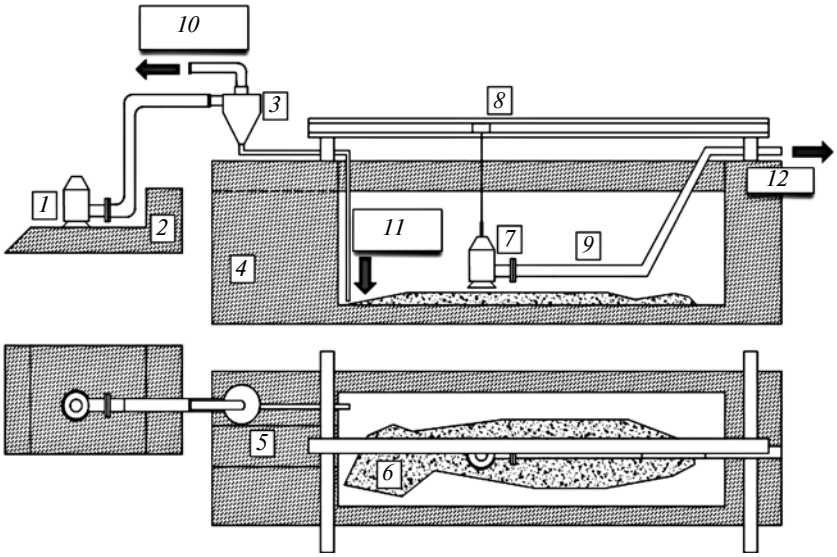


Рис. 6. Схема механизированного комплекса очистки шахтных вод от механических примесей:

1 — погружной насос; *2* — резервуар для осветления; *3* — гидроциклон; *4* — водосборник-отстойник; *5* — канава; *6* — шлам; *7* — пневматический насос; *8* — кран-балка; *9* — гибкий трубопровод; *10* — осветленная шахтная вода; *11* — сгущенная пульпа; *12* — шлам

мовые отложения поступают в бункер-накопитель, затем их поднимают на поверхность с помощью скипа.

На основании полученных результатов разработан механизированный комплекс очистки от механических примесей шахтных вод, поступающих в водосборник главного водоотлива рудника "Удачный" (рис. 6).

Погружной насос *1* фирмы Flygt, установленный в нише осветляющего резервуара *2*, откачивает шахтную воду и подает ее в гидроциклон *3* (ГЦ-710). Осветленная шахтная вода, выходящая из сливного патрубка гидроциклона *3*, транспортируется в водосборник главной водоотливной установки и откачивается секционными насосами на поверхность рудника. Сгущенная пульпа, выходящая из песковой насадки гидроциклона *3*, поступает в водосборник-отстойник *4* и разделяется на жидкую и твердую фазы. Осветленная шахтная вода, отстоявшаяся в водосборнике-отстойнике *4*, поступает (переливается) в водосборник главной водоотливной установки через канаву *5*. Осевшая твердая фаза (шлам) *6* удаляется по всему периметру водосборника-отстойника *4* пневматическим насосом Mudskipper *7* (фирма BRAIN INDUSTRIES PTY. LTD), который перемещается по дну водосборника в произвольном направлении с помощью кран-балки *8*. Использование пневматического насоса Mudskipper обусловлено тем, что данный насос может откачивать осевший шлам без предварительного взмучивания (подтверждено практикой). Шлам *6*, откачиваемый насосом *7*, поступает через гибкий трубопровод *9* в шламо-отстойник, затем в бункер-накопитель и скип. Поднятый на поверхность рудника с помощью скипа шлам *6* складируют в отвалы.

Таким образом, для повышения эффективности насосного оборудования главного водоотлива рудника "Удачный" разработан механизированный комплекс для очистки шахтных вод от механических примесей, что позволит уменьшить гидроабразивного изнашивания секционных насосов и, в частности, деталей гидропяты, а также снизить интенсивность заиливания водосборников.

На данное устройство (главная рудничная водоотливная установка) подана заявка на изобретение (№ 2018110832).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Овчинников Н. П.** Опыт эксплуатации секционных насосов главного водоотлива подземного рудника "Удачный" // Вестник КузГТУ. 2017. № 3. С. 154—161.
2. **Овчинников Н. П.** Влияние состояния проточных каналов рабочего колеса на работоспособность электронасосного агрегата // Вестник КузГТУ. 2017. № 3. С. 162—169.
3. **Анализ** эффективности разгрузочных устройств шахтных центробежных секционных насосов / А. В. Долганов, А. О. Еслентьев, Е. О. Чераков, Э. Ю. Торопов // Изв. УГГУ. 2014. № 2 (34). С. 31—35.
4. **О разработке** шахтных центробежных секционных двухпоточных насосов / С. А. Тимухин, А. В. Долганов, Ю. В. Попов и др. // Изв. УГГУ. 2014. № 2 (34). С. 41—44.
5. **Rick Kesler.** Considerations is selecting a positive displacement slurry pump // Mining World. 2016. V. 13 (4). P. 34—37.
6. **Kranzler Thomas, Raimo Arola.** Improwing pump materials for harh environments // Sulzer Technical Review. 2013. V. 2. P. 10—12.
7. **Patsera S., Protsiv V., Kosmin V.** Feasible ways to improve the durability of the pumps' parts operating with hydroabrasive mixtures // Mechanics, Materials Science and Engineering. 2015. V. 1. P. 133—137.
8. **Надежность** эксплуатации насосов ЦНС в системах ППД. URL: http://www.agrovodcom.ru/infos1/nasos-cns.php.
9. **Веселов А. И.** Рудничный водоотлив. Свердловск: Металлургиздат, 1956. 532 с.
10. **Попов В. М.** Рудничные водоотливные установки. М.: Недра, 1983. 304 с.
11. **Пат. 2472971 Рос. Федерации:** Шахтная водоотталкивающая установка.
12. **Горелкин И. М.** Разработка и обоснование способов повышения энергоэффективности насосного оборудования комплексов шахтного водоотлива: Дис. ... канд. техн. наук. СПб., СПбГУ. 2014. 197 с.
13. **Пат. на полезную мод. 154173 Рос. Федерации:** Рудничная водоотталкивающая установка.
14. **Гидроциклоны.** Технические условия 1104-022-05773333-2008. URL: http://pzgo.ru/uploadedFiles/files/TU_1104-022-05773333-2008_Gidrociklon.pdf.
15. **Бушмелев В. А., Вольман Н. С.** Процессы и аппараты целлюлозно-бумажного производства. М.: Лесная промышленность, 1969. 408 с.

УДК [621.791: 621.793].004.12

А. П. СЫЧЕВ, канд. физ.-мат. наук (Южный научный центр РАН, Ростовский государственный университет путей сообщения), М. А. СЫЧЕВА, канд. техн. наук (Донской ГТУ), e-mail: aleks_sap@mail.ru

Влияние алюминиевого металлизационного покрытия на качество сварных соединений

Рассмотрена возможность использования продольного магнитного поля для сварки металлизированного алюминием проката и получения нормативных характеристик сварных соединений с использованием специальной сварочной головки. Определены механизмы образования металла шва и его металлографические особенности при ликвации алюминия по сечению шва и образование структуры композитного характера.

Ключевые слова: металлизационное алюминиевое покрытие, сварной шов, продольное магнитное поле, сварочная головка, микроструктура, ликвация алюминия, линия сплавления, композитная структура.

The possibility of using a longitudinal magnetic field for welding of rolled metal metallized by aluminum and obtaining the standard characteristics of welded joints using a special welding head is considered. The mechanisms of formation of weld metal and its metallographic features in the segregation of aluminum along the seam section and the formation of a composite structure are determined.

Keywords: metallization aluminum coating, welded seam, longitudinal magnetic field, welding head, microstructure, aluminum liquation, alloy line, composite structure.

Развитие нефте- и газодобычи на континентальном шельфе обусловливает высокие требования по надежности и долговечности к оборудованию и сооружениям, работающим не только в условиях агрессивной среды, но и при воздействии динамических нагрузок. Применение металлизационных алюминиевых покрытий (МАП) позволяет использовать свойства обеих составляющих материала — высокую защитную способность покрытия и требующиеся механические свойства основного материала [1, 2].

Проблема управления качеством швов в сварных конструкциях с МАП является актуальной. Это связано с долговечностью сварных конструкций и их экономической эффективностью. Основной тип соединений в сварных конструкциях — стыковые соединения, долговечность которых в значительной степени определяется качеством сварного шва. Проведенные исследования показали, что на снижение механических свойств сварных соединений основное влияние оказывает засоренность металла шва неметаллическими включениями — алюминатами типа шпинелей с переменным составом [3, 4].

Для нейтрализации окисных соединений были предложены следующие решения: 1) использование новых сварочных материалов; 2) применение специальных технологических приемов, один из которых — использование продольного магнитного поля (ПМП) [5].

Возможным решением проблемы свариваемости сталей с покрытием является разработка новых сварочных материалов. Известные решения по дуговой сварке сталей с МАП предположительно основаны на повышении роли железной окалины в исходной шихте как эффективного окислителя, что приводит к окислению сварочной ванны и снижению ударной вязкости металла. Предложенные новые сварочные материалы позволяют использовать свойства тройной легкоплавкой эвтектики CaO — CaF_2 — Al_2O_3, температура плавления которой составляет 1230 °С, а плотность шлака — 2,3 г/см^2, что обеспечивает всплытие и вынос шлака на поверхность раздела фаз сварочной ванны. Механические свойства соединений, полученные с использованием новых сварочных материалов, в основном близки к нормативным, но наблюдается засоренность неметаллическими включениями, хотя и в меньшей степени, чем при применяемых сварочных материалах. Кроме того, возрастает трудоемкость подготовки к проведению сварочных работ [6].

Поэтому основное внимание в работе было уделено технологическому приему, связанному с использованием магнитного поля. При воздействии продольного магнитного поля на сварочную дугу происходит изменение гидродинамической обстановки в сварочной ванне, способствующее облегчению процессов дегазации и разрушения окисных пленок при сварке. При наложении переменного ПМП металл сварочной ванны совершает колебательные движения и проявляется эффект срезания между жидкими и твердыми слоями при перемешивании, обусловливающий дробление дендритов и получение измельченной структуры, причем зерно существенно измельчается вблизи линии сплавления. Можно также отметить и такие положительные стороны применения ПМП, как снижение силы тока, необходимой для формирования шва, и повышение сопротивляемости металла шва образованию горячих трещин.

На основании вышеизложенного в работе рассматривается возможность использования ПМП для сварки металлизированного алюминием про-

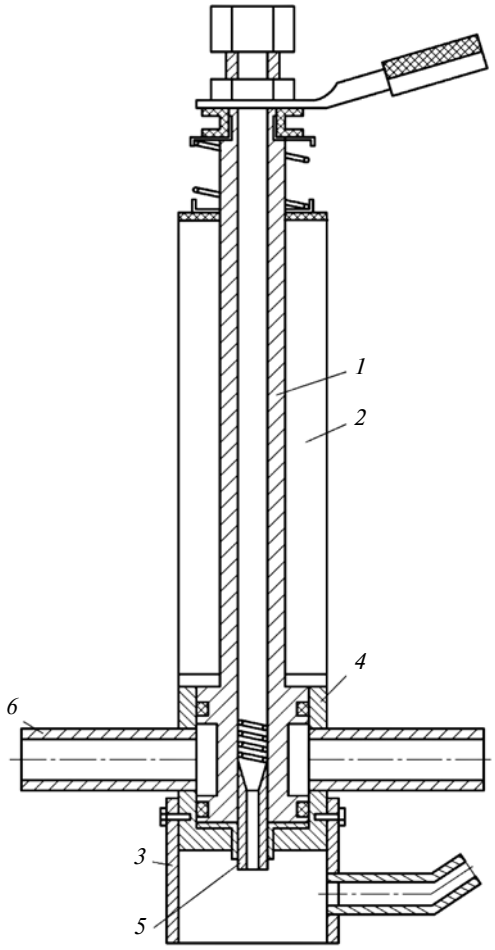


Рис. 1. Сварочная головка

ката и получения нормативных характеристик сварных соединений.

Для проведения сварочных работ была использована сварочная головка (рис. 1), предназначенная для направления электродной проволоки в зону дуги, подачи защитного газа в случае механизированной сварки в CO_2 и подвода тока к электродной проволоке, наведения продольного магнитного поля. Сварочная головка представляет собой конструкцию, содержащую магнитопровод-токоподвод *1*, соленоид *2*, сопло *3*, водяную рубашку *4*, мундштук *5*. Магнитопровод-токоподвод охлаждается водой в его нижней, наиболее нагреваемой части. Проточная вода поступает по двум штуцерам *6*. Была проведена оценка микроструктуры и механических свойств сварного шва, выполненного с помощью магнитоуправляемой дуги.

Сварку пластин из сталей 20 и 09Г2С размерами 500 × 350 × 5 мм с односторонним покрытием алюминия 150÷180 мкм, напыленного электродуговым методом проволокой АД-1, выполняли по общепринятой технологии механизированной сварки под флюсом по МАП и в CO_2 по МАП, а также с наложением продольного магнитного поля в процессе сварки.

Режимы указанных вариантов сварки приведены в табл. 1. После проведения сварочных работ для определения механических свойств шва, а также для металлографии и спектрального химического анализа вырезали образцы. Микроструктуру сварных соединений исследовали с помощью оптического микроскопа "Metaval" и микроанализатора "Camebax". Фрактографический анализ изломов выполняли с помощью микроанализатора "Tesla".

Металл шва в обоих случаях представлен феррито-перлитной структурой. Контроль процесса сварки и внешний осмотр швов не выявил пористости, формирование металла хорошее. Отслоения покрытия от основного металла, трещин, вспучивания и других нарушений его сплошности в результате термического воздействия сварки не наблюдалось.

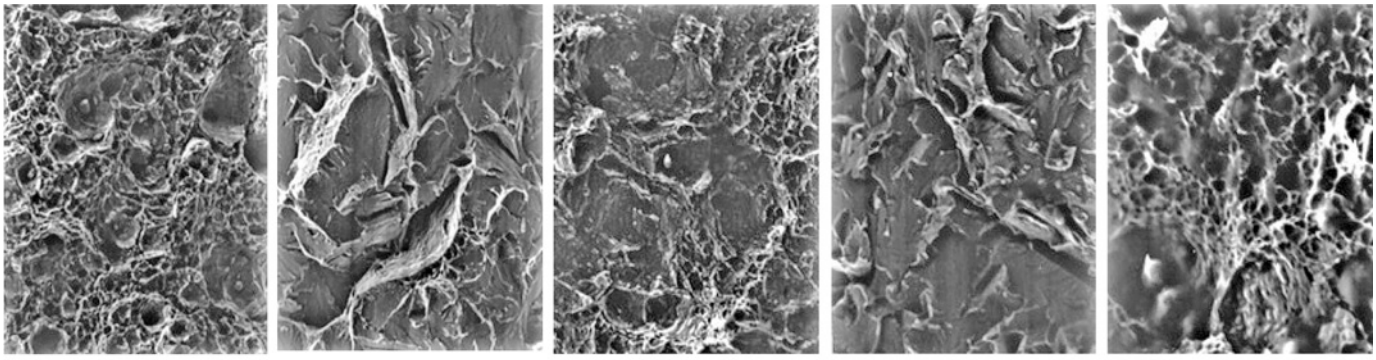
Микроструктурный анализ сварных соединений показал, что структура металла шва напыленных образцов, выполненных без использования ПМП, имеет столбчатое строение с ориентацией зерен от линии наплавления к центру шва, в зоне сплавления металла шва с МАП при небольших увеличениях обнаруживается "ферритный" подрез, ухудшающий свойства сварного соединения. При механизированной сварке с наложением ПМП происходят ликвация легирующих элементов и вынос тугосплавных окисных соединений к поверхности сварочной ванны. В результате можно наблюдать слоистое строение металла шва. В зоне сплавления не наблюдается так называемого ферритного подреза. По-видимому, это связано с дроблением дендритов и измельчением зерна в зоне линии сплавления. Помимо этого при наложении ПМП отмечаются ликвационные процессы, что и способствует сосредоточению при переменном ПМП соединений, обогащенных Al, в определенных областях.

Испытания, проведенные для определения механических свойств сварного шва, показали (табл. 2), что при применении ПМП доля алюминия в наплавленном металле уменьшается, прочностные свойства незначительно повышаются, также повышаются пластические свойства. Это связано с

Таблица 1

Режимы сварки

Сварка		Сила тока, А	Напряжение, В	Скорость сварки, м/ч	Сила тока соленоида, А
В CO_2 по МАП	Общепринятая	260	27,0	26,5	—
	С МУ	235	27,0	26,5	2,5
Под флюсом по МАП	Общепринятая	300	27,5	26,5	—
	С МУ	270	27,5	26,5	2,5



а) *б*) *в*) *г*) *д*)

Рис. 2. Фрактограммы поверхности разрушения ударных образцов стали 09Г2С:
а — под надрезом, ×500; *б* — полоса смешанного разрушения, ×510; *в* — долом, ×510; *г* — характерные элементы разрушения вязкой составляющей, ×1500; *д* — характерные поверхности смешанного излома, ×1100

некоторым уменьшением содержания марганца, вследствие чего понижается бейнитная составляющая, ухудшающая пластические свойства металла шва.

Показатели ударной вязкости для сталей марок 20 и 09Г2С при использовании ПМП значительно повышаются как при положительных, так и при отрицательных температурах. Такое изменение KCU^{+20} и KCU^{-60} можно связать со значительным удалением из наплавляемого металла алюминатов различной дисперсности и в особенности мелкодисперсных, существенно ухудшающих механические свойства сварного шва.

Для рассмотрения этого предположения был проведен фрактографический анализ сварных соединений стали 09Г2С, выполненных механизированной сваркой под флюсом АН-348-А.

При проведении наплавок по МАП с использованием магнитного поля изломы характеризуются в зависимости от температуры испытаний (+20 °С или −60 °С) одинаковым характером поверхности излома в макроплане: под надрезом виден долом, а также основное поле поверхности разрушения характеризуется вязкой составляющей (рис. 2, *а*, *в*) и только отдельные узкие полоски — поверхностью смешанного разрушения (рис. 2, *б*) для KCU^{+20} или транскристаллитной для KCU^{-60}. Надо отметить различие хрупкой составляющей для разных температур испытаний. Для KCU^{+20} характерен внутризеренный скол, переходящий в квазискол с гребнями отрыва и вязкими прослойками (см. рис. 2, *б*). При детальном рассмотрении можно отметить, что фасетки скола имеют ручьистые узоры, в районе перехода к вязкой прослойке наблюдаются скопления включений, лежащих на поверхности (рис. 2, *д*).

Образцы, разрушенные при KCU^{-60}, характеризуются хрупким внутризеренным сколом, переходящим в транскристаллитный скол, типичные при разрушении при низких температурах и высокой скорости деформации (ударный изгиб). Можно отметить наличие вторичных трещин, поверхности фасеток — чистые, без включений.

Вязкое разрушение при различных температурах испытаний характеризуется различным рельефом ямочного характера (размер ямок как небольшой, так и средний). На стенках ямок видны следы волнистости (см. рис. 2 *а*, *в*, *г*), что указывает на значительные пластические деформации при разрушении. Включения округлой формы и осколки разрушенных включений расположены в ямках отдельного залегания (см. рис. 2, *г*). В общем случае вязкое разрушение на фоне глубоких протяженных ямок характеризует пластичный материал.

После анализа поверхности разрушения можно говорить о получении при сварке с ПМП наплавленного металла, представляющего по своей структуре композитный материал, состоящий из обогащенных алюминием областей шириной порядка

Таблица 2

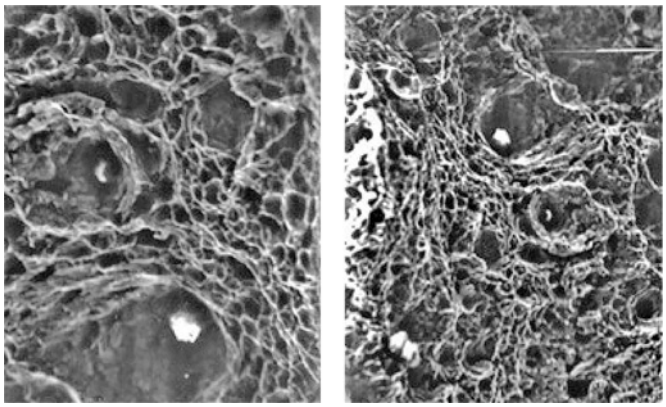
Свойства сварных соединений с МАП, выполненных с ПМП

Способ сварки	Марка стали	Механические свойства						Химический состав, %		
		$\sigma_в$	$\sigma_т$	δ, %	ψ, %	KCU^{+20}	KCU^{-60}	Al	Mn	Si
		МПа				МДж/м^2				
В защитном газе (CO_2)	20 09Г2С	652 696	459 586	22 20	61 46	0,68 0,86	0,49 0,53	0,51 0,58	0,85 0,86	0,50 0,68
Под флюсом	20 09Г2С	643 764	440 648	23 21	74 53	0,70 1,26	0,64 0,79	0,43 0,51	0,87 0,85	0,85 1,30

$(2\div5)10^{-3}$ см, расположенных в центральной части сварного шва и чередующихся с обширными областями вязкого разрушения с минимальным содержанием алюминия, которое приближается к процентному содержанию в стали 09Г2С, равному 0,02 %.

Необходимо отметить, что в зоне линии сплавления поверхность разрушения при варианте сварки под флюсом по МАП характеризуется ямочным рельефом с разрушением по строчечным включениям с переходом к внутризеренному хрупкому сколу с элементами межзеренного разрушения, также отмечаются гроздьевидные включения.

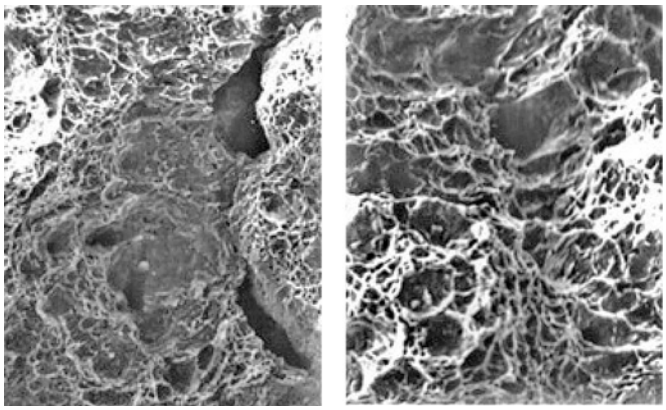
При использовании ПМП зона линии сплавления определяется вязким ямочным разрушением различного диаметра, но в основном глубокого залегания; на дне ямок расположены включения (рис. 3, 4). На их стенках видны следы волнистости, ямки окружены террасами вязких усталостных бороздок (см. рис. 3). При низких температурах имеются ямки малых размеров и отдельное залегание включений округлой формы темно-серого цвета, наблюдаются ямки отрыва (см. рис. 4). Могут быть расслоения, связанные с химической неоднородностью. В целом поверхность разрушения линии сплавления имеет значительную энергоемкость, что и связано с повышением пластических свойств и ударной вязкости и изменением природы "ферритного" подреза.



а) *б*)

Рис. 3. Фрактограммы поверхности разрушения ударных образцов стали 09Г2С, линия сплавления KCU^{+20}:

а — вязкая составляющая, ×500; *б* — неметаллические включения, ×1010



а) *б*)

Рис. 4. Фрактограммы поверхности разрушения ударных образцов стали 09Г2С, линия сплавления KCU^{-60}:

а — вязкая составляющая, ×500; *б* — характерные элементы разрушения, ×1010

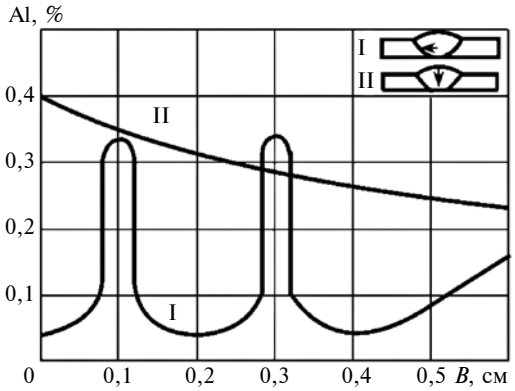


Рис. 5. Изменение содержания алюминия по сечению сварного шва

Для определения содержания алюминия в различных областях сварного шва был проведен микроанализ характерных участков. Изменения полученного химического состава представлены на рис. 5. На основании усредненных значений в каждой из точек можно проследить ликвацию алюминия по сечению шва и образование структуры композитного характера.

В этом случае можно предполагать разрушение образца при нагружении с учетом природы данного соединения, т. е. интенсивный рост трещины в пределах хрупкой зоны и затухание процесса роста в вязкой составляющей и как следствие изменение траектории трещины. Причем наиболее нестабильный участок сварного соединения в механокоррозионном отношении — зона линии сплавления — характеризуется вязкой составляющей с повышенными пластическими свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Картер В. И.** Металлические противокоррозионные покрытия. Л.: Судостроение, 1980. 167 с.
2. **Саакиян Л. С., Ефремов А. П.** Защита нефтегазопромыслового оборудования от коррозии. М.: Недра, 1982. 227 с.
3. **Крампит А. Г.** Технологические способы и приемы управления формированием сварного шва // Технология металлов. 2008. № 11. С. 34—38.
4. **Стеклов О. И., Кармазинов Н. П., Сычева М. А.** Влияние напыленного алюминия на свойства металла шва при механизированной сварке листового проката // Сварочное производство. 1988. № 10, С. 11, 12.
5. **Моравецкий С. И., Поршенков Н. А., Сокирко В. А.** Особенности электромагнитных воздействий на металлы и их сварные соединения (обзор) // Автоматическая сварка. 2007. № 6. С. 20—26.

УДК 621.78

А. А. МУХАМЕДОВ, д-р техн. наук, Д. М. БЕРДИЕВ, канд. техн. наук (Ташкентский ГТУ, Узбекистан),
e-mail: ravshan_iqtisod@mail.ru

Повышение абразивной износостойкости сталей термической обработкой с предварительной подготовкой структуры

Рассматриваются результаты термической обработки с целью повышения абразивной износостойкости на примере образцов из сталей Ст5Гпс, 35, 45, 65Г, У8 в сравнении с эталонным материалом — образцами из технического железа. Предлагается перед завершающей термической обработкой углеродистых и малолегированных сталей проводить предварительную нормализацию с экстремальной температуры 1100 °С.

Ключевые слова: абразивная износостойкость, термическая обработка, твердость, углеродистые, высокоуглеродистые и малолегированные стали, плотность дислокаций, незакрепленные абразивные частицы, предварительная подготовка структуры, твердорастворное упрочнение мартенсита.

The results of heat treatment for the purpose of increasing abrasive wear resistance are considered for the example of samples from steels Ст5Гпс, 35, 45, 65Г, У8 in comparison with the standard material — samples from technical iron. It is proposed that before the final thermal treatment of carbonaceous and low-alloyed steels, preliminary normalization be carried out from an extreme temperature of 1100 °С.

Keywords: abrasive wear resistance, heat treatment, hardness, carbon, high-carbon and low-alloy steels, dislocation density, loose abrasive particles, preliminary structure preparation, solid-solution hardening of martensite.

Одним из самых разрушительных является абразивное изнашивание. В условиях абразивного воздействия почвы и пыли работают все почвообрабатывающие машины, детали рабочих органов (РО) которых изготовляют из средне- и высокоуглеродистых сталей типа 40Г, 65Г, 70Г, Л53, Л65 и др., термически обработанных на высокую твердость. Даже в этом случае правильный выбор материала и способа упрочнения не гарантируется [1]. Положение усугубляется в ремонтном производстве, когда из-за недостатка необходимых сталей их замена другими сталями дает непредсказуемые результаты в части износостойкости изделия.

В данной работе сделана попытка решить две задачи:

повысить абразивную износостойкость сталей для деталей РО почвообрабатывающих машин термической обработкой с введением операций предварительной подготовки структуры;

установить эмпирические зависимости износостойкости сталей от параметров их структуры.

Исследовали образцы из средне- и высокоуглеродистых сталей 45, 65Г и У8 и для сравнения образцы из сталей 35, Ст5Гпс и технического железа. Техническое железо использовали как эталонный материал, а сталь Ст5Гпс как сталь, которую можно закалить на мартенсит при минимальном содержанием углерода (0,28 % С) [2]. В данном случае предварительная обработка заключалась в нормализации с температур нагрева от A_{c3} (или A_{c1}) + (30÷50) °С до 1200 °С. Завершающая термическая обработка включала закалку с обычно принятых для каждой марки стали температур нагрева и отпуск при 200, 350, 450 и 600 °С.

Параметры структуры определяли методами световой и электронной микроскопии и рентгеноструктурного анализа. В частности, состояние тонкой структуры оценивали по плотности дислокаций, определяемой по физической ширине рентгеновской линии интерференции (220) [3].

Лабораторные испытания на изнашивание проводили при трении скольжения о незакрепленные абразивные частицы кварца на установке ПВ-7 [4], так как в предыдущих исследованиях авторами было установлено сходство рядов износостойкости, т. е. сохранение количественных соотношений относительных износостойкостей при испытаниях на установке ПВ-7 и полевых испытаниях уплотнителя сошника хлопковой сеялки [5].

Результаты исследований показали, что с повышением температуры при нормализации наблюдается рост аустенитного зерна, но состояние тонкой структуры меняется по экстремальной зависимости. Максимум плотности дислокаций в α-фазе наблюдается, если температура нагрева при нормализации была 1100 °С (рис. 1). В предыдущих работах было установлено, что при температуре нагрева около 1100 °С начинается растворение тугоплавких примесных фаз в аустените. Это в основном кислород и азотсодержащие фазы, для начала растворения которых характерна химическая микронеоднородность твердого раствора. В этом случае при (γ—α)-превращении плотность дислокаций повышается [2, 5]. Нагрев до температуры 1200 °С во время нормализации способствует гомогенизации аустенита, а при охлаждении после (γ—α)-превращения плотность дислокаций снижается [2, 5].

После завершающей термической обработки происходит измельчение аустенитного зерна, примерно одинаковое для каждой марки стали, однако плотность дислокаций остается разной. Происхо-

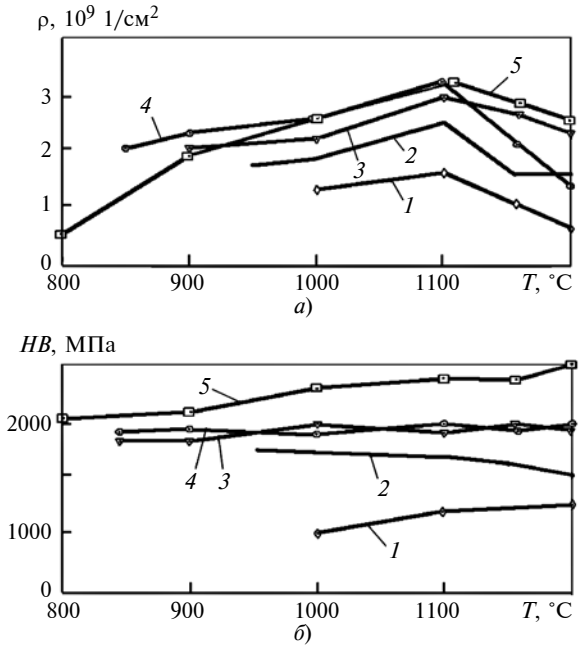


Рис. 1. Влияние температуры *T* нормализации на плотность ρ (*а*) дислокаций и твердость *HB* (*б*) технического железа (*1*) и углеродистых сталей Ст5Гпс (*2*), 35 (*3*), 45 (*4*) и У8 (*5*)

дит наследование элементов исходного субмикростроения, так как положение экстремума плотности дислокаций сохраняется (рис. 2). Это достаточно сильно влияет на абразивную износостойкость при трении скольжения о незакрепленные абразивные частицы (рис. 3). Если предварительную нормализацию проводили с температуры 1100 °С, то уменьшение износа было достаточно большим — от 20 до 50 % для сталей в низкоотпущенном состоянии. Также изменяется величина износа и после окончательного отпуска при 350, 450 и 600 °С. Закалка без отпуска может дополнительно повысить износостойкость сталей [6]. В наших опытах часть образцов из стали Ст5Гпс после завершающей закалки не подвергали отпуску, а часть образцов закаливали с разных температур и также без отпуска. Из рис. 3 видно, что износ стали Ст5Гпс после закалки без отпуска заметно уменьшился (до 40 %). Таким образом, предварительная подготовка структуры проведением нормализации с экстремальной температуры нагрева после завершающей термической обработки обеспечивает повышение абразивной износостойкости до 50 %. Закалка по экстремальным режимам без отпуска дополнительно повышает износостойкость.

Обоснованный выбор марки стали и способов ее упрочнения возможны при наличии данных о влиянии структурных параметров сталей на их износостойкость.

Анализ результатов проведенных опытов показал, что после закалки и отпуска при 200, 350, 450 и 600 °С существует линейная зависимость между величиной износа и плотностью: $Q = f\sqrt{\rho}$. Для каждой марки стали и каждой температуры отпуска износ закаленной и низкоотпущенной сталей можно определить по формуле [7]:

$$Q = Q_{0\text{Ст5Гпс}} - \alpha\Delta\sqrt{\rho} - a(\Delta C)^b,$$

где $Q_{0\text{Ст5Гпс}}$ — износ стали со структурой отпущенного мартенсита при минимальном (0,28 %) содержании углерода; $\Delta\sqrt{\rho}$ — разность квадратных корней плотностей дислокаций исследуемой стали и стали Ст5Гпс после закалки с 950 °С и низкого отпуска; ΔC — разность содержания углерода в исследуемой стали и в стали Ст5Гпс; α, *a*, *b* — коэффициенты и показатель степени.

Закаленные стали после отпуска при температуре 350 °С и выше имеют структуры ферритно-це-

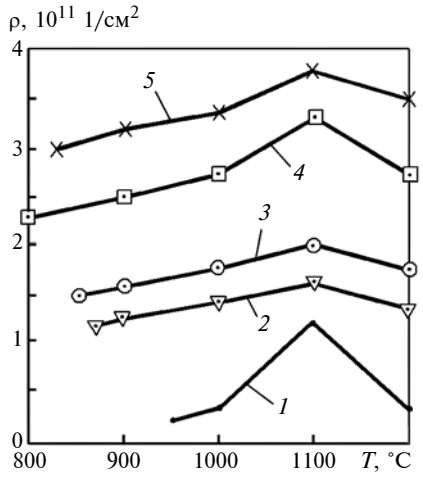


Рис. 2. Влияние температуры *T* предварительной нормализации на плотность ρ дислокаций после повторной закалки с температуры нагрева A_{c3} + (30÷50) °С (стали Ст5Гпс, 35, 45, 65Г) и A_{c1} + (30÷50) °С (сталь У8) и отпуска при 200 °С; стали: Ст5Гпс (*1*), 35 (*2*), 45 (*3*), 65Г (*4*) и У8 (*5*)

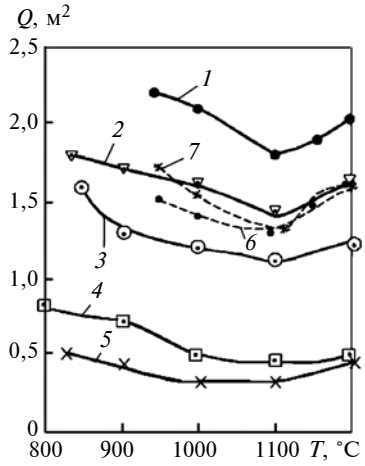


Рис. 3. Влияние температуры *T* предварительной нормализации на износ *Q* после повторной закалки и отпуска при 200 °С для сталей Ст5Гпс (*1*), 35 (*2*), 45 (*3*), У8 (*4*), 65Г (*5*) и стали Ст5Гпс без отпуска (*6* и *7*, где *7* — непосредственная закалка с указанных температур)

ментитной смеси и ступени между зависимостями $Q = f\sqrt{\rho}$ определяются только влиянием числа и размеров частиц цементита. Поэтому для определения износа можно использовать формулу

$$Q = Q_{0Fe} - \alpha\Delta\sqrt{\rho} - K\lambda^{-1},$$

где Q_{0Fe} — износ отожженного технического железа (эталон); ρ — плотность дислокаций; λ — среднее расстояние между частицами цементита в отпущенной стали; α, K — изменяемые коэффициенты, которые зависят от температуры отпуска.

Таким образом, показано, что термическая обработка предварительно подготовленной структуры, заключающаяся в нормализации углеродистых и малолегированной сталей с экстремальной температуры 1100 °С, повторном нагреве до принятых для каждой марки стали закалочных температур, закалки и отпуска, обеспечивает повышение на 20÷50 % износостойкости при трении скольжения о незакрепленные абразивные частицы.

Установлена эмпирическая зависимость между износостойкостью сталей и параметрами их структуры.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Ткачев В. Н.** Износ и повышение долговечности деталей сельскохозяйственных машин. М.: Машиностроение, 1971. 264 с.
2. **Mukhamedov A. A.** Heat treatment with double phase recrystallization for impoving service propezties of machine parts and tools // Heat treatment and technology of surface coating / VII Международный конгресс Термическая обработка. 11—14 декабря 1990 г. Москва. С. 38, 39.
3. **Кристаллография,** рентгенография и электронная микроскопия / Я. С. Уманский, Ю. А. Скаков, А. Н. Иванов, Л. Н. Расторгуев. М.: Металлургия, 1982. 632 с.
4. **Тененбаум М. М.** Сопротивление абразивному изнашиванию. М.: Машиностроение, 1976. 267 с.
5. **Мухамедов А. А., Тилабов Б. К.** Повышение износостойкости деталей с твердосплавными покрытиями термической обработкой // Известия ВУЗов. Черная металлургия. 2003. № 12. С. 35—37.
6. **Структура** и износостойкость стали У8, обработанной лазером / Л. Г. Коршунов, А. В. Макаров, В. М. Счастливцев и др. // Физика металлов и металловедение. 1988. Т. 66. Вып. 5. С. 948—957.
7. **Бердиев Д. М., Мухамедов А. А.** Выбор сталей и технология их термического упрочнения с помощью компьютерной программы // Техника и технология. 2009. № 1. С. 24—26.

УДК 669

С. А. СОРОКИНА, канд. техн. наук, А. Д. РОМАНОВ
(Нижегородский ГТУ им. Р. Е. Алексеева), e-mail: nil_st@nntu.ru

Исследование причин уменьшения долговечности пресс-формы термопластавтомата

Исследована повышенная коррозия пресс-формы термопластавтомата. Рассмотрены причины уменьшения ее долговечности.

Ключевые слова: сталь, химический состав, механические свойства, коррозия, термопластавтомат, долговечность.

The increased corrosion of a mold of a thermoplastic automatic machine is studied. The reasons for the reduction of its durability are considered.

Keywords: steel, chemical composition, mechanical properties, corrosion, thermoplastic automatic machine, durability.

Современный термопластавтомат (ТПА) обеспечивает быстрое и эффективное изготовление различных изделий из гранулированных пластмасс с помощью пресс-форм в автоматическом режиме. Однако изготовление пресс-форм из высококачественной стали достаточно дорого — до 500 тыс. евро. На форму при литье под давлением периодически действуют тепловые и механические нагрузки, которые в сочетании с другими агрессивными факторами вызывают ее коррозию, изнашивание и т. д. По мере износа литейной формы повышается неравномерность распределения температуры, что затрудняет управление ею, особенно для материалов с небольшой термической стабильностью. Коррозия пресс-формы снижает качество изделий и увеличивает время производственного цикла. Однако самая аккуратная эксплуатация пресс-форм для литья пластмассовых изделий не может предотвратить постепенную потерю качества внешнего вида получаемой продукции. Нанесение покрытий обеспечивает длительную эффективную работу пресс-формы и ТПА, предотвращает коррозию и образование отложений, исключает или сокращает простои оборудования, связанные с ее ремонтом и обслуживанием. Изнашивание рабочей поверхности пресс-формы — явление сложное и малоизученное. Причинами изнашивания могут быть: инородные твердые включения в расплаве полимера; мелкие поломки и сбои в системе смыкания; применение ненадлежащего инструмента для снятия отливок; случайные повреждения в процессе сборки/разборки во время мелких ремонтов и др. В широком смысле — это трение деталей пресс-форм, гидравлические удары, коррозия, диффузия, химическое взаимодействие и другие процессы.

Исследование повреждений инструмента для пресс-форм

пластмассовой промышленности показало, что доминируют пять видов разрушений [1—4]: изнашивание (абразивное, адгезионное, смешанное, коррозионное); скалывание; пластическая деформация; растрескивание; налипание.

Коррозия элементов системы может быть вызвана длительным контактом с расплавом полимерного материала и добавками (особенно антипиренами), а также продуктами их деструкции, которые выделяются в процессе переработки.

Химическое взаимодействие металла пресс-форм с материалом отливки, смазочным материалом и газами проявляется в виде различных химических реакций с образованием хрупких соединений, которые выкрашиваются и уменьшают чистоту поверхности вкладышей пресс-форм и отливок.

Физическое взаимодействие металла вкладышей пресс-форм с материалом отливки, смазочным материалом и газами проявляется в виде диффузии, науглероживания, обезуглероживания и других процессов, приводящих к снижению их механических свойств и стойкости.

Идентифицировать вид коррозии трудно и, следовательно, возможна ошибка при определении технологически и экономически оптимальных мер противодействия коррозии. Наиболее распространено коррозионно-механическое изнашивание технологического оборудования.

Оптимальный выбор марки стали позволяет снизить себестоимость единицы пластмассового изделия, при этом следует учитывать:

тип пластмассы — если пластмасса коррозионно активна, необходимо использовать коррозионно-стойкую сталь или дополнительное хромирование поверхности пресс-формы. При технико-экономическом анализе может оказаться, что стоимость формы из такой стали меньше стоимости одного переполирования или замены детали из углеродистой стали;

требуемое состояние поверхности — полирование составляет до 30 % общей себестоимости формы. Для качественного полирования необходимо использовать стали с однородной структурой, низким содержанием серы и неметаллических включений, т. е. стали, прошедшие электрошлаковую переплавку или вакуумную дегазацию, или то и другое, т. е. особовысококачественные стали;

обрабатываемость — стоимость механической обработки составляет ≈35 % и использование материалов с однородной структурой и повышенным содержанием серы позволяет уменьшить продолжительность изготовления, расход инструмента и др.;

объем производства, стабильность при закалке и т. д.

Выбор марки стали определяет то, что все виды разрушения можно устранить и только изнашивание можно лишь уменьшить.

Пресс-формы для литья пластмасс под давлением делятся на классы (табл. 1). При изготовлении пресс-форм используются российские стали 40Х, 40Х13, 4Х5МФС или импортные аналоги компаний Bohler, Uddelholm, SSAB, например, NIMAX, 1.2312, 1.2083, 1.2343 [4, 5]. Содержание Cr в стали заметно влияет на сопротивление коррозии, вызываемой паром при высоких температурах; скорость коррозии увеличивается. Стали, содержащие 2 % Cr, начинают быстро окисляться при температуре 650 °С. Образующаяся окалина очень хрупка и легко отслаивается при резких изменениях температуры или при ударах.

При эксплуатации на одном из предприятий пресс-форма ТПА стала активно изнашиваться, вследствие чего снизилось качество производимых деталей. Характерной особенностью всех выявленных на раме дефектов было их расположение по периметру смыкания полуформ. Поврежденная поверхность имела бугристый вид с отдельными "затертыми" участками, что очень похоже на умеренное адгезионное изнашивание. Остатки пластмассы, накипь от охлаждающей жидкости, пригар консервирующих материалов отсутствовали. Не наблюдались сколы, следы пластической деформации, растрескивания, налипания. Не было явных отложений продуктов коррозии, видимо потому, что в реакции участвовали органические соединения.

Наблюдались повреждения, похожие на коррозионные язвы или пятна (вид дефекта не уточняли из-за невозможности раз-

Таблица 1

Классы и материалы пресс-форм

Класс пресс-формы	Число отливок	Материалы
101	1 000 000 и более	Основа пресс-формы из закаленной стали твердостью > 280 *HB* (29 *HRC*). Матрица и пуансон из стали, закаленной до твердости > 48 *HRC*. Используются инструментальные стали с последующей закалкой и отпуском: 40Х13 (1.2083), 4Х5МФС (1.2343), 5ХН3М (1.2721)
102	Менее 1 000 000	Матрица и пуансон пресс-формы из стали, закаленной до твердости > 48 *HRC*. Основа пресс-формы из закаленной стали твердостью > 280 *HB* (29 *HRC*), в основном предварительно улучшенные стали 38ХНМ, 40Х (1.2311, 1.2738, Toolox)
103	Менее 500 000	Основа пресс-формы из стали твердостью > 165 *HB* (7 *HRC*). Матрица и пуансон твердостью > 280 *HB* (29 *HRC*) из сталей 38ХНМ, 40Х и др.
104	Менее 100 000	Для ограниченного производства преимущественно из неабразивных пластиков
105	Менее 500	Для изготовления прототипов

резать данную часть изделия). Одиночных, групповых или исходящих из коррозионных очагов трещин не обнаружено. Дефекты пресс-формы приведены на рис. 1, *а—г*.

Провели комплексное исследование причин образования данного дефекта и путей увеличения жизненного цикла пресс-формы: анализ химического состава стали, измерение твердости, определение микроструктуры стали, хроматографический анализ пластикового материала.

Исследуемая рама относится к деталям пресс-форм класса 102. Результаты сравнения химического состава приведены в табл. 2. Первые две строки — результаты анализов, проведенных производителями сталей, третья строка — результаты оптического эмиссионного спектрального анализа, выполненного в ходе исследования.

Содержание химических элементов в сталях разных партий отличается незначительно. Наиболее близкой по составу отечественной сталью является сталь 40Х2ГНМ, выпускаемая по ТУ 14-1-890—2004. По содержанию S, P и остаточных элементов (ГОСТ 4543—2016) относится к категории особовысококачественной стали.

На приборе Rockwell 574 измеряли твердость двух фрагментов, отделенных от рамы пресс-формы: средняя твердость фрагмента 1 составила 30,4 *HRC*, фрагмента 2—28 *HRC*. Твердость рабочей поверхности не измеряли по техническим причинам.

Структура стали, из которой изготовлена пресс-форма, однородна в пределах одного микрошлифа и представляет собой сорбит отпуска (рис. 2, *а*, *в*). Структурно свободный феррит не выявлен. Микроструктура стали удовлетворительная. Сталь подвергалась термическому улучшению. Загрязнения примесями и несплошности типа пор и микротрещин не выявлены. Обезуглероженный слой не выявлен (см.

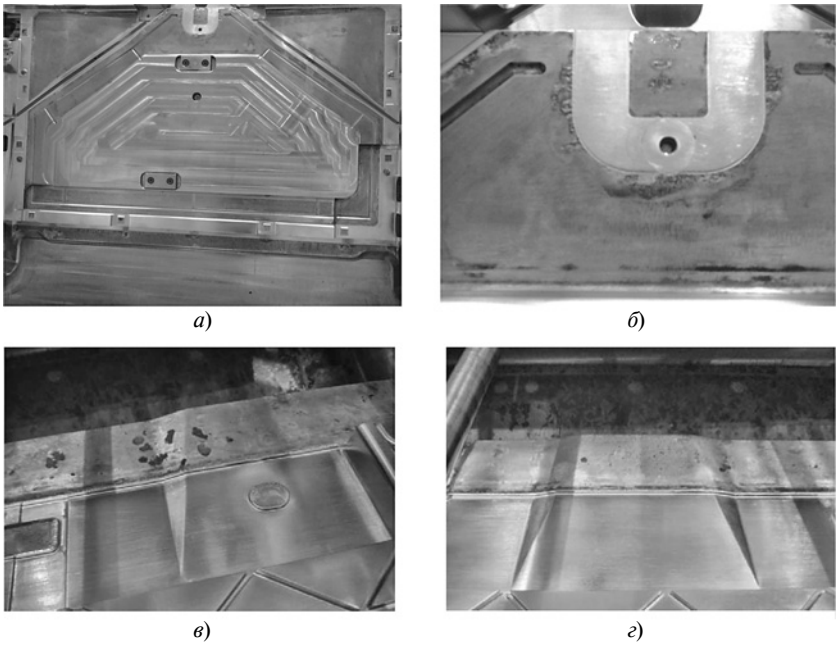


Рис. 1. Исходный вид пресс-формы (*а*), изменение поверхности в верхней части (*б*), коррозионные язвы/пятна (*в*), затертые участки (*г*)

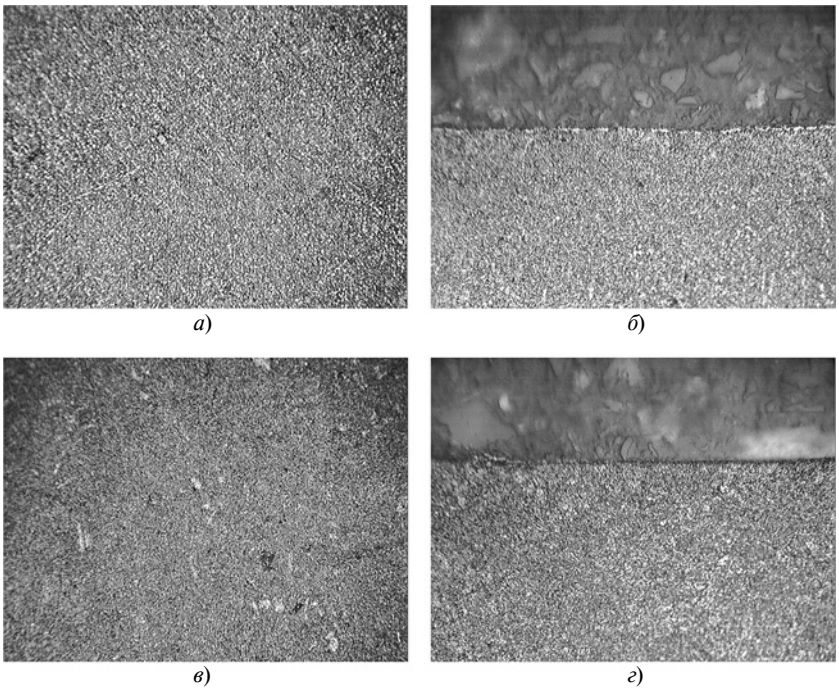


Рис. 2. Микроструктуры сердцевины (*а*) и края (*б*) фрагмента 1 (×200), сердцевины (*в*) и края (*г*) фрагмента 2 (×200)

Таблица 2

Химический состав стали

Номер эксперимента	Содержание, %, химических элементов							
	C	Cr	Si	Mn	Ni	Mo	S	P
1	0,35	1,90	0,230	1,47	1,04	0,190	0,001	0,006
2	0,35	1,96	0,240	1,53	1,17	0,250	0,001	0,009
3	0,40	1,99	0,275	1,55	1,17	0,268	0,0025	0,011

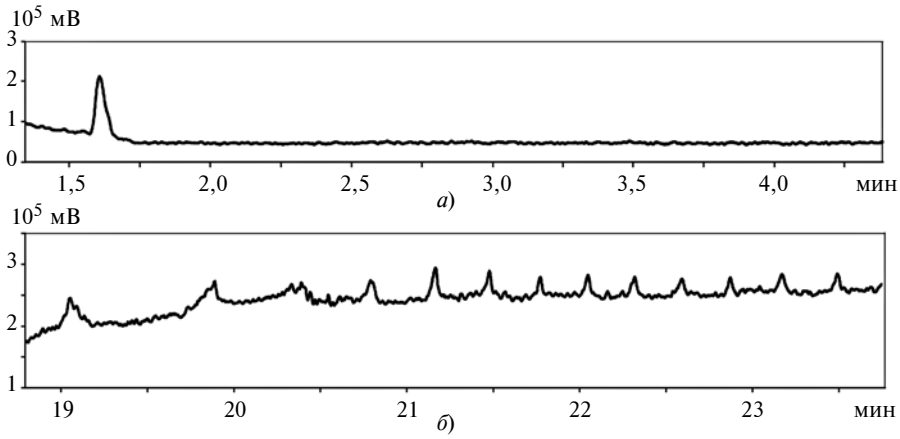


Рис. 3. Хроматограммы материала Durethan при температурах до 300÷325 °С (*а*) и выше 400 °С (*б*)

рис. 2, *а—г*). Другие изменения структуры не выявлены.

Хроматографический анализ газообразования материала Durethan DP BKV60 H 2.0 EF (партия KUM HILA + VOLA) при температуре до 300÷325 °С, выполненный на хроматографе Shimadzu GC-QP2010Plus, не выявил выделения углеводородов, выделялись только водяные пары (рис. 3, *а*). При температуре выше 400 °С идентифицированы: ряд углеводородов с числом атомов углерода до 44 (С13, 15, 20, 17, 44), а также CO, N_2, O_2 и другие соединения (рис. 3, *б*).

Попавший в форму воздух и выделившиеся из материала газы вытесняются по линии разъема пресс-формы. Некоторый не удаляемый объем газов сжимается под давлением поступающего материала и способствует образованию дефектов на поверхности пресс-формы. При повышении давления может произойти "воспламенение от сжатия" поступающего материала. При этом возникают химические реакции металла деталей пресс-форм с газами с образованием хрупких соединений, которые выкрашиваются и уменьшают чистоту поверхности.

Выводы

Быстрый износ кромок пресс-формы и, как следствие, облой на изделиях из стеклонаполненного материала Durethan имеют комплексную коррозионно-механическую причину.

В процессе заполнения формы давление повышается, особенно при изготовлении тонкостенных изделий или изделий с длинными путями подачи материала. Давление в форме может превысить усилие запирания формы. В этом случае половинки формы приоткрываются и в образовавшийся зазор затекает материал.

Большое влияние на коррозию оказывает влага, которая конденсируется при остановках процесса. При использовании недостаточно просушенных гигроскопичных полимеров на поверхности фронта потока или на его внутренней поверхности образуются пузырьки влаги. Коррозионное изнашивание может быть связано с повышенной влажностью материала Durethan, повышенной реальной температурой литья из-за высокого внутреннего давления в формообразующей полости, наличием зазора между рамами полуформ.

В результате совместного действия механического и коррозионного факторов в поверхностных слоях металла активизируются процессы упругопластического деформирования, химические и электрохимические реакции и т. д. Поэтому в условиях эксплуатации интенсивность изнашивания при коррозионно-механических воздействиях определяется величиной и характером механических нагрузок, активностью коррозионной среды и физико-химическими свойствами конструкционных материалов. Давление меньше, чем химический состав газов и их температура влияет на характер и скорость коррозии.

Влияние углеводородов, образующихся при температуре выше 350 °С, неоднозначно. Они могут как ускорять коррозию, так и служить ее ингибиторами. Сернистые соединения, как правило, сильно ускоряющие процесс, анализом не выявлены.

Механическое изнашивание можно уменьшить применением более твердого материала (или нанесением покрытия, например, хромированием), более четкой наладкой и постоянным контролем состояния пресс-формы.

Перегрев расплава в результате высокой температуры и/или времени пребывания может значительно изменить весь комплекс технологических и эксплуатационных свойств полимерного материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Основы** проектирования процессов литья под давлением полимерных материалов / А. М. Воскресенский, В. Б. Войцеховский, М. Н. Каспаров, Ф. А. Коугия. М.: ЦИНТИХИМНЕФТЕМАШ, 1992. 69 с.

2. **Видгоф Н. Б.** Основы конструирования литьевых форм для термопластов. М.: Машиностроение, 1979. 264 с.

3. **Йоханнабер Ф.** Литьевые машины: Справочное руководство / Пер. с англ. под. ред. Э. Л. Калинчева. СПб.: Профессия, 2009.

4. **ГОСТ 27358—87.** Пресс-формы для изготовления изделий из пластмасс. Общие технические условия. М.: ИПК "Издательство стандартов", 2004. 15 с.

5. **Чернышов Е. А.** Литейные сплавы и их зарубежные аналогии / М.: Машиностроение, 2006. 336 с.

6. **Палей М. А., Романов А. Б., Брагинский В. А.** Допуски и посадки. В 2-х ч. СПб.: Политехника, 2001. 608 с.

7. **http://www.besteels.ru/**

8. **http://www.vzrt.ru/**

УДК 621.762.5

С. Н. НАМАЗОВ, д-р техн. наук, А. А. ДЖАФАРОВА, З. А. НАМАЗОВА
(Азербайджанский ТУ, г. Баку), E-mail: ariff-1947@mail.ru

Структура и свойства оксидированных порошковых материалов на основе железа

Рассматривается получение деталей из спеченных железографитовых и железомедномграфитовых порошковых материалов, которые подвергают оксидированию в среде перегретого пара для образования на поверхностях деталей пленки твердого оксида Fe_3O_4. Разработана модель "залечивания" пор при оксидировании. Для повышения износостойкости рабочих поверхностей использовали электромеханическую обработку, способствующую измельчению структуры материала и повышению твердости оксидированных поверхностей.

Ключевые слова: железографит, железомедномграфит, порошковый материал, оксидирование, электромеханическая обработка.

The obtaining of parts from sintered iron-graphite and iron-copper graphite powder materials, which are subjected to oxidation in a superheated steam environment to form solid oxide films of Fe_3O_4 on the surfaces of the parts, is considered. A model of healing of pores during oxidation is developed. To improve the wear resistance of working surfaces, electromechanical treatment was used, which helps to grind the structure of the material and increase the hardness of the oxidized surfaces.

Keywords: iron graphite, iron-copper graphite, powder material, oxidation, electromechanical processing.

Анализ технической литературы показал, что наиболее перспективным и экономически выгодным методом оксидирования пористых порошковых изделий является паротермическое оксидирование. Однако широкому применению этого метода не способствует крайне небольшая информация: о процессе практически не упоминается в учебниках для вузов и полностью отсутствуют или даются двумя-тремя строками сведения в справочниках и монографиях по порошковой металлурги. Особенно ощущается недостаток публикаций о практическом применении паротермического оксидирования [1, 2]. Отсутствуют также публикации по разработке оксидированных износостойких порошковых сталей, получаемых из относительно недорогих низколегированных порошков на основе железа, которые можно использовать для производства деталей бытовой техники традиционными методами порошковой металлургии. Такие материалы должны сочетать хорошую обрабатываемость при высоких скоростях резания, высокую износостойкость, газонепроницаемость, достаточную механическую прочность, способность поверхности удерживать жидкий смазочный материал [3, 4].

Для исследований использовали порошки: железа ПЖ2М3 (ГОСТ 9849—86), меди ПМС2 (ГОСТ 4960—75), стеарата цинка марки Ч (ТУ 6-99-94-73—77) для парфюмерно-косметической промышленности (все производство России) и графита марки ГК-3 (ГОСТ 17022—76) (Украина). Из этих порошков приготовили шихты, содержащие, масс. %: 0÷4,5 Cu; 0÷3 C; остальное Fe. В качестве технологической смазки в шихты добавили 0,8 масс. % стеарата цинка. Порошки смешивали в Y-образном смесителе в течение 1 ч. Шихты прессовали на гидравлическом прессе HPM-100 S при давлениях 400, 700 и 1000 МПа. Прессовки спекали в печи KOYO LINDBERG непрерывного действия при температуре 1100÷1150 °С. Паротермическое оксидирование деталей проводили в печи ELINO по специальному режиму при температуре 570 °С. Кроме того, проводили оксидирование на воздухе при 600 °С.

Плотность и пористость образцов определяли по стандартным методикам, а герметичность деталей проверяли под давлением 1 МПа с помощью специального приспособления. Механические свойства образцов, в том числе твердость, прочность, ударную вязкость, определяли по стандартным методикам с использованием специального приспособления на растяжение.

Микроструктурный, химический и фазовый анализы выполняли стандартными методами. Микроструктуры спеченных оксидированных и прошедших электромеханическую обработку (ЭМО) образцов исследовали на металлографическом микроскопе PME OLYPMUS (Япония). Фазовый анализ проводили на аппарате ДРОН-2 с использованием отфильтрованного Fe-излучениия.

Триботехнические характеристики определяли на призматических порошковых образцах по схеме "вал — колодочка" в условиях сухого и жидкостного трения при постоянной скорости скольжения 2 м/с и нагрузке трения 2, 4, 6 и 8 МПа.

Разработаны технологические процессы получения порошкового железомедного графита спеканием и спеканием с парооксиди-

рованием. Легирование железографита медью повышает прочность образцов. Однако при содержании более 3 масс. % С прочность спеченных образцов при растяжении снижается, тогда как с увеличением содержания Cu она монотонно повышается. После парооксидирования образцы ведут себя по-разному, в зависимости от содержания меди, что связано с дисперсионным твердением за счет включений меди.

Показана перспективность использования оксидированных спеченных медистых сталей. Установлено, что пористость как исходных, так и оксидированных железомедных образцов с увеличением содержания меди возрастает практически линейно. Влияние углерода на прочность спеченных и оксидированных медистых сталей носит экстремальный характер: минимум прочности при содержании 3 % С.

Создана упрощенная модель "залечивания" пор в спеченной стали в процессе оксидирования. Расчеты показали, что за 1 ч обработки водяным паром с температурой 575 °С на поверхности пор образуется защитная пленка оксида Fe_3O_4 толщиной ≈40 мкм. С учетом образования пленки оксида Fe_3O_4 приняли также по упрощенной модели, что поры имеют сплюснутую форму (справедливо для холодного прессования брикетов) и ромбовидное сечение с диагоналями 60 и 20 мкм, что позволяет ориентировочно рассчитать толщину пленки.

При уменьшении в результате оксидирования пористости на 2 % (при исходной пористости 12 %) толщина образующейся пленки оксида Fe_3O_4 составляет ≈20 мкм. Такие пленки, которые относятся к толстым, значительно повышают коррозионную стойкость металлов. Одновременно идет значительное "залечивание" пор в результате увеличения объема материала при образовании Fe_3O_4 из железа в соответствии со схемой, показанной на рис. 1, где *1* — объем поры, которой уменьшился после насыщения, *2* — объем поры до насыщения, *3* — поверхность поры с оксидами, кислород в поры попадает через открытые поровые каналы.

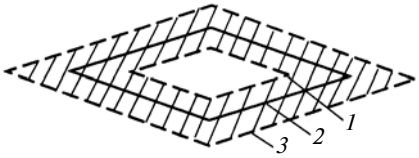


Рис. 1. Схематичное представление "залечивания" пор при оксидировании стали:

1 и *2* — поверхность поры соответственно после и до оксидирования; *3* — поверхность проникновения кислорода. Заштриховано проникновение образовавшийся Fe_3O_4

Таким образом, порошковые оксидированные медистые стали приобретают повышенные антикоррозионные свойства и их можно использовать в условиях повышенной влажности, в средах с повышенным содержанием CO_2 и других средах [7, 8].

Увеличение содержания меди в шихте существенно повышает прочность $\sigma_в$ при растяжении спеченных образцов (рис. 2, *а*). Наиболее активное действие меди наблюдается при содержании углерода, близком к эвтектоидному составу стали (0,8÷1 % С). При отсутствии углерода в составе влияние меди на упрочнение материала в процессе спекания не столь существенно.

Рассматривалось также влияние методов оксидирования на структуру и свойства пористых железомедномграфитовых материалов. Установлено, что пористые порошковые материалы с гетерогенной структурой можно получать не только легированием основы материала, но и дополнительной химико-термической обработкой, например, оксидированием. Наиболее оптимальным является оксидирование в среде перегретого пара при температуре 570 °С.

После паротермического оксидирования микроструктура легированного медью и графитом материала значительно изменяется: увеличивается дисперсность перлита, а сетка цементита, образовавшегося по границам частиц и вблизи пор, разрывается. В порах и поровых каналах появляются оксидные включения, которые закупоривают дренажные кана-

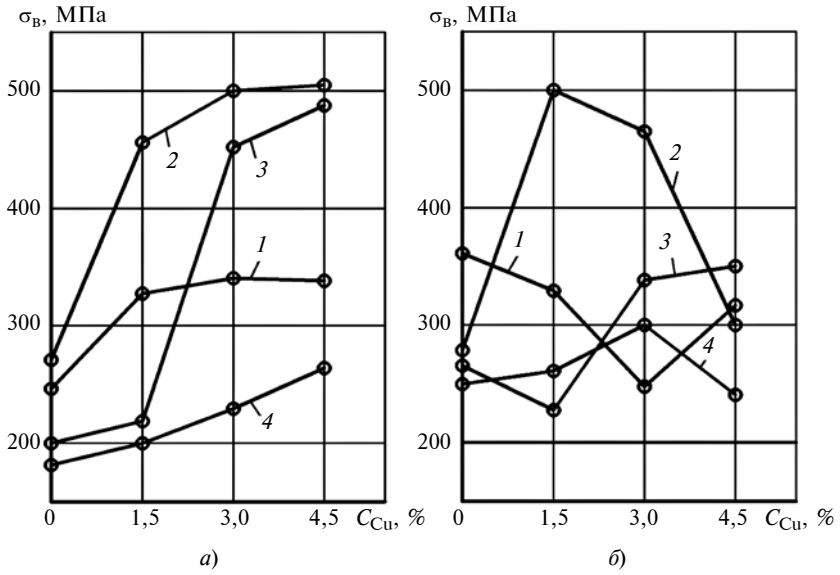


Рис. 2. Зависимости прочности σ при растяжении спеченных (*а*) и парооксидированных (*б*) образцов от содержания порошка меди C_{Cu} в шихте при содержание C_C соответственно 0 (*1*), 1 (*2*), 2 (*3*) и 3 масс. % (*4*)

Антифрикционные свойства оксидированных железографитовых материалов при торцевом трении со сталью 45 на воздухе и скорости скольжения 55 м/с

Материал	Нагрузка трения P, МПа	Интенсивность изнашивания $J \cdot 10^{-8}$	Износ по массе 10^{-9}, мг/мм	Коэффициент f трения	Удельный тепловой поток q, МВт/м^2
ЖГр1,5Д2	0,4 0,5 0,6	0,15 1,4 18,0	0,09 2,4 4,2	0,16 0,13 0,11	0,90 1,35 1,95
ЖГр0,8	0,4 0,5 0,6	0,70 1,5 10,0	2,3 2,5 45,0	0,20 0,14 0,25	0,90 1,35 До 3,5

Примечание. В таблице и тексте интенсивность J изнашивания линейная безразмерная величина.

лы и обеспечивают герметичность детали.

Оксидированный материал марки ЖГр1,5Д2 имеет весьма высокие износостойкость и чистоту поверхности при трении без смазывания со скоростью скольжения до 50 м/с на воздухе. Это позволяет рекомендовать материал в качестве торцевого уплотнения, работающего в жидких и газообразных средах и обеспечивающего высокую герметичность.

Оксидированный материал марки ЖГр0,8 при работе без смазывания имеет высокую износостойкость только при небольших (0,2÷0,3 МПа) нагрузках.

Образование пятен износа позволяет предположить, что в месте контакта антифрикционного материала с контртелом — торцевым уплотнением, может находиться пластифицированная пленка, которая существенно снижает его теплонагруженность и повышает ресурс.

Антифрикционные свойства парооксидированных железографитовых и железомедномграфитовых материалов при сухом трении приведены в таблице.

При трении в жидких агрессивных средах оксидированный пористый материал проявляет повышенную электрохимическую активность по сравнению с компактным материалом аналогичного состава, полученным литьем. Износ пористого материала при трении в жидких агрессивных средах интенсифицируется в результате, во-первых, электрохимической реакции $Fe \rightarrow Fe^{2+} + 2e$, во-вторых, вследствие анодного разупрочнения материала на межчастичных контактах.

Изучение износостойкости оксидированных порошковых материалов в условиях сухого трения показало, что приработка антифрикционной пары идет одновременно с образованием пленок меди на поверхности железной матрицы. Приблизительно через 300÷400 м пути трения возникает дополнительное окисление материала.

Несколько иначе ведут себя образцы, оксидированые в обычной атмосфере при 600 °С. Деформация поверхностных слоев менее твердых оксидов типа Fe_2O_3 приводит к некоторому их смещению в направлении силы трения и, как следствие, образованию плавного завала частицы и "хвостов". Относительно большой износ этих образцов связан с меньшим содержанием в их структуре твердых оксидов типа Fe_3O_4, которые защищают частицы от деформации и износа.

С целью повышения износостойкости рабочей поверхности деталей из разработанных железомедномграфитовых материалов их подвергли электромеханической обработке (ЭМО) на разработанной электромеханической установке, вмонтированной в то-

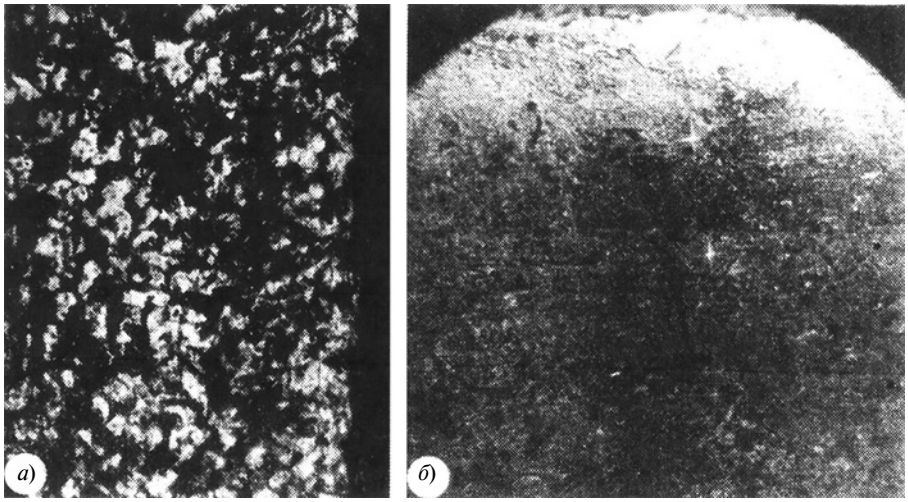


Рис. 3. Структуры оксидированных железомедномграфитов до (*а*, ×160) и после ЭМО (*б*, ×800)

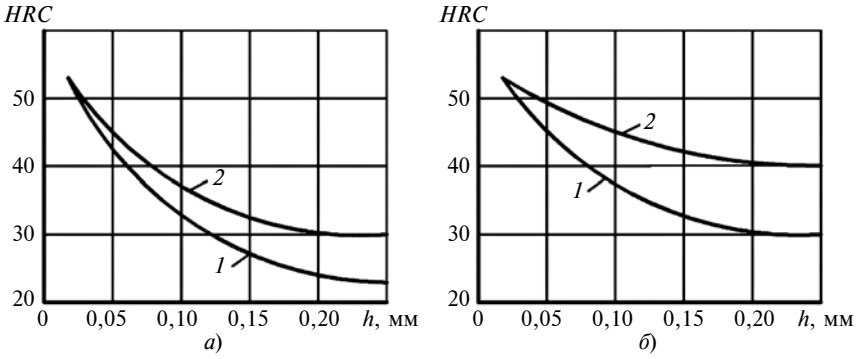


Рис. 4. Изменение твердости *HRC* по глубине *h* поверхностного слоя при режимах:
а — I = 550 (*1*) и 2750 А (*2*); ρ = 6,8 г/см^3; n = 100 мин$^{-1}$; S = 0,12 мм/об; P = 550 Н; *б* — ρ = 5,3 (*1*) и 6,25 г/см^3 (*2*); I = 750 А; n = 60 мин$^{-1}$; S = 0,12 мм/об; P = 1500 Н

Рис. 5. Профилограммы поверхностей спеченных роликов до (*а*) после (*б*) ЭМО

карный станок. Установлено, что после ЭМО на оксидированной поверхности образцов появляется светлый нетравящийся слой, который является результатом его закалки при интенсивном отводе тепла в холодную деталь. Поэтому структура поверхностного слоя состоит из бесструктурного мартенсита, который образуется при высоких давлениях и скоростях превращения [9, 10].

Таким образом, ЭМО оксидированных порошковых изделий позволяет повысить их плотность, изменить структуру (рис. 3), в 2 раза и более повысить твердость поверхностного слоя по сравнению с его исходной твердостью (рис. 4), а также значительно уменьшить шероховатость поверхности (рис. 5). На основании проведенных исследований были установлены оптимальные режимы обработки для роликов насосного узла ротационного компрессора: плотность материала ролика ρ = 6,7 г/см^3: сила тока I = 550÷600 А; нагрузка трения p = 1500 Н; частота вращения шпинделя n = 60÷100 мин$^{-1}$ и подача деформирующего инструмента S = 0,12 мм/об.

Выводы

Определены возможности и перспективы реализации разных процессов оксидирования пористых материалов на основе железа, обеспечивающие гетерогенность их структуры и достаточно высокие физико-механические и триботехнические свойства.

Разработана упрощенная модель схемы "залечивания" пор при оксидировании железографитовых порошковых материалов, позволяющая рассчитать толщину оксидной пленки.

Установлено, что после ЭМО оксидированных рабочих поверхностей структура поверхности резко измельчается и представляет собой бесструктурный мартенсит.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Мамедов А. Т.** Порошковые материалы конструкционного и антифрикционного назначения. Баку: Элм, 1991. 188 с.
2. **Мамедов А. Т., Мамедова А. А.** Легированные порошковые материалы на основе железа, подвергаемые оксидированию // Материалы докладов междунар. науч.-техн. конф. "Проблемы машиностроения на пороге XXI века". Баку, 2000. С. 95—98.
3. **Мамедов А. Т.** Конструкционные и антифрикционные порошковые материалы. Баку: Элм, 2006. 458 с.
4. **Джафарова А. А., Иманова Р. А.** Влияние пористости оксидированных порошковых материалов на основе железа на их триботехнические характеристики // Вісник Національного технического Університету "ХПІ". Харьков, 2016. № 4 (1176). С. 7—10.
5. **Намазов С. Н., Джафарова А. А., Кахраманов В. Ф.** Структурные характеристики порошкового железографита с последующим оксидированием // Сб. тр. VII междунар. науч.-практ. конф. "Инновационные технологии в машиностроении". Томск: Томский политехнический университет, 2016. С. 91—94.
6. **Джафарова А. А., Иманова Р. А.** Твердость и микроструктура железографита, подвергнутого оксидированию // Ученые записки АзТУ. 2016. № 4. cild s. С. 89—98.
7. **Джафарова А. А., Иманова Р. А.** Механические свойства спеченного и парооксидированного железомедьграфита // Журнал АзТУ. Машиноведение. 2016. № 1. С. 36—40.
8. **Джафарова А. А.** Износостойкость спеченных порошковых материалов на основе железа // Ученые записки Азербайджанской Государственной Морской Академии. 2017. № 1. С. 51—55.
9. **Намазов С. Н., Джафарова А. А., Абдулазимова Е. А.** Легирование порошковых материалов на основе железа, подвергаемых оксидированию // Металлургическая и горнорудная промышленность. 2017. № 2. С. 38—40.
10. **Джафарова А. А., Иманова Р. А.** Исследование влияния электромеханической обработки парообработанных изделий из железографитовых порошковых материалов на их свойства // Матер. 2-й науч.-техн. конф. "Проблемы металлургии и материаловедения". 2017. С. 224—226.

УДК 621.822

А. Н. БОЛОТОВ, И. В. ГОРЛОВ, доктора технических наук (Тверской ГТУ), М. Г. РАХУТИН, д-р техн. наук (НИТУ МИСиС), e-mail: gorloviv@yandex.ru

Новый способ восстановления изношенных поверхностей методом пластического деформирования

Приведены результаты исследования восстановленных пластическим деформированием по прилегающим поверхностям изношенных деталей. Получено выражение для определения контактного давления на рабочую поверхность индентора. Качественно новые трибологические свойства восстановленной поверхности повышают ее износостойкость.

Ключевые слова: исследование, трение, износ, восстановление, пластическое деформирование, давление.

The results of a study of the worn parts recovered by plastic deformation on the adjacent surfaces are presented. An expression is obtained for determining the contact pressure on the working surface of the indenter. Qualitatively new tribological properties of the reconstructed surface increase its wear resistance.

Keywords: research, friction, wear, restoration, plastic deformation, pressure.

Значительная стоимость новых запасных частей машин и часто их невысокое качество способствуют развитию новых технологий восстановления локально изношенных деталей. Известно, что до 70 % металлоемких дорогостоящих деталей, которые выбраковываются при ремонте, имеют износ до 0,3 мм и пригодны для восстановления. Стоимость восстановления большинства таких деталей значительно ниже стоимости новых, при этом затраты на материалы в 15—20 раз меньше, что способствует конкуренции на ремонтном рынке.

Основные методы восстановления деталей условно можно разбить на две группы: наращивание изношенных поверхностей и их обработка. При наращивании свойства присадочного материала, как правило, отличаются от свойств основного материала. Так как присадочный материал наносится с большими напусками, необходима последующая сложная механическая обработка с использованием дорогостоящего оборудования. При использовании методов обработки изношенная деталь обрабатывается в ремонтный размер или пластически деформируется с выпучиванием поверхности в зоне износа, что впоследствии также требует механической обработки и приводит к дополнительной потере основного материала. Использование сложного оборудования требует больших объемов производства для обеспечения необходимой рентабельности, что накладывает некоторые ограничения на применение этих методов восстановления. Поэтому актуальными становятся методы восстановления, позволяющие ремонтировать дорогостоящие детали на высоком технологическом уровне с применением относительно несложных приспособлений. Новый способ восстановления изношенных поверхностей трения наиболее полно соответствует современным требованиям, предъявляемым к ремонту металлоемких деталей как по основным затратам, так и по условиям его применения. Кроме того, при данном способе восстановления не требуется последующая технологическая обработка, ведущая к потере основного материала детали.

Новый способ восстановления реализуется с использованием кондуктора, имеющего поверхность, соответствующую номинальным размерам подшипника скольжения, через отверстия в которой внедряется индентор, деформирующий изношенную часть подшипника. Вытесненный при деформировании материал упирается в ограничивающую поверхность кондуктора и формирует восстановленную поверхность номинального размера, а отверстия для индентора заполняются антифрикционным материалом [1, 2]. Прилегающая поверхность кондуктора имеет необходимую высокую точность, что обеспечивает требуемое качество восстановленной поверхности без дополнительной механической обработки.

При проектировании устройства для восстановления необходимо провести теоретический анализ процесса деформирования, проверить полученные данные с помощью эмпирических исследований, а также изучить основные триботехнические свойства восстановленной поверхности.

При реализации нового способа восстановления такой анализ провели на основании известных закономерностей как в области пластического деформирования, так и в области трибологии. Однако их прямое использование невозможно без применения новых подходов к восстановлению изношенных поверхностей деталей.

В рассматриваемой задаче восстановления деформированием частично изношенной поверхности возникает сложное напряженное состояние, которое характеризуется неоднородным полем деформаций, напряжений, скоростей пластического течения, упрочнения, структурными изменениями, а также граничными условиями. Теоретический анализ процесса восстановления на основании зависимостей, отражающих деформирование изношенной поверхности, дал бы достаточно подробную картину исследуемого пластического течения,

однако известные математические проблемы при использовании этого подхода приводят к необходимости применения ряда ограничений. В рассматриваемом решении пластические деформации несравнимо больше упругих деформаций, следовательно, ими можно пренебречь. Используемые при изготовлении поверхностей трения материалы (алюминиевые, медные, цинковые сплавы и др.) [3] имеют относительно небольшое деформационное упрочнение. Это позволяет представить их как жестко-идеально-пластичные материалы, подверженные пластическому течению при практически неизменном напряжении при сдвиге (k) и растяжении или сжатии (Y), поля линий скольжения располагаются под углом 45° к свободной поверхности. Энергетический анализ позволяет определить давления на рабочую поверхность индентора, используя известные выражения для плоской задачи.

Поставленную задачу решали в два этапа. На первом этапе определяли величину давления на рабочую поверхность индентора до взаимодействия деформируемого материала с ограничивающей поверхностью кондуктора, а на втором этапе, который начинался с момента формирования восстановленной поверхности, — величину давления при достижении деформируемым материалом ограничивающей поверхности кондуктора. Контактное давление q на рабочей поверхности индентора определяли на основании известных закономерностей энергетического метода [4] с учетом коэффициента трения μ деформируемого материала по формуле

$$q = 4k\,(1 + \mu). \qquad (1)$$

При значительном износе цилиндрическая часть индентора будет выходить за пределы прилегающей поверхности. В этом случае деформированный материал скользит не только по рабочей поверхности индентора, но и по его цилиндрической части. Для этого варианта кинематически возможное поле линий скольжения представлено на рис. 1.

Блоки (внутри которых деформируемый материал находится в стационарном состоянии) *4* и *4′* неподвижны относительно ограничивающей поверхности *5*, а блоки *3* и *3′* будет двигаться по линиям, которые являются продолжением линий

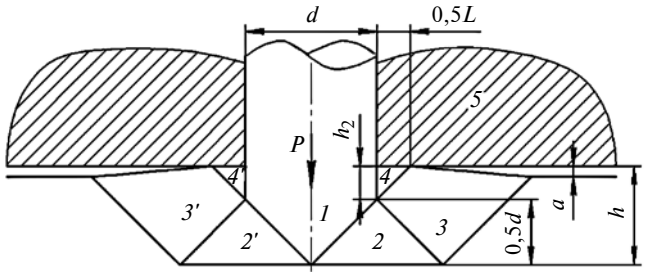


Рис. 1. Поля линий скольжения на втором этапе деформирования

индентора *1* и блоков *2* и *2′* (здесь L — протяженность восстановленной поверхности). После выхода за кондукторную поверхность на цилиндрическую часть индентора воздействует давление пластического ядра с возникновением нормальных и касательных напряжений. Это воздействие пропорционально величине h_2, которая определяется в долях от диаметра d индентора, принятого за единицу. На втором этапе деформирования (после выхода цилиндрической части индентора из кондукторной поверхности) давление на контактную поверхность индентора определяется по формуле

$$q = 4k\,(1 + \mu)(1 + 0{,}5h_2). \qquad (2)$$

После определения давления q по формуле (2) и активной площади его действия с учетом коэффициента трения μ для соответствующего материала можно рассчитать необходимую силу внедрения с учетом воздействия на цилиндрическую часть индентора.

Энергетический метод, используемый для анализа пластической деформации в локальной точке, основан на экстремальных принципах теории пластичности. Метод заключается в том, что фактическое поле линий скольжения меняется на более простое кинематически возможное поле, которое состоит из отдельных жестких блоков и удовлетворяет граничным условиям перемещений и скоростей. Мощность, необходимая для такого деформирования, больше действительно необходимой мощности внутренних сил для пластического формоизменения. Таким образом, получаемые на основании этого метода давления являются максимальными действительными значениями. Однако полученные выражения можно использовать для определения основных закономерностей пластического деформирования при восстановлении изношенной поверхности в локальной точке.

Теоретический анализ с помощью формулы (2) дает только предварительную оценку силовых параметров при деформировании. Для уточнения необходимо провести исследования с использованием других методов.

Авторы использовали систему ANSYS для проверки гипотезы, принятой при анализе силовых параметров деформирования с применением кондуктора с ограничивающей поверхностью для предлагаемого процесса восстановления. Представленную задачу решали для осесимметричной постановки. Рассматривали внедрение конического абсолютно жесткого индентора в полупространство с упругопластическими свойствами. Приняли следующие исходные данные:

жесткий конический индентор с углом 90° при вершине, который вертикально внедряется в деформируемую поверхность на глубину до 0,01 м;

диаметр основания конусной части индентора 0,002 м;

дополнительно ввели контактную пару в виде абсолютно жесткой ограничивающей прилегающей поверхности, имитирующей ограничивающую поверхность кондуктора, установленную с определенным зазором относительно деформируемой поверхности;

задачу решали с учетом коэффициента трения $\mu = 0{,}15$;

для анализа процесса восстановления износа в модели выполнили специальный гладкий вырез, который необходимо было устранить в ходе вдавливания.

Внедрение осуществляли за 85 шагов разной величины. Полученные результаты показаны в виде цветной полосы со значениями напряжений. Задачу решали для материала с пределом текучести 185 МПа. Размеры пластического ядра определяются по цвету поля. По полученным диаграммам для распределений эквивалентных напряжений по Мизесу установлено, что на глубине внедрения индентора, равной примерно его диаметру, на коническую часть действует давление ≈250 МПа, которое при большем заглублении практически не увеличивается, а увеличивается размер самого пластического ядра (выделено замкнутыми кривыми на рис. 2, *а*, *б*, см. обложку).

В процессе востановления предполагалось, что деформируемый материал должен заполнять зазор под кондукторной плитой и распространяться радиально от отверстия. Данная гипотеза подтвердилась, на диаграммах наблюдается зона пластического ядра материала, которая распространяется от центра деформации.

На диаграмме, представленной на рис. 3, *а* (см. обложку), цветом показаны напряжения в деформируемом материале, высота эпюр показывает контактные давления на поверхности индентора и поверхности, имитируеющей ограничивающую поверхность кондуктора. Установлено, что нормальное давление на рабочей поверхности идентора и напряжения в деформируемом материале при полном внедрении конической части достигают наибольшего значения и с увеличением глубины внедрения существенно не меняются.

На рис. 3, *б* приведена диаграмма распределения касательных напряжений. Установлено, что давление на конической части индентора и напряжения в деформируемом под ней материале практически постоянные. Давление на цилиндрическую часть индентора и на поверхность, имитирующую ограничивающую поверхность кондуктора, с увеличением глубины внедрения несколько повышается.

При внедрении на глубину, примерно равную диаметру индентора, в прелегающей к нему зоне поверхности наблюдается некоторое снижение касательных давлений. Также наблюдается отсутствие напряжений в зоне моделирования дефекта поверхности.

На границе перехода от конической поверхности индентора к цилиндрической наблюдается разрыв поля напряжений, что объясняется разрывом полей скоростей на границах блоков *1*, *2*, *3*, *4* (см. рис. 1).

Компьютерное исследование пластического деформирования в локальной точке с использованием ограничивающего кондуктора показало, что для рассмотренных условий наблюдается эффект пластического течения материала от центра деформации к периферии, что обеспечивает восстановление изношенной поверхности. Однако установлено, что давление на коническую часть индентора достигает максимального значения (≈250 МПа) при полном ее внедрении и дальше существенно не меняется, что противоречит теоретически полученному уравнению (2).

Для устранения противоречий в результатах теоретических исследований необходимо провести дополнительные эмпирические исследования пластического деформирования при восстановлении изношенных поверхностей, которые позволят установить зависимости геометрических и силовых параметров на основании эксперимента.

Деформирование в локальной точке проводили цилиндрическим индентором с конической вершиной. Гарантированное скольжение пластически деформированного материала по конической образующей индентора обеспечивалось за счет угла полураствора при вершине 45° (при большем угле полураствора возможно схватывание деформируемого материала с контактной поверхностью индентора, что приведет к существенному изменению пластического течения).

Ограничивающая кондукторная плита *5* через прокладки *4* над деформируемой поверхностью *1* детали, установленной на основании *2*, крепится гайками *6* (рис. 4). Нагружающее устройство устанавливается на шпильки *3* с помощью винтовых стоек *7*, на которых сверху болтами *10* крепится пластина *9*. На оправку *15* устанавливаются шар *13* и динамометр *8*. Вес динамометра компенсирует пружина (на рис. 4 не показана).

Соосность оправки *15* и отверстия *14* для индентора в кондукторной плите *5* устанавливается смещением направляющей втулки *21*, которая после выверки фиксируется гайками *23* и шпильками *22*. Нагрузка задается болтом *11* через опорный шар *12*. Перед измерением динамометр *8* упирается в шар *13* и поджимается болтом *11* через шар *12* до упора индентора *16* в восстанавливаемую поверхность *1*. Далее устанавливается индикатор *19* и крепится винтом *20* так, чтобы клин *17* на измерительном штоке *18* упирался в фаску оправки *15*. Затем устанавливается индикатор динамометра (на рис. 4 не показан). Так как конусность клина и фаски равна 45°, то перемещение индентора *16* соответствует показанию индикатора *19*.

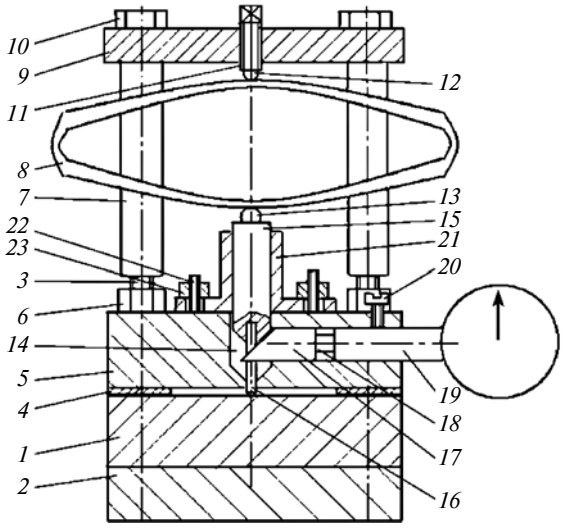


Рис. 4. Принципиальная схема устройства для моделирования восстановления изношенной поверхности в локальной точке

Для сравнения теоретических и эмпирических зависимостей их результирующие характеристики выразили в безразмерных величинах. Глубина h внедрения определяется величиной δ относительного внедрения по формуле

$$\delta = h/d.$$

Силу внедрения выразили через относительную величину Δ, полученную как отношение действующей силы P внедрения к величине P_0, которую выбирают из условия возможности ее однозначного получения как теоретическим, так и эмпирическим методом:

$$\Delta = P/P_0.$$

В конкретных исследованиях приняли: зазор между деформируемой и ограничивающей поверхностями, имитирующий износ, $a = 0{,}1$ мм; значение P_0 при глубине внедрения индентора $h = 0{,}5$ мм.

Так как энергетический метод имеет погрешности, то использование относительной силы внедрения, которая определяется при расчетах по тем же правилам, позволяет компенсировать некоторые неучтенные свойства, которые при применении относительной безразмерной величины нивелируются.

Для установления основных закономерностей пластического деформирования при восстановлении в локальной точке исследовали несколько материалов, отличающихся свойствами. По результатам эмпирических и теоретических исследований получили зависимости относительного усилия P/P_0 от относительной глубины h/d внедрения (рис. 5). На интервалах *а* и *б* показаны зависимости относительной глубины внедрения от относительного усилия соответственно на первом и втором этапах деформирования, *в* — условная точка перехода от первого ко второму этапу деформирования. Кривая *1* для коэффициента трения $\mu = 0{,}15$, кривая *2* — для $\mu = 0{,}5$, получены на основании теоретической зависимости на втором этапе деформирования, кривая *3* — на первом этапе. Кривые построены из условия, что давление на конической части индентора достигает максимального значения по выражению (1), и далее относительная сила внедрения увеличивается только за счет трения восстанавливаемого материала по цилиндрической части индентора.

Теоретические и эмпирические исследования показали, что при восстановлении деформированием на коническую часть индентора действует давление ≈290 МПа, полученное по формуле (1), давление, полученное по данным ANSYS, составляет 250 МПа, эмпирическими исследованиями получено давление 230÷240 МПа. Далее давление не повышается, а сила внедрения увеличивается за счет трения деформируемого материала по цилиндрической поверхности индентора. Из рис. 5 видно, что исследуемые материалы распределились в соответствии с их коэффициентами трения (наибольший коэффициент трения у алюминиевых сплавов, наименьший — у свинца), что косвенно подтверждает выбранную гипотезу.

Анализ результатов исследований показал достаточно хорошую сходимость теоретических и эмпирических параметров. Следовательно, полученные зависимости можно использовать для моделирования разработанного процесса восстановления, а также для решения аналогичных инженерных задач.

Новый способ восстановления изношенных поверхностей трения с использованием прилегающих кондукторных поверхностей позволяет эффективно реставрировать дорогостоящие металлоемкие детали. Способ наряду с получением требуемых геометрических параметров обеспечивает улучшение триботехнических свойств восстановленной поверхности, что достигается в результате улучшения механических свойств поверхности трения при деформировании и получения композиционной структуры материала благодаря применению

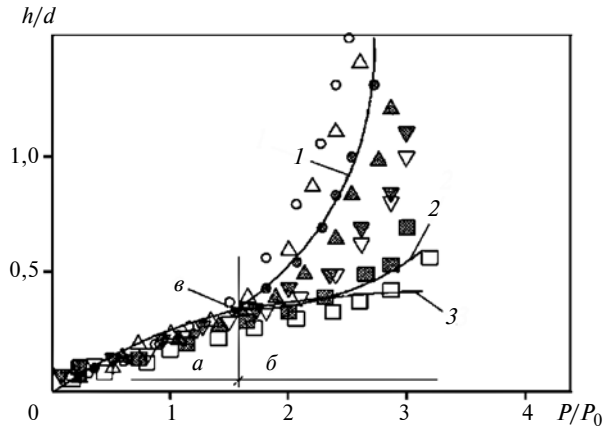


Рис. 5. Результаты теоретических и эмпирических исследований: ○ — Pb; Δ — БрОЦС5-5-5; ▼ — СЧ18; ■ — АК-9; ● — бабит Б-16; ▲ — ЛС59; ▽ — сталь Ст3; □ — АМЦ

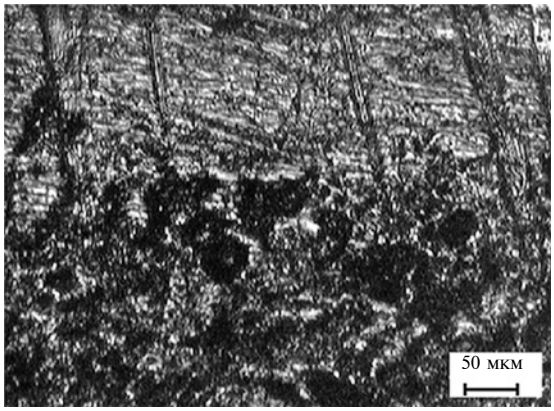


Рис. 6. Участок деформированной и свободной поверхностей:
на восстановленной поверхности видны микродефекты в виде царапин, скопированных с ограничивающей поверхности кондуктора

антифрикционного полимера для заполнения отверстий от индентора. Улучшение триботехнических свойств восстановленной поверхности можно проверить сравнительными испытаниями.

Проведенные оптические исследования показали, что восстановленная поверхность имеет более высокие триботехнические показатели по сравнению с необработанной поверхностью. Деформирование с использованием ограничивающей поверхности обеспечивает закрытие микротрещин, царапин и других дефектов контактной поверхности, что видно на фотографии границы перехода недеформированной и деформированной поверхностей (рис. 6).

Антифрикционный полимер, заполняющий отверстия от индентора, способствует образованию композиционной структуры поверхности. Детали с такой структурой имеют значительно более высокие антифрикционные показатели, чем поверхности трения, полученные традиционными методами.

Специальными исследованиями установлено вспучивание антифрикционного полимера при нагревании поверхности трения, что создает устойчивый эффект самосмазывания в результате переноса тонкой пленки менее твердого антифрикционного полимера с выступающих участков на основной материал (рис. 7), что существенно повышает износостойкость узла трения. Используемый антифрикционный материал УП-5-222 на основе эпоксидной смолы выдерживает контактное давление до 110 МПа, что позволяет применять его при значительных нагрузках.

Для проверки изменения триботехнических свойств восстановленных поверхностей провели исследования интенсивности изнашивания на машине трения с узлом, работающим по схеме "кольцо — плоскость" (рис. 8, *а*, *б*). Для смазывания использовали моторное масло ЛУКОЙЛ-Супер, соответствующее эксплуатационному классу по API CF-4/SG, а по вязкости — SAE 15W-40.

Интенсивность изнашивания восстановленных образцов значительно меньше, чем образцов, полученных существующими методами. Кроме того, результаты исследования показали, что в более тяжелых условиях эксплуатации этот эффект проявляется значительнее — интенсивность изнашивания восстановленных образцов на 20 % ниже по сравнению с типовыми материалами.

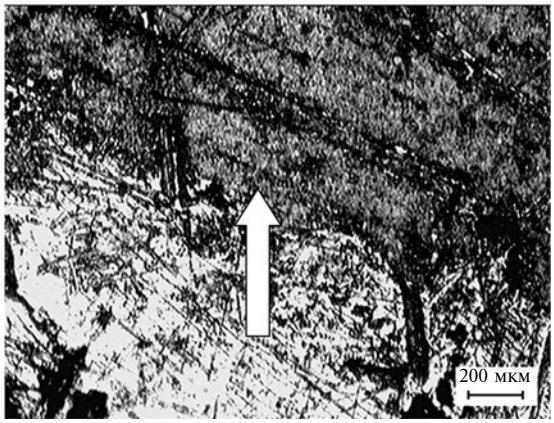


Рис. 7. Пленка переноса (показана стрелкой), сформированная на восстановленном участке поверхности в ходе испытаний на износ

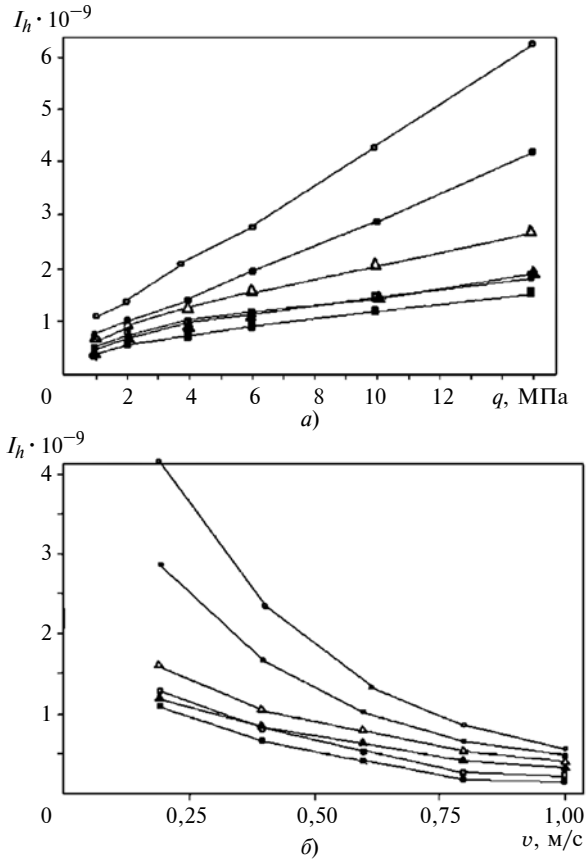


Рис. 8. Зависимости интенсивности изнашивания I_h образцов подшипниковых материалов при $T \approx 300 \div 330$ К от контактного давления q при $v = 0{,}2$ м/с (*а*) и от скорости v при $q = 10$ МПа (*б*):
○, ● — АК9; □, ■ — БрС30; △, ▲ — ЦАМ10-5; светлые точки — невосстановленные поверхности; черные точки — восстановленные поверхности

Вывод

Современные требования к эксплуатации и ремонту техники стимулируют разработку новых методов восстановления работоспособности поверхностей трения, которые позволяют проводить более качественный ремонт сложных дорогостоящих деталей. Способ наиболее полно соответствует современным требованиям, предъявляемым к технологиям ремонта, и существенно превосходит способы, применяемые в настоящее время. Он также позволяет получать номинальные геометрические параметры узлов трения без сложной механической обработки, а создание композиционной структуры реконструированных поверхностей улучшает их триботехнические свойства по сравнению с поверхностями, не имеющими такой структуры, что значительно повышает работоспособность машин, эксплуатируемых после ремонта.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Пат. 2447981 C2 Рос. Федерация:** МКП 23 P 6/00. Способ восстановления локально изношенной поверхности детали корпусных деталей, изготовленных из пластичных материалов и материалов с ограниченной пластичностью, и устройство для его осуществления.
2. **Болотов А. Н, Демкин Н. Б, Горлов И. В.** Восстановление локально изношенных подшипников методом пластического деформирования по прилегающей поверхности // Трение, износ, смазка. Приложение к журналу "Сборка в машиностроении, приборостроении". 2005. № 2. С. 26—30.
3. **Горлов И. В., Болотов А. Н.** Изменение механических свойств изношенной поверхности восстановленной пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 7. С. 3—7.
4. **Алюшин Ю. А, Еленев С. А.** Применение энергетического метода для расчета и анализа процессов пластического формоизменения металлов // Исследование процессов пластического деформирования металлов. М.: Наука, 1965. С. 106—133.

УДК 628. 83

Г. И. ШАЙДУРОВА, д-р техн. наук, И. Л. ВАСИЛЬЕВ, канд. техн. наук, Я. С. ШЕВЯКОВ, Е. Р. ГАТИНА,
e-mail: vil615@iskra.perm.ru (ПАО "НПО "Искра", ПНИПУ, г. Пермь)

Особенности технологии биодеградации эпоксидных и фенолформальдегидных смол[1]

Проведены исследования по разработке состава для утилизации отходов эпоксидных и фенолформальдегидных связующих с разными наполнителями и их биодеградации в модельной почве. Показана возможность широкого применения технологии утилизации без опасного воздействия на окружающую среду.

Ключевые слова: биодеградация, отходы связующего, утилизация, композиционные материалы, микроорганизмы, биодеструкция, экология.

Studies have been carried out to develop a composition for the utilization of wastes of epoxy and phenol-formaldehyde binders with different fillers and their biodegradation in model soil. The possibility of wide application of recycling technology without a dangerous effect on the environment is shown.

Keywords: biodegradation, binder waste, utilization, composite materials, microorganisms, biodestruction, ecology.

Защита окружающей среды — одна из важнейших современных задач, является комплексной проблемой и имеет масштабный характер. На современном этапе развития науки и техники промышленные выбросы в атмосферу, водоемы и почву достигли таких размеров, что в некоторых регионах уровень загрязнений в несколько раз превышает допустимые санитарные нормы [1].

В настоящее время большинство промышленных предприятий в России и за рубежом выпускают изделия из полимерных композиционных материалов (ПКМ). Композиты — материалы не только настоящего, но и будущего, которые благодаря улучшенным и повышенным физико-механическим характеристикам (ФМХ) имеют большой спрос и огромные объемы производства. Они широко применяются в производстве военной техники и авиации, где интенсивно создаются и внедряются новые материалы, постоянно совершенствуются технологии изготовления ПКМ. При этом неизбежно образование технологических отходов.

Сбор и утилизация промышленных отходов при производстве ПКМ — реальная проблема, так как для арамидных, углеродных, полиамидных и других волокнистых наполнителей фенолформальдегидные и эпоксидные связующие составляют основу.

Так, при изготовлении крупногабаритных корпусов для изделий ракетно-космической техники, несмотря на автоматизированную технологию спирально-кольцевой "намотки" корпусов типа "кокон"

[1] Работа выполнена по государственному заданию Министерства образования и науки РФ в рамках мероприятия "Инициативные научные проекты", код заявки 5.9729.2017/8.9.

на современных станках с программным управлением (типа КУ463Ф3), отходы связующих, накапливающиеся на поддонах, нельзя использовать вторично без дополнительной обработки. При производстве препрегов из углеродной и органической тканей также образуется большое количество отходов недоиспользованного (отжатого армирующим волокном) связующего с введенным в его рецептуру отвердителем, которые необходимо утилизировать.

Все это вызывает обоснованную тревогу, так как пока нет конкретного решения вопроса, как утилизировать отходы связующего, не загрязняя природную среду, потому что каждый реально существующий метод утилизации отходов в той или иной мере наносит ей вред. В связи с этим особенно актуальна разработка современного и эффективного метода утилизации связующего.

В мировой практике для утилизации и обезвреживания отходов используют термические, химические, биологические и физико-химические методы. Наиболее перспективным, простым и экономичным методом обезвреживания ксенобиотиков (загрязнителей) низковязких полимерных материалов является метод биодеградации, универсально и адресно разработанный для конкретного класса материалов. Биоразложение той или иной композиции уменьшает остроту глобальной экологической проблемы, включая загрязнения верхнего слоя почвы промышленными отходами.

Биологические методы обезвреживания промышленных отходов все шире применяются как в России, так и за рубежом. Они основаны на способности различных штаммов микроорганизмов в процессе жизнедеятельности разлагать или усваивать в своей биомассе многие органические загрязнители [2].

При исследованиях путем экспериментального подбора и отработки был разработан состав для утилизации связующего методом биодеградации. Технология основана на введении в состав отхода биоразлагаемых компонентов с определенной рецептурой и дальнейшем их отверждении при нагревании до температуры полимеризации связующего. При этом связующее переходит в твердое состояние и в таком виде помещается в модельную почву для естественного разложения при действии влаги и жизнедеятельности почвенных микроорганизмов.

В природных условиях такой утилизации материалов способствуют мицелиальные грибы — активные биодеструкторы, интенсивно размножающиеся с помощью спор и гиф и разрушающие материалы химическим и механическим путем. Их высокая деструктивная активность обусловлена способностью адаптироваться к материалам разной химической природы, что связано с наличием у них хорошо развитого мобильного ферментного комплекса [3]. При этом деструкция проходит как вследствие развития микромицетов, так и под действием выделяемых ими метаболитов [4].

Для экспериментальной отработки в качестве модельного отхода использовали фенолформальдегидное связующее СФ-010 и эпоксидное связующее ЭП-5122 после формирования препрегов.

Готовая смола СФ-010 представляет собой продукт полимеризации фенольной смолы СФ-010 уротропином, а отход смолы ЭП-5122 — продукт отверждения эпоксидной смолы ЭД-16 и лака ЛБС-1 с добавкой растворителей для уменьшения вязкости, которые в готовом виде относятся ко второму классу опасности.

Для деструкции в почве в качестве компонентов, способствующих биоразложению, использовали такие продукты натурального происхождения, как крахмал, дрожжи и казеиновый клей. Крахмал и казеиновый клей являются в рецептуре продуктами поглощения почвенной микрофлоры.

Добавление в рецептуру биоразлагаемых компонентов способствует ослаблению связей полимерных блоков и образованию колоний микроорганизмов на поверхности инкубируемого материала. Для изменения пространственной структуры молекул смолы при термическом отверждении применяется гидрокарбонат натрия. Так как макромолекулы смолы образуют большое количество зацеплений, добавление гидрокарбоната натрия (соды) в жидкую среду позволяет получать пористую пену (измененную пространственную структуру молекул смолы), которая под действием температуры застывает, так как образующаяся двуокись углерода (при температуре выше 50 °С) вспенивает продукт. В результате получается материал с пористой и хрупкой структурой и небольшой массой.

Отверждение состава осуществляли при температуре термостатирования 100 °С, обеспечивающей полноту отверждения (отсутствие липкости). Недостатки термического метода отверждения — энергоемкость процесса и выделение остаточных органических летучих веществ (ацетон, толуол). Существенными достоинствами метода по сравнению с самопроизвольным отверждением в присутствии катализаторов являются отсутствие в составе кислого агента и технологичность процесса отверждения.

Для последующего разложения материала на практике используют метод захоронения — инкубация в модельной почве. Образцы отвержденного состава (отходы связующего + биокомпоненты) инкубировали в дерново-подзолистую суглинистую почву, как наиболее распространенную в России. Взяли три пробы почвы и приготовили из них один смешанный образец. Почву растерли и поместили

в контейнер емкостью 10 кг. Для длительной инкубации смоделировали реальные условия захоронения отходов в природной среде средней полосы России. Отвержденные образцы связующего находились в экспериментальном контейнере в почве при температуре 0÷25 °С, при этом на них воздействовали ультрафиолетом и имитировали дожди в течение 12 месяцев. Для оценки процесса биодеградации и фиксации результатов эксперимента периодически контролировали внешний вид образцов (рисунок, см. обложку) и их массу (таблица).

Разложение отвержденных образцов в почве происходит следующим образом. Сначала из матрицы вымывается часть биоразлагаемых компонентов, что повышает воздействие на нее микроорганизмов и дальнейшую деструкцию [4]. Далее реализуется адгезия бактерий на поверхности биоразлагаемого материала, проникновение мицелия микроскопических грибов в поры образца и использование ими бионаполнителя в качестве источника питания, что приводит к поэтапному уменьшению массы инкубированного материала. При этом наблюдается существенное снижение прочности и фрагментации материала. Это объясняется действием ферментативных систем живых микроорганизмов, находящихся в почвах: полимерные фрагменты вовлекаются в гидролитические и окислительно-восстановительные реакции, в результате которых образуются свободные радикалы. Благодаря им интенсивно разрушаются макромолекулы синтетического полимера, в результате чего существенно снижается его молекулярная масса [4].

В рамках эксперимента исследовали экологическую безопасность созданного биодеградируемого состава путем инкубирования в почве для оценки изменения токсичности материала в течение всего цикла утилизации. При деградации полимерного образца под влиянием микроорганизмов возможно попадание токсичных продуктов распада полимера в почву, а следовательно, загрязнение окружающей среды.

Результаты снижения массы образцов связующего после инкубации в почве в течение 12 месяцев

Образец	Масса образца		Потеря массы, %
	до инкубации	после инкубации	
1	12,63	6,00	53
2	11,75	4,37	63
3	9,07	4,24	53
4	10,63	5,67	47
5	8,93	3,0	66

Экологическую безопасность исследовали экспериментальным методом, основанным на биотестировании водной вытяжки отходов. При определении класса опасности (токсичности) использовали два тест-объекта из разных систематических групп: — дафния (Daphnia magna Straus) и водоросли (Scenedesmus quadricauda Breb). Класс опасности устанавливали по кратности разведения водной вытяжки, которая не показывала воздействия на гидробионты в выбранном диапазоне кратности разведения.

Получили положительный результат при определении класса опасности продукта и исследований самой почвы. При введении в отходы фенолформальдегидных и эпоксидных смол компонентов, способствующих биодеградации, и последующей экспозиции термостатированных образцов в почвенном активном грунте в течение определенного времени достигается снижение класса опасности: со второго до третьего для отвержденного состава, с третьего до четвертого для того же отвержденного состава после инкубирования в модельной почве.

Таким образом, при добавлении биоразлагаемых компонентов в отходы фенолформальдегидного и эпоксидного связующих можно добиться их эффективной утилизации методом биодеградации в почве со снижением класса опасности (токсичности) утилизируемых веществ без отрицательного воздействия на почву и окружающую среду.

Данное исследование показало перспективность утилизации промышленных отходов смол методом биодеградации, что позволит эффективно решить важнейшую экологическую задачу в производстве полимерных композиционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Бондалетова Л. И.** Промышленная экология: Учеб. пос. Томск: Томский ПУ, 2002. 168 с.

2. **Бельков В. М.** Технологии утилизации // ООО "Экомашгрупп", 2017. URL: https://ecomg.ru/about/article/ (дата обращения: 14.01.2017).

3. **Влияние** эксплуатационной среды на биостойкость строительных композитов / В. Т. Ерофеев, А. Д. Богатов, С. Н. Богатова и др. // Инженерно-строительный журнал. 2012. № 7. С. 23—31.

4. **Полякова Е. А.** Биодеградируемые композиционные материалы на основе латексов синтетических (со)полимеров и крахмала: Дис. ... канд. хим. наук. Ярославль, 2016. 147 с.

5. **Мирошниченко И. И.** Экологические проблемы утилизации полиуретана в различных почвенных условиях: Автореферат дис. ... канд. биол. наук. Петрозаводск, 2011. 21 с.

УДК 621

В. А. СУРКОВ, канд. техн. наук (КНИТУ, г. Казань), e-mail: Surkov-v@inbox.ru

Исследование механических свойств порошка меди ПМС-1 при воздействии плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления

Рассматривается повышение механических свойств материала на основе порошка меди ПМС-1 воздействием плазмы высокочастотного индукционного разряда пониженного давления.

Ключевые слова: плазма, порошковый материал, высокочастотный индукционный разряд, образец.

An increase in the mechanical properties of a material based on the ПМС-1 copper powder by the action of a high-frequency induction discharge plasma of a reduced pressure is considered.

Keywords: plasma, powder material, high-frequency inductive discharge, sample.

Порошки меди широко применяются в производстве деталей авиационной и ракетной техники, поэтому необходимы разработки на их основе новых материалов с определенными механическими и физико-химическими свойствами, изделия из которых имеют заданные эксплуатационные характеристики.

Одним из наиболее перспективных методов повышения механических свойств таких материалов является их обработка плазмой высокочастотного индукционного (ВЧИ) разряда пониженного давления, что позволяет варьировать как температуру обработки, так и характеристики ионного потока, поступающего из плазмы на поверхность обрабатываемого порошка.

Порошок меди ПМС-1 (ГОСТ4960—75) обрабатывали в высокочастотной (ВЧ) плазменной установке, состоящей из кварцевой цилиндрической разрядной камеры с внутренним диаметром от 10 до 110 мм и трехкольцевого медного водоохлаждаемого индуктора, при рабочем давлении p = 1,33÷133 Па, частоте генератора f = 1,76 МГц и потребляемой мощности N = 2÷18 кВт. Схема установки и общий вид представлены на рис. 1.

Рентгеноструктурный анализ проводили на дифрактометре ДРОН-2. Механические свойства порошка — временное сопротивление $\sigma_{0,2}$, относительное удлинение δ и длительную прочность $\sigma_в$, определяли в исходном состоянии на разрывной машине.

Воздействие плазмы осуществлялось по схеме, приведенной на рис. 2. Порошковый материал ПМС-1 под давлением газа подавался в зону действия плазменного потока плазмотрона *6* пневмотранспортом. При этом одновременно из емкости *7* подавался катализатор через поочередно открывающиеся натекатели *12*, что позволяло управлять подачей материала путем регулирования расхода газа. Обработанный плазмой порошковый материал поступал в стакан-сборник *2*.

Воздействие плазмы ВЧИ разряда пониженного давления осуществлялось в среде плазмообразующего газа — смеси аргона и воздуха в соотношении 50:50 при давлении в вакуумной камере $p_{кам}$ = 40 Па, расходе газа G = 0,08 г/с, силе анод-

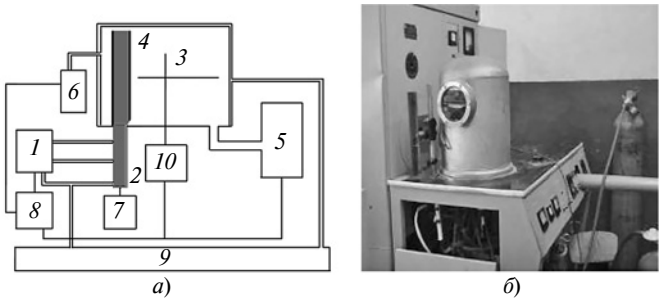


Рис. 1. Экспериментальная ВЧИ плазменная установка:
а — принципиальная схема; *б* — общий вид; *1* — ВЧ генератор; *2* — плазмотрон; *3* — карусельное устройство; *4* — вакуумная камера; *5* — система откачки; *6* — диагностическое оборудование; *7* — система подачи газа; *8* — система электропитания; *9* — система водоснабжения; *10* — система вращения карусельного устройства

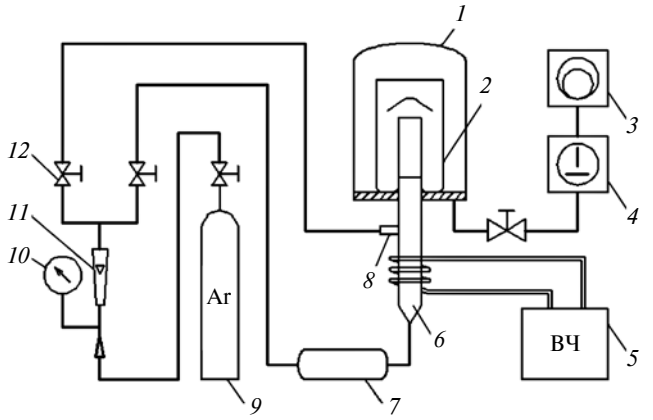
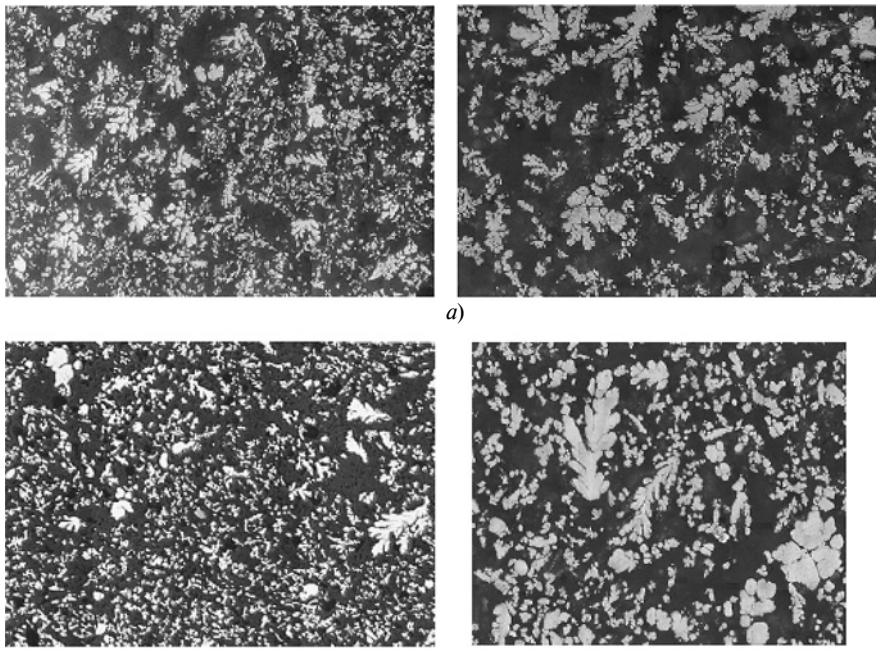


Рис. 2. Принципиальная схема воздействия плазмы ВЧИ разряда пониженного давления на композиционный материал:
1 — вакуумная камера; *2* — стакан-сборник; *3* — пластинчато-роторный вакуумный насос; *4* — двухроторный вакуумный насос; *5* — ВЧ генератор; *6* — плазматрон; *7* — емкость для катализатора; *8* — патрубок подачи воздуха; *9* — баллон с аргоном; *10* — манометр; *11* — ротаметр; *12* — натекатель

ного тока $I_а$ = 1,5 А и напряжении $U_а$ = 7,8 кВ.

Образцы для исследования механических свойств материала изготовляли следующим образом. Порошок просеивали через сетку с ячейкой 0,2 мм. В качестве пластификатора в шихту добавляли 1 % стеарата цинка от массы материала. Образцы прессовали при усилии P = 400 кН и спекали в шахтной печи в среде диссоциированного аммиака по режиму: загрузка при температуре 20 °С; повышение температуры до 600 °С и выдержка 90 мин; повышение температуры до 660 °С и выдержка 90 мин; охлаждение на воздухе в среде диссоциированного аммиака.

Механические свойства образцов определяли в исходном состоянии при температуре 20 °С на разрывной машине.



а)

б)

Рис. 4. Структура порошка меди ПМС-1 до (*а*) и после (*б*) обработки образцов ВЧИ плазмой (×150 слева и ×350 справа)

При воздействии ВЧИ плазмы пониженного давления при p = 1,33÷133 Па частицы медного порошка становятся дополнительным электродом, на поверхности которого, как и в приэлектродной области ВЧИ разряда, образуется положительно заряженный слой толщиной $\approx 10^{-3}$ мм [2]. Проходя через этот слой и ускоряясь в его электрическом поле, положительные ионы плазмы получают дополнительную энергию до 100 эВ [1, 3].

При соприкосновении с поверхностью медного порошка ионы плазмы передают его атомам приобретенную кинетическую энергию и потенциальную энергию рекомбинации и частично внедряются в порошок. Если плазмообразующий газ содержит атомы азота, кислорода или углерода, то происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя медного порошка этими элементами. При этом механические и физико-химические свойства обрабатываемого металла повышаются.

Испытания опытных образцов (рис. 3) показали значительное улучшение их механических свойств по сравнению с исходными образцами. Исследования микроструктуры исходного и обработанного ВЧИ плазмой порошка меди (рис. 4, *а*, *б*) показали уменьшение размеров зерен и их количественное увеличение.

Следовательно, можно утверждать, что плазменная обработка положительно влияет на прессование и спекание медных порошков вследствие уменьшения размеров зерен и их количественного увеличения, что способствует улучшению показателей механических свойств материала.

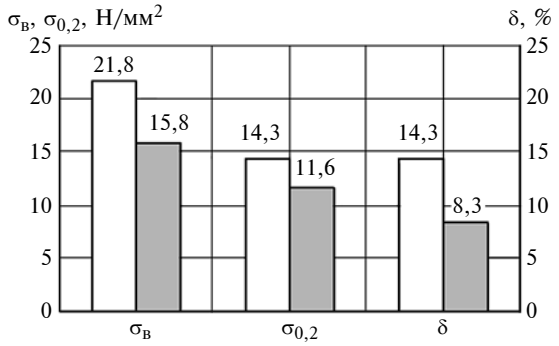


Рис 3. Результаты механических испытаний исходных (□) и опытных (■) образцов из медного порошка ПМС-1

БИБЛИОГРАФИЧЕКИЕ ССЫЛКИ

1. **Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С.** Применение ВЧ плазмы пониженного давления для газонасыщения поверхности металлов // Вестник Казанского технологического университета. 2003. № 1. С. 172—179.

2. **Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кудинов В. В.** Физическая модель взаимодействия высокочастотной плазмы с твердыми телами в динамическом вакууме // Журнал Физика и химия обработки материалов. 2003. № 4. С. 45—51.

3. **Абдуллин И. Ш., Желтухин В. С., Кудинов В. В.** Математическая модель высокочастотной плазменной обработки материалов в динамическом вакууме // Журнал Физика и химия обработки материалов. 2003. № 6. С. 21—27.

УДК 621.9

Е. А. КУДРЯШОВ, д-р техн. наук, И. М. СМИРНОВ, д-р техн. наук (АО "Научно-исследовательский инженерный институт", г. Балашиха), Ю. С. СТЕПАНОВ, д-р техн. наук (ГУ — учебно-научно-производственный комплекс, г. Орел), Н. А. ХИЖНЯК (АО "Научно-исследовательский инженерный институт", г. Балашиха), e-mail: kea-swsu@mail.ru

Улучшение работоспособности резцов при точении сложных профилей

На основании требований к трем блокам проходного резца: инструментальному, настроечному и демпфирования, разработаны рекомендации, расширяющие область рационального использования инструментальных материалов при прерывистом точении деталей со сложным профилем и пакетных сборочных единиц.

Ключевые слова: точение, прерывистое резание, сложный профиль, режущий элемент, инструментальный материал, демпфирование, стойкость, работоспособность.

Based on the requirements for the three blocks of the cutting tool: tool, tuning and damping, recommendations have been developed that extend the area of rational use of these cutters with interrupted turning of parts with a complex profile and batch assemblies.

Keywords: turning, interrupted cutting, complex profile, cutting element, tool material, damping, durability, working capacity.

В машиностроении используется множество деталей, имеющих сложные профили и изготовляемых из труднообрабатываемых материалов. Поверхности таких деталей могут иметь глухие и сквозные отверстия, шлицы, шпонки, пазы, сложные срезы, которые при механической обработке обусловливают прерывистое резание. Кроме того, используются сборочные единицы, в состав которых входят детали из разных материалов (рис. 1, *а*), что вызывает определенные трудности при их совместной обработке, особенно если обрабатываемая поверхность имеет сложный контур (рис. 1, *б*).

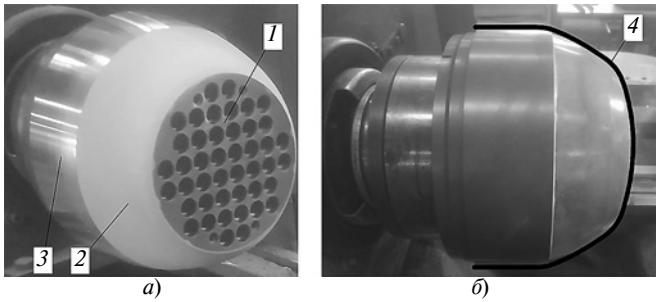
На рис. 2, *а—в* представлены сборочная единица и входящие в ее состав детали: основание из стали 30ХГСА (ГОСТ 11268—76) и кольцо из алюминиевого сплава В95 (ОСТ 192048—90). Составные элементы при сборке соединяют и помещают в пресс-форму литьевой машины, в которой из материала ДСВ-2-0 (ГОСТ 17478—95) выполняется связующая их оболочка. Таким образом, создается пакетная конструкция.

При точении поверхностей сложной формы характерно чередование рабочих ходов (снятие стружки) и холостых ходов. Число рабочих и холостых ходов, а также их продолжительности зависят от расположения, формы и размеров элементов разрыва (отверстий, пазов, и т. д.). Величина припуска, частота и цикличность этапов точения определяются конструкцией обрабатываемой поверхности.

При точении пакетных конструкций, которые состоят из разных материалов (металлов и неметаллов), холостой ход инструмента может отсутствовать. При этом в точении каждого участка имеются три этапа: врезание инструмента в данный материал, рабочий ход, выход инструмента.

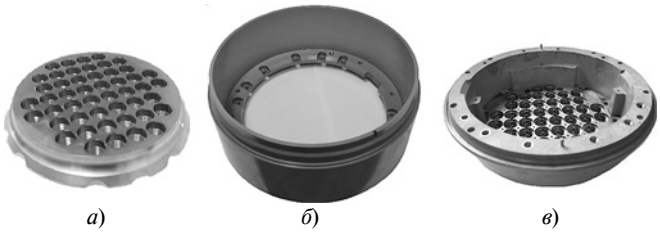
Факторы, снижающие работоспособность инструмента в условиях прерывистого резания:

элементы разрыва обрабатываемых поверхностей;



а) *б*)

Рис. 1. Сборочная единица (*а*) из деталей, выполненных из разных материалов, со сложной обрабатываемой поверхностью (*б*):
1 — основание; *2* — кольцо; *3* — оболочка; *4* — контур обрабатываемой поверхности



а) *б*) *в*)

Рис. 2. Сборочная единица (*а*) и входящие в нее детали: основание (*б*) и кольцо (*в*)

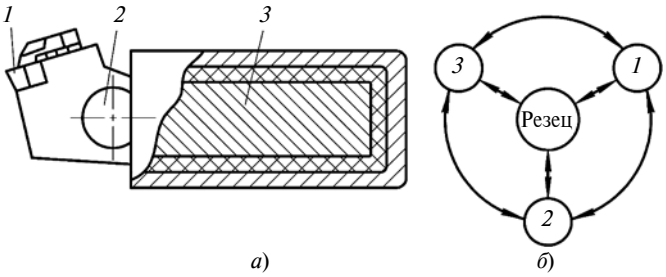


Рис. 3. Чертеж проходного резца (*а*) и схема расположения и взаимосвязей его основных блоков (*б*)

разнородность материалов элементов пакетной конструкции;

вибрации при прерывистом резании.

Учитывая характер прерывистого резания и вероятность разрушения от ударных нагрузок хрупкой вершины и режущих кромок, трудно добиться заданного качества обработки. Кроме того, при точении поверхности со сложным профилем возможен отказ инструмента. Поэтому работоспособность инструмента можно обеспечить только системным подходом, учитывая не только взаимосвязь резца и других элементов технологической системы, но и взаимосвязи основных блоков резца.

Представленный на рис. 3 инструментальный блок *1* состоит из режущего элемента (РЭ) и узла фиксации в корпусе резца. В состав настроечного блока *2* входит узел установки РЭ на безударное положение точения обрабатываемой поверхности. Блок демпфирования *3* предназначен для гашения вибраций прерывистого резания при обработке изделий со сложным профилем.

Выбор инструментального материала (ИМ) построен на компромиссном решении при обеспечении требуемых физико-механических свойств и условий точения поверхностей сложного профиля. Так, материалы высокой твердости склонны к хрупкому разрушению, однако при снижении твердости увеличивается вероятность трещинообразования.

Проанализировав знания по применению современных ИМ, сформулировали требования к основным свойствам ИМ, обеспечивающим снижение негативных факторов прерывистого резания и исключающим выкрашивание, сколы и разрушения РЭ [1—6]:

по твердости: твердость ИМ должна быть в 2,5 раза выше твердости обрабатываемого материала (ОМ) и должно обеспечиваться определенное соотношение показателей твердости и вязкости ИМ;

по прочности и ударной вязкости: должны обеспечиваться требуемая механическая прочность при растяжении и изгибе и высокая сопротивляемость разрушению при циклическом нагружении;

по теплостойкости: должны сохраняться прочность и износостойкость при высоких температурах резания, обеспечиваться низкая чувствительность к циклическим изменениям температуры;

по износостойкости: должна сохраняться высокая сопротивляемость к удалению с контактных поверхностей РЭ частиц, что обеспечивается комплексом механических свойств, при котором износостойкость есть функция от твердости, прочности, теплостойкости;

по теплопроводности: должен обеспечиваться быстрый отвод теплоты из зоны резания, так как высокая температура не только ухудшает процесс обработки, но и повышает остаточные напряжения в поверхностном слое обработанной детали;

по взаимодействию с обрабатываемым материалом: кристаллохимические свойства ИМ и ОМ должны существенно отличаться, так как их сходство негативно влияет на адгезионно-усталостные и окислительные процессы, на изнашивание рабочих поверхностей РЭ и качество обработанных поверхностей;

по технологичности: подготовка РЭ к заточке и обработке не должна вызывать затруднения.

При резании поверхностей с элементами разрыва и наличием стыков разных материалов, образующих обрабатываемую поверхность, возникают ударные нагрузки, которые создают сжимающие и растягивающие напряжения. Поэтому для повышения прочности РЭ в качестве ИМ используют твердые сплавы, получаемые методами порошковой металлургии из твердых материалов, в первую очередь карбидов, а в качестве связующего материала используют кобальт. Однако при всем многообразии физико-механических свойств твердых сплавов при точении деталей из твердых сплавов с поверхностями повышенной сложности, особенно пакетного типа, возникают сложности.

Режущая керамика при резании гладких поверхностей из сталей и сплавов разной твердости эффективна только при полном отсутствии ударных нагрузок.

Много противоречий и в рекомендациях по применению многочисленных сверхтвердых ИМ, к которым относятся: модификации кубического нитрида бора (КНБ), т. е. композиты; поликристаллические алмазы (ПКА); режущая керамика.

Предъявляемым требованиям к ИМ, применяемым для обработки поверхностей деталей различной конструктивной сложности с точностью не ниже 7-го квалитета и параметром шероховатости поверхности Ra = 0,32÷0,63 мкм, соответствует группа поликристаллических сверхтвердых материалов — композитов, в которую входят более десяти марок композитов.

Имеются два вида КНБ, отличающиеся составом, добавками, размерами, структурами и свойствами зерен. К первым относятся композит К01, композит К02 и композит К10, ко вторым — композит К05, состоящий из кубического нитрида бо-

ра и диоксида алюминия Al_2O_3, композит К09 из поликристаллов твердого нитрида бора. Для прерывистого резания чаще всего используют К01, К02, К05, К09 и К10 [5].

По пяти значимым показателям — пределу прочности $\sigma_р$ при растяжении; пределу прочности $\sigma_{из}$ при изгибе; модулю упругости E; коэффициенту трещиностойкости K_{IC}; термостойкости $K_т$ на воздухе предпочтительнее композит К10: $\sigma_р > 0{,}35$ ГПа; $\sigma_{из} > 0{,}9$ ГПа; $E \approx 800$ ГПа; $K_{IC} > 7$ МПа · м$^{1/2}$; $K_т > 1300$ °С (таблица) (рис. 4).

Композиты отличаются не только высокой твердостью. К достоинствам данных ИМ можно отнести: высокую износостойкость, низкий коэффициент трения, инструментальную стойкость, хорошую теплопроводность и коррозионную стойкость, кроме того, они химически инертны к черным металлам (стали, их сплавы, чугун).

Композиты можно применять для обработки цветных сплавов и при комбинации разных материалов в одной поверхности, а также при обработке углепластиков и стеклопластиков.

Выбрать оптимальный композит можно по коэффициенту

$$K = HV_{ИМ}/\ HV_д,$$

где $HV_{ИМ}$ и $HV_д$ — твердости соответственно ИМ и обрабатываемой детали.

Чем выше коэффициент K, тем эффективнее ИМ.

Разработано множество инструментальных блоков (см. рис. 3, поз. *1*), отличающихся конструкциями и способами крепления РЭ.

Анализ знаний по прерывистому точению поверхностей сложного профиля позволил разработать следующие рекомендации:

РЭ должен вставляться в державку наклонно так, чтобы на главной и вспомогательной режущих кромках получались одновременно положительный задний угол и отрицательный передний угол;

на режущих кромках необходимы фаски, которые усиливают переднюю и заднюю поверхности РЭ, что снижает вероятность образования трещин на режущей кромке [7—9].

Целесообразно использовать инструмент с циклоидальной передней поверхностью РЭ. Циклоидальная поверхность строится качением окружности диаметром, равным удвоенной заданной глубине резания, и состоит из n участков, располагающихся начиная от вершины РЭ по направлению к центральной части кривой, образующей передний (отрицательный) угол и профиль передней поверхности резца (рис. 5).

Физико-механические и химические показатели ИМ

ИМ	E, ГПа	$\sigma_{из}$, ГПа	$\sigma_р$, ГПа	$K_т$, °С	K_{1C}, МПа · м$^{1/2}$
К01	840	0,98	0,49	1470	4,17
К05	700	0,50	0,22	1050	7,00
К10	880	1,50	0,39	1500	7,12
Т15К6	500	1,10	0,36	900	8,00
ВОК-60	350	0,60	—	1200	3,10

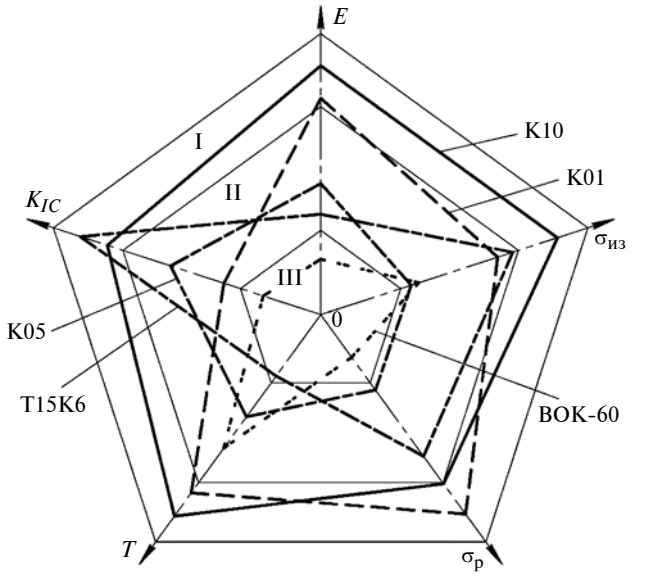


Рис. 4. Гистограмма физико-механических и химических показателей инструментальных материалов:

I — зона рекомендуемого применения ИМ; II — зона удовлетворительного резания; III — зона низкой стойкости ИМ

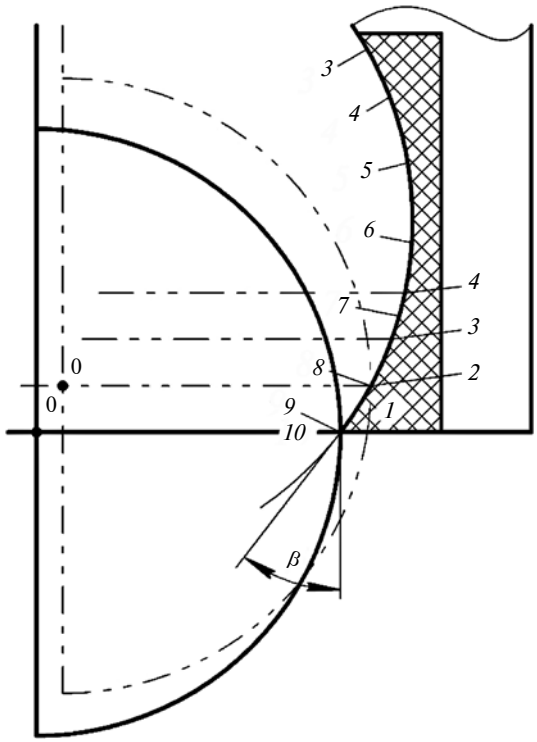


Рис. 5. Схема построения оптимизированного циклоидального профиля передней поверхности режущего элемента

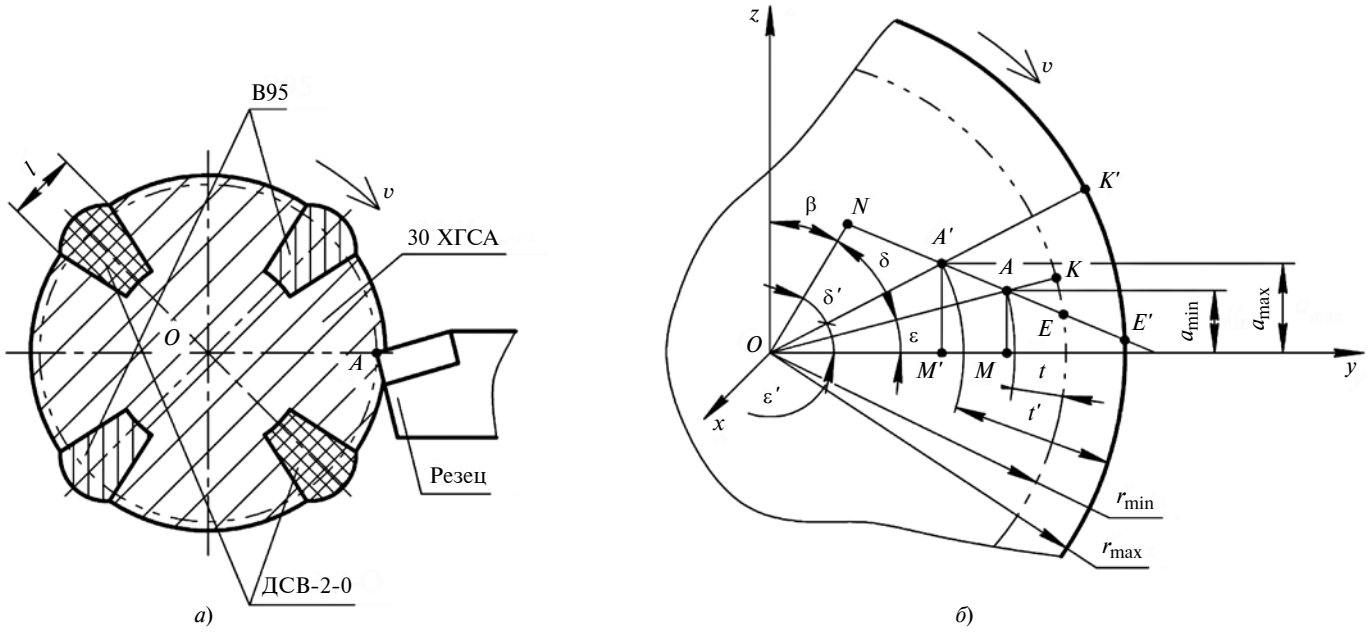


Рис. 6. Упрощенная схема пакетной конструкции (*а*) и модель точения ее поверхности (*б*)

Каждому участку циклоиды соответствует определенная степень прерывистости обрабатываемой поверхности. Степень прерывистости изменяется от нуля (гладкая поверхность без элементов разрыва) до значения, определяемого углом β между касательной к циклоиде и основной плоскостью резца.

Это позволяет перераспределить ударную нагрузку, возникающую при прерывистом резании, и обеспечивает целостность РЭ, снижая силу трения стружки о переднюю поверхность и схватывание между обрабатываемым материалом и ИМ. Все это повышает период стойкости ИМ [10—12].

Экспериментальные исследования показали, что циклоидальная передняя поверхность РЭ позволяет осуществлять врезание инструмента в заготовку в точках *3—6* (см. рис. 5), т. е. на участке, удаленном от хрупкой вершины РЭ. Таким образом, перераспределение ударной нагрузки на 6÷8 % повышает работоспособность ИМ, в частности, повышает применяемость твердых сплавов до применяемости композита К05 (см. рис. 4).

Стойкость режущей керамики в условиях прерывистого резания повысить сложно, поэтому ее применение при точении поверхностей сложного профиля не так эффективно.

Конструкция узла настройки РЭ представляет собой трехкоординатный шаровой механизм, с помощью которого передняя поверхность резца занимает требуемое положение для безударного резания (см. рис. 1).

На рис. 6 представлена упрощенная схема сборочной единицы пакетной конструкции и схема точения ее сложной поверхности.

Для обеспечения безударного точения необходимо переднюю поверхность циклоидального профиля РЭ устанавливать относительно обрабатываемой поверхности (см. рис. 5 и рис. 6, *б*) под углом β, величина которого определяется выражением

$$\beta = \frac{\pi}{2} - (\delta - \delta') - (\varepsilon - \varepsilon') = \frac{\pi}{2} - \Delta\delta - \Delta\varepsilon,$$

где δ и δ′ — минимальный и максимальный углы касания вершины инструмента соответственно к минимально и максимально удаленным точкам контакта (r_{min} и r_{max}) обрабатываемой поверхности; ε и ε′ — минимальный и максимальный углы, образованные линией касания, проходящей через центр заготовки, вершину элемента и точку *M*, образованную на оси ординат перпендикуляром из точки *A* контакта (см. рис. 6, *б*).

При положении режущей части относительно обрабатываемой поверхности угол β определяется выражением

$$\mathrm{tg}\beta = \left(\frac{\pi}{2} - \delta - \varepsilon\right) - \mathrm{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \delta' - \varepsilon'\right) =$$

$$= \frac{l\sqrt{(r_{min} - t)^2 - a_{min}^2} - a_{min}\sqrt{(r_{min} - t)^2 - l^2}}{la_{min} + \sqrt{(r_{min} - t)^2 - l^2}\sqrt{(r_{min} - t)^2 - a_{min}^2}} -$$

$$- \frac{l\sqrt{(r_{max} - t')^2 - a_{max}^2} - a_{max}\sqrt{(r_{max} - t')^2 - l^2}}{la_{max} + \sqrt{(r_{max} - t')^2 - l^2}\sqrt{(r_{max} - t')^2 - a_{max}^2}} =$$

$$= \frac{l\sqrt{(\Delta r - \Delta t)^2 - \Delta a^2} - \Delta a\sqrt{(\Delta r - \Delta t)^2 - l^2}}{l\Delta a + \sqrt{(\Delta r - \Delta t)^2 - l^2}\sqrt{(\Delta r - \Delta t)^2 - \Delta a^2}}.$$

Приняв $(\Delta r - \Delta t)^2 = b$, получим:

$$\mathrm{tg}\beta = \frac{l\sqrt{b-\Delta a^2} - \Delta a\sqrt{b-l^2}}{l\Delta a + \sqrt{b-l^2}\sqrt{b-\Delta a^2}},$$

где t и t' — изменение глубины резания вследствие колебания величины припуска; $a_{\min}$ и $a_{\max}$ — минимальное и максимальное смещение вершины РЭ от оси обрабатываемой детали вследствие настройки на положение безударного резания; l — длина поверхности участков из алюминиевого сплава и неметалла.

Расчеты подтверждают, что в диапазоне значений угла β первоначальный контакт РЭ с заготовкой переносится в зону передней поверхности, максимально удаленной от хрупкой вершины и режущих кромок, что повышает стойкость инструмента из композитов и твердых сплавов, тем самым повышая их работоспособность до работоспособности композита К01. Режущая керамика в этом случае обеспечивает удовлетворительное прерывистое резание (см. рис. 4, зона II).

Следовательно, повысить работоспособность ИМ можно настройкой передней поверхности РЭ по рассчитанному углу β, обеспечивающему безударное резание [13, 14].

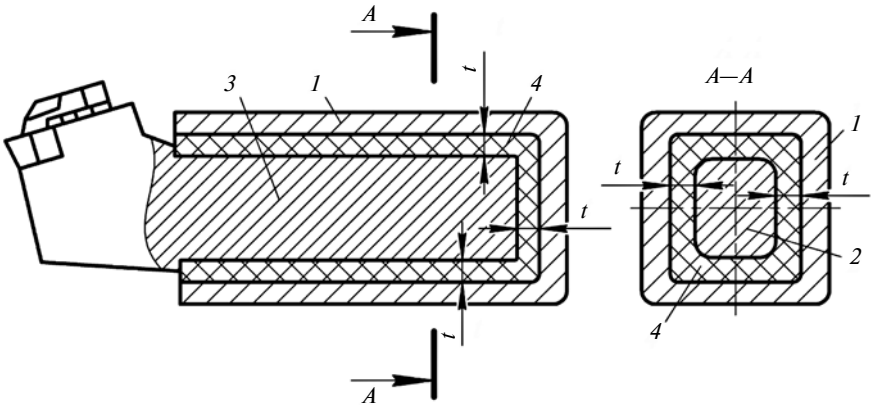


Рис. 7. Демпфирующий резец с державкой в упругой вставке

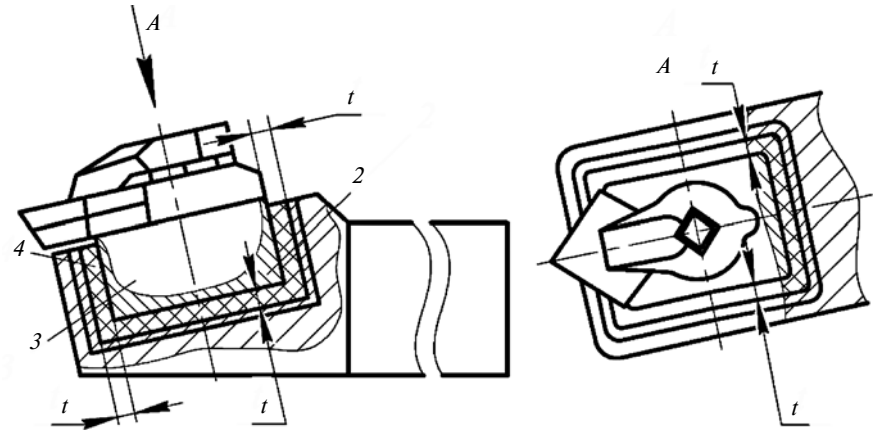


Рис. 8. Универсальный демпфирующий резец

Вышеперечисленные рекомендации при резании заготовки из нескольких конструкционных материалов обеспечивают устойчивость процесса обработки. Однако вибрации, возникающие при прерывистом резании, могут снижать качество обработки. Поэтому для применения эффективных, но хрупких ИМ, обеспечивающих высокую производительность и точность обработки, разработаны токарные демпфирующие инструменты, снижающие в большей степени негативные факторы прерывистого резания по сравнению с серийно-выпускаемым инструментом (рис. 7, 8) [15—17].

Гашение вибраций при точении поверхности сложного профиля обеспечивается конструкцией блока демпфирования (см. рис. 1, поз. *3*; рис. 7 и 8, поз. *3*), который представляет собой сборочную единицу из обоймы *1* (см. рис. 7 и 8), внутри которой размещена державка *2* резца. Между державкой резца и обоймой находится материал *4* с высокими демпфирующими свойствами, который по всему периметру имеет одинаковую толщину *t*. Он воспринимает прерывистые нагрузки на РЭ, тем самым гасит и продольные, и поперечные ударные нагрузки, что существенно улучшает качество обработки.

Таким образом, по использованию инструмента для обработки поверхностей сложного профиля прерывистым резанием были разработаны следующие рекомендации:

1. В качестве ИМ предпочтительно применять композит К10, который по совокупности показателей физико-механических свойств превосходит все известные отечественные и зарубежные ИМ, применяемые для точения поверхностей сложного профиля.

2. Целесообразно использовать РЭ с циклоидальной передней поверхностью, которая обеспечивает перераспределение ударной нагрузки, снижает силу трения стружки о переднюю поверхность и схватываемость между заготовкой и ИМ, что повышает период стойкость инструмента.

3. Для снижения образования трещин на режущей кромке предлагается выполнять фаски, которые усиливают переднюю и заднюю поверхности РЭ.

4. Посадочная поверхность державки резца должна обеспечивать точные заданное положение и геометрию РЭ.

5. Следует устанавливать РЭ так, чтобы обеспечивалось безударное резание, при котором врезание инструмента происходит не вершиной, а удаленной от нее частью передней поверхностью циклоидального профиля.

6. Для снижения вибраций и ударных нагрузок на РЭ следует использовать инструмент с демпфирующими элементами.

Предложенные рекомендации позволяют существенно смягчить условия прерывистого резания поверхностей сложного профиля и тем самым существенно расширить область использования традиционных ИМ, делая их практически пригодными для точения поверхностей различной конструктивной сложности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Высокоэффективные** технологии обработки / С. Н. Григорьев, М. А., Волосова А. Р. Маслов и др.; под ред. С. Н. Григорьева. М.: Машиностроение, 2014. 455 с.

2. **Боровский Г. В.** Инструментальное производство в России. М.: ВНИИинструмент, 2008. 160 с.

3. **Кугультинов С. Д., Ковальчук А. К., Портнов И. И.** Технология обработки конструкционных материалов. М.: МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2010. 678 с.

4. **Справочник** фрезеровщика / Л. Н. Бердников, В. Ф. Безъязычный, В. Н. Крылов и др.; под ред. В. Ф. Безъязычного. М.: Машиностроение, 2010. 272 с.

5. **Инструменты** из сверхтвердых материалов / Под ред. Н. В. Новикова, С. А. Клименко. М.: Машиностроение, 2014. 608 с.

6. **Кудряшов Е. А., Алтухов А. Ю., Яцун Е. И.** Эффективная работа инструмента из композита в условиях прерывистого резания // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2011. № 6. С. 79—82.

7. **Григорьев С. Н., Кохомский М. В., Маслов А. Р.** Инструментальная оснастка станков с ЧПУ: Справочник / Под общ. ред. А. Р. Маслова. М.: Машиностроение, 2006. 544 с.

8. **Боровский Г. В., Григорьев С. Н., Маслов А. Р.** Справочник инструментальщика / Под общ. ред. А. Р. Маслова. М.: Машиностроение, 2005. 464 с.

9. **Grzesik W., Zak K., Chudy R.** Influence of tool nose radius on the cutting performance and surface finish during hard turning with CBN cutting tools // Journal of Machine Engineering. 2017. Vol. 17. N. 2. P. 56—64.

10. **Инструментальное** обеспечение процессов механической обработки твердыми сплавами и композитами: монография / Е. И. Яцун, В. В. Малыхин, О. С. Зубкова и др. Курск: Университетская книга, 2016. 225 с.

11. **Методология** формирования режущей части энергосберегающих комбинированных инструментов / Е. А. Кудряшов, Яцун Е. И., Павлов Е. В., Ремнев А. И. / Тр. XVIII Межд. науч.-техн. конф. "Машиностроение и техносфера XXI века". Севастополь, Донецк. 2011. Т. 3. С. 231—234.

12. **Модельный** ряд энергосберегающих инструментов / Е. И. Яцун, А. И. Ремнев, Е. А. Кудряшов и др. // Компрессорное и энергетическое машиностроение. 2011. № 2 (24). С. 50—53.

13. **Совершенствование** инструментального обеспечения процессов точения конструктивно сложных поверхностей / Е. А. Кудряшов, И. М. Смирнов, Е. И. Яцун, Е. В. Павлов // СТИН. 2017. № 9. С. 23—28.

14. **Кудряшов Е. А., Смирнов И. М.** Применение метода управления режущей частью инструмента для повышения эффективности процесса прерывистого резания // Изв. Юго-Западного ГУ. Сер. Техника и технологии. 2013. № 4. С. 23—28.

15. **Пат. 2457078 Рос. Федерации:** МПК B 23 B 27/00. Универсальный демпфирующий резец.

16. **Пат. 2479385 Рос. Федерации:** МПК B 23 B 27/00. Демпфирующий резец с регулируемой жесткостью.

17. **Пат. на пол. мод. 178436 Рос. Федерации:** МПК B 23 B 27/00. Резец с устройством демпфирования.

УДК 621.9

А. Ю. АЛБАГАЧИЕВ, д-р техн. наук (Московский технологический университет, ИМАШ РАН), Е. В. ПРЕОБРАЖЕНСКАЯ, канд. техн. наук, А. С. КРАСКО, Е. С. СТРАМЦОВА (Московский технологический университет), e-mail: albagachiev@yandex.ru

Определение температурных изменений в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании жаропрочных сплавов

Рассматриваются параметры увеличения температуры в зоне резания при высокоскоростном фрезеровании. Предложен расчет повышения температуры при фрезеровании.

Ключевые слова: высокоскоростное фрезерование, жаропрочный сплав, температура, зона резания.

The parameters of temperature increase in the cutting zone at high-speed milling are considered. The calculation of temperature increase during milling is proposed.

Keywords: high-speed milling, heat-resistant alloy, temperature, cutting zone.

Жаропрочные сплавы относятся к труднообрабатываемым материалам, что обусловливает большие силы резания и высокие температуры в зоне обработки. Снизить трудоемкость обработки жаропрочных сплавов позволяет высокоскоростное резание.

При высокоскоростном фрезеровании показатели обработки (сила резания, температура) имеют свои особенности [1]. Известно, что при фрезеровании сила резания не постоянная. Однако колебания данного показателя можно уменьшить, используя фрезы с винтовыми зубьями. В отличие от точения, при котором температура в зоне резания

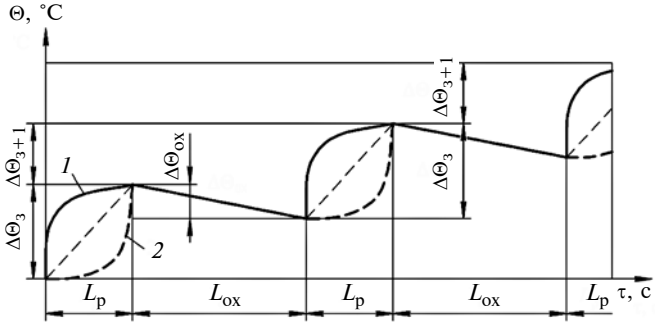


Рис. 1. Графики изменения температуры Θ в зоне резания при попутном (*1*) и встречном (*2*) фрезеровании однозубой фрезой в текущем времени τ

остается постоянной, при фрезеровании температура изменяется в определенных пределах.

На рис. 1 представлены графики изменения температуры в зоне резания при попутном и встречном фрезеровании однозубой фрезой.

Во время работы зуба фрезы температура повышается на величину $\Delta\Theta_з$ (см. рис. 1, участок $L_р$), далее до момента следующего врезания зуба температура снижается (участок $L_{ох}$). За время следующего резания зубом температура в зоне резания повышается на величину $\Delta\Theta_{з+1} = \Delta\Theta_з - \Delta\Theta_{ох}$.

При попутном фрезеровании зуб фрезы входит в заготовку сразу на глубину срезаемого слоя, что повышает силу резания и температуру, затем температура повышается медленнее до выхода зуба из заготовки (см. рис. 1, кривая *1*). При встречном фрезеровании резание начинается с минимальной толщины срезаемого слоя, которая плавно увеличивается (кривая *2*).

График изменения температуры при фрезеровании условно принимаем в виде прямой линии. Ее реальный вид зависит от применяемых смазывающе-охлаждающих технологических сред (СОТС). При высокоскоростном фрезеровании СОТС не используют, для охлаждения применяют обдув сжатым воздухом.

Для нахождения величины повышения температуры за время работы зуба воспользуемся формулой из работы [2]:

$$\Delta\Theta_з = \frac{P_z v\sqrt{\tau}}{1{,}73A(\rho_1 c_1\sqrt{a_1} + \rho_2 c_2\sqrt{a_2})}, \qquad (1)$$

где P_z — тангенциальная составляющая силы резания при фрезеровании; v — скорость резания; τ — время контакта зуба фрезы с заготовкой; A — площадь срезаемого слоя; ρ_1 и ρ_2 — плотности инструментального и обрабатываемого материалов, кг/м^3; c_1 и c_2 — удельные теплоемкости инструментального и обрабатываемого материалов, Дж/кг · °С; a_1 и a_2 — температуропроводности инструментального и обрабатываемого материалов, градус$^{-1}$.

Для определения максимальной составляющей силы резания при фрезеровании однозубой фрезой воспользуемся формулой из работы [3]:

$$P_z = 1{,}155\sigma_{st}s_z t\left\{\left[1 + 0{,}5(1 - \mathrm{tg}\gamma) + \frac{1}{2k}\right]\cos\gamma + \right.$$

$$\left. + \frac{k}{4\cos\gamma} + 0{,}5\sin\gamma + \frac{0{,}5l_з}{s_z} + \frac{ks_z\sin^2\varphi}{4t\cos\gamma}\right\}, \qquad (2)$$

где σ_{st} — напряжение текучести при определенной температуре, МПа; s_z — подача на зуб; t — глубина резания; k — коэффициент усадки стружки; γ — передний угол; $l_з$ — длина контакта задней поверхности резца с обрабатываемой заготовкой; φ — главный угол в плане резца.

Время контакта однозубой фрезы можно определить из геометрии фрезерования. Чаще всего фрезерование жаропрочных сплавов осуществляют концевыми фрезами, поэтому принимаем схему цилиндрического фрезерования (рис. 2).

Для определения времени $\tau_р$ контакта зуба фрезы с заготовкой необходимо знать длину $L_р$ дуги рабочего хода зуба, которую определим из рис. 1. Угол между точками входа и выхода зуба фрезы (точки *А* и *Б*) находим по формуле

$$\psi = \arccos\left(\frac{D - 2t}{D}\right),$$

где D — диаметр фрезы; t — глубина резания.

Тогда длина дуги рабочего хода зуба фрезы составит:

$$L_р = \pi D\psi/360.$$

Время охлаждения находим по формуле

$$\tau_{ох} = \pi D - L_р.$$

Время контакта зуба фрезы с заготовкой $\tau_р = L_р/v$, время движения зуба фрезы без контакта $\tau_{ох} = L_{ох}/v$.

Снижение температур инструмента и заготовки за время $\tau_{ох}$ зависит от числа зубьев, скорости резания и охлаждающей среды (табл. 1). Если фрезерование осуществляется однозубой фрезой диа-

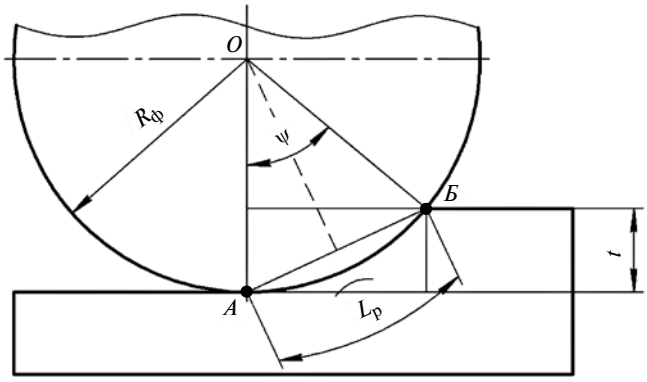


Рис. 2. Схема для определения длины рабочего хода зуба фрезы

метром 100 мм при глубине резания t = 5 мм и v = 200 м/мин без охлаждения, то время охлаждения составит $\tau_{ох}$ = 1,46 с, тогда $\Delta\Theta_{ох}$ = 4,38 °С. Это незначительная величина. Однако если применить охлаждение эмульсией, то температура снизится на 100 °С. Это следует учитывать в расчете температуры резания.

Исследования показали [4], что при высокоскоростном резании положительный эффект дает обработка без охлаждения или с подачей сжатого воздуха.

Рассмотрим типовой случай высокоскоростного фрезерования однозубой фрезой диаметром 20 мм при t = 0,5 мм, v = 1500 м/мин с охлаждением сжатым воздухом. Время охлаждения составит $\tau_{ох}$ = 0,03975 с, тогда $\Delta\Theta_{ох}$ = 1,19 °С, следовательно, при высокоскоростном резании происходит незначительное охлаждение инструмента и заготовки, поэтому не учитывается в расчетах температуры резания.

Рассмотрим фрезерование жаропрочного сплава ХН77ТЮ цельной твердосплавной (ВК8) фрезой с четырьмя зубьями.

Сила резания, рассчитанная по формуле (2), составляет P_{z1} = 88,6 Н; ψ = 18,19°; $L_р$ = 3,173 мм; $\tau_р$ = 0,0021 с. Параметры срезаемого слоя определим по известным формулам: $a_{max} = s_z \sin\psi$ = = 0,003 мм; $b = B/\cos\omega$ = 1,8 мм, тогда площадь срезаемого слоя $A = a_{max}b$ = 0,0054 мм.

Таблица 1

Скорость охлаждения стали в разных охлаждающих средах, °С/с

Среда	Температура, °С	
	650÷550	300÷200
Эмульсия	70	200
Раствор едкого натрия*	1200	300
Раствор поваренной соли*	1100	300
Раствор соды*	800	270
Керосин	170	50
Индустриальное масло	120	25
Спокойный воздух	3	1
Сжатый воздух	30	10

*10 %-е водные растворы при температуре 18 °С.

Таблица 2

Значения показателей теплофизических свойств сплава ХН77ТЮ при разных температурах *T*

T, °С	ρ, кг/м^3	λ, Вт/(м · °С)	c, Дж/(кг · °С)	a, 10^4 м^2/с	$\Delta\Theta_{зi}$, °С
100	8180	14	440	0,039	602
200	8140	16	460	0,043	581
300	8110	17	480	0,044	568
400	8070	19	500	0,047	551
500	8040	21	520	0,050	535
600	8000	24	540	0,056	513
700	7960	25	540	0,058	510
800	7920	28	570	0,062	489
900	7870	31	590	0,067	473

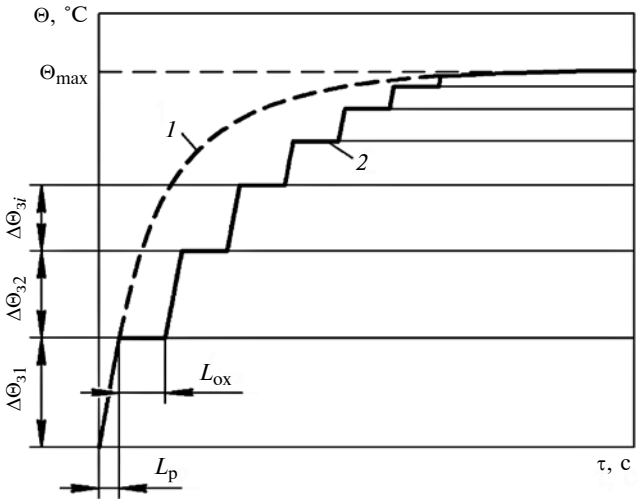


Рис. 3. Графики изменения прироста ΔΘ температуры в зоне резания при попутном (*1*) и встречном (*2*) фрезерованиях в текущем времени τ

Значения показателей теплофизических свойств жаропрочного сплава ХН77ТЮ: $c_1\rho_1$ = = 4,8 МДж/(м^3 · °С); a_1 = 0,041 · 10^4 м^2/с; показатели свойств твердого сплава ВК8: $c_1\rho_1$ = = 2,21 МДж/(м^3 · °С); a_1 = 0,246 · 10^4 м^2/с.

Подставив все значения в выражение (1), получим $\Delta\Theta_з$ = 525 °С. Заметим, что данное значение получено по средним значениям теплофизических показателей материалов. При последующих контактах зуба фрезы с заготовкой температура резания будет повышаться, но не с шагом в 525 °С, а с меньшим, пока не достигнет максимальной температуры резания, которую определяем по методике, приведенной в работе [3]: Θ_{max} = 1913 °С.

На рис. 3 показаны графики повышения температур в зоне резания при обработке точением (кривая *1*) и фрезерованием (кривая *2*). Снижение интенсивности повышения температур ($\Delta\Theta_{з1} > \Delta\Theta_{з2} > ... > \Delta\Theta_{зi}$) обусловлено изменением теплофизических показателей материала при нагревании.

В табл. 2 показано изменение теплофизические показателей жаропрочного сплава ХН77ТЮ в зависимости от температуры, даны расчетные значения $\Delta\Theta_{зi}$ для разных начальных температур (температура испытаний).

При первом врезании фрезы заготовка нагревается на 602 °С, при следующем врезании ее температура повышается еще на 513 °С. Далее температура в зоне резания увеличивается до достижения стационарного температурного режима, который составляет 1913 °С.

Результаты расчетов и экспериментальных исследований показали хорошую сходимость, что указывает на правильность математической модели.

УДК 629.113/.115

М. А. ШУШКИН, д-р экон. наук, М. В. ЕЖОВ (Высшая школа экономики), e-mail: shushkin79@mail.ru

Анализ рынка технологического оборудования IV поколения для производителей автокомпонентов в России

Проанализирован рынок технологического оборудования IV поколения в автомобильной промышленности и перспективы его использования в России.

Ключевые слова: автопроизводитель, конкурентоспособность, индустрия 4.0, инновации, технология, аддитивная технология, форсайт-исследования.

The market of technological equipment of IVth generation in the automotive industry and prospects of its use in Russia are analyzed.

Keywords: automaker, competitiveness, industry 4.0, innovations, technology, additive technology, foresight research.

Термины "четвертая промышленная революция" и "индустрия 4.0" были введены в 2011 г. в Германии и означают использование в производстве киберфизических систем, к которым относятся системы 3D-моделирования, 3D-печати, Smart Factory (умная фабрика), Интернет и т. п. В 2014 г. для развития этого направления в США создали некоммерческий консорциум Industrial Internet, в который вошли такие гиганты индустрии, как General Electric, IBM, AT&T и Intel [1].

Ожидается, что внедрение технологического оборудования (ТО) IV поколения на предприятиях автомобильной промышленности приведет в коренной трансформации производственных и логистических процессов [2].

На сегодняшний день есть уже множество примеров успешного использования данных технологий. Так, в 2017 г. компания Ford Motor Company заявили о разработке производства комплектующих для серийных автомобилей с помощью 3D-печати. В 2016 г. по данным компании IDTechEx стоимость данного ТО, используемого в автомобилестроении, составила 570 млн долл. США [3].

В ближайшее время прогнозируется значительный рост спроса на ТО IV поколения, перспективы же российского рынка по данному оборудованию не исследованы, поэтому анализ возможностей отечественного автопрома в этом направлении весьма актуален.

Примеры использования ТО IV поколения

Практическое применение 3D-печать в автомобильной промышленности получила в 2014 г. Как правило, ее используют для прототипирования автокомпонентов, что позволяет значительно сократить время разработки и испытаний.

Компания General Motors активно использует технологии селективного лазерного спекания (SLS) и стереолитографии (SLA). В 2014 г. с применением технологий быстрого прототипирования были испытаны модели более 20 тыс. автомобильных компонентов [4]. Так, при разработке рестайлинговой модели Chevrolet Malibu конструкторы применили их для оценки вариантов отделки центральной консоли, стоек и спинок передних сидений, что позволило выполнить тестирование без дорогостоящих деталей, получаемых литьем [5].

Компания Ford Motor Company выполнила прототипирование головки цилиндров двигателя и впускного коллектора для нового Ford Mustang,

(Окончание статьи. Начало см. на стр. 82)

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Албагачиев А. Ю., Преображенская Е. В., Краско А. С.** Модель высокоскоростного резания стали ХН77ТЮР // Мат. Международной науч.-техн. конф. "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике" / Под ред. М. Ф. Булатова. М.: Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Вып. 23 (XXIII) 2017. С. 188—190.

2. **Лутьянов А. В., Страмцова Е. С.** Определение оптимальной температуры при фрезеровании моноколеса турбореактивного двигателя АИ-222-25 // Evolutio. Технические науки. 2017. № 8. С. 49—51.

3. **Албагачиев А. Ю., Преображенская Е. В., Краско А. С.** Модель высокоскоростного резания стали ХН77ТЮР // Мат. Международной науч.-техн. конф. "Информатика и технологии. Инновационные технологии в промышленности и информатике" / Под ред. М. Ф. Булатова. М.: Московский технологический университет, Физико-технологический институт. Вып. 23 (XXIII) 2017. С. 188—190.

4. **Применение** охлажденного ионизированного воздуха при высокоскоростном фрезеровании / В. Б. Есов, К. О. Климочкин, А. М. Ханов, О. Г. Хурматуллин // Вестник ПНИПУ. 2011. 103—105 с.

используя 3D-печать, на что потребовалось всего 4 дня и 3 млн долл. США [6]. В 2017 г. в Ford Motor Company по данной технологии был изготовлен впускной коллектор и в перспективе рассматривается производство других комплектующих для серийных автомобилей.

Аддитивные технологии используют и для оптимизации производственных процессов [6], например, концерн BMW использует 3D-печать для изготовления инструмента, необходимого для испытаний и сборки своей продукции.

Широкие возможности 3D-печать открывает для сервисного обслуживания и реставрации автомобилей.

В 2014 г. компанией Local Motors был изготовлен автомобиль Strati из углеродного волокна посредством 3D-печати. Концерн Honda в 2016 г. на выставке CEATEC в Японии представил одноместный автомобиль Micro Commuter, большинство элементов которого были изготовлены с помощью аддитивных технологий [7]. Множество деталей суперкара Koenigsegg One выполнены также с помощью 3D-печати, что значительно снизило вес автокомпонентов. Дизайнеры гоночного автомобиля Delta-Wing (компания Nissan Motor Corp) использовали трехмерную печать для получения отверстий в тормозных механизмах, воздуховодах и боковых крышках коробки передач [5].

Американский производитель Confederate Motors эксклюзивных мотоциклов премиум-класса внедрил аддитивные технологии в производственный процесс более 180 деталей.

Исследование перспектив российского рынка

В прогнозировании развития рынка ТО нового поколения использовали эвристический подход, при котором аналитики опираются на мнение компетентных в данной области экспертов при условии, что они способны дать критическую оценку, прокомментировать тренды, спрогнозировать развитие. Исследование проводили в четыре этапа.

Первый этап — определение трендов на автомобильном рынке и рынке комплектующих в России, которое включает в себя обзор переломных для производственного процесса событий, описание новых форматов взаимодействия автомобильных компаний и смежных предприятий.

Второй этап — установление потенциально востребованного ТО на основе опросного листа и интервьюирования. Опросный лист имел пять блоков, каждый из которых состоял из 20 вопросов. Опрашивались эксперты, имеющие опыт взаимодействия с компаниями-производителями автомобильных компонентов.

Третий этап — анализ потенциальных потребителей данного ТО. Расчет выполняется методом цепного индекса, в рамках которого определяется:

число потенциальных потребителей ТО IV поколения среди производителей автокомпонентов;

среднее значение потребления продукта на одного потенциального покупателя (комплект оборудования);

средняя цена комплекта ТО для одного производителя.

Далее рассчитывается потенциальная емкость (в денежном выражении) рынка ТО IV поколения для исследуемых предприятий.

Результаты исследования

На первом этапе исследования были выявлены рыночные тренды в российском автопроме, которые влияют на внедрение ТО IV поколения.

1. *Высокая волатильность отечественного автомобильного рынка.* После спада автомобильного производства в период кризиса 2008—2009 гг. имел место рост производства автомобилей до 2012 г. Начиная с 2013 г. наблюдается спад рынка, при этом число выпускаемых иномарок увеличивается, а производство отечественных машин сокращается. В настоящий момент реальная емкость российского авторынка не превышает 1,2—4,5 млн автомобилей. Однако эксперты отмечают значительный потенциал для роста отечественного авторынка.

2. *Ориентация производителей автокомпонентов на зарубежные фирмы*, реализующие локальное производство на территории РФ. В России работает около 350 компаний, производящих автомобильные компоненты, из них 90 — иностранные и 260 — российские, многие из которых имеют совместные предприятия с зарубежными партнерами [8]. Заметим, что российские производители автокомпонентов чаще всего используют устаревшее оборудование и технологии, не имеют достаточных средств на НИОКР.

3. *Низкое качество продукции* российских производителей (основная проблема). В условиях высокой конкуренции качество продукции определяет ее востребованность. При этом важными остаются минимизация сроков поставок и их соблюдение, а также ценовая политика [8].

4. *Инжиниринговые центры являются потенциальными потребителями* ТО IV поколения, которое необходимо для создания новых материалов и продукции, их испытаний с использованием технологий моделирования.

5. *Высокая финансовая устойчивость* предприятия — обязательное условие для потенциального покупателя ТО IV поколения.

На втором этапе исследовали перспективы использования разного ТО. Для этого был разработан специальный опросный лист для специалистов в автомобильной отрасли. Были проведены 11 экспертных интервью и выполнен их анализ, результаты представлены в табл. 1, по которым сделаны следующие выводы.

1. Основные тренды в производстве автокомпонентов:

снижение веса автомобиля и его компонентов;

использование мобильных устройств в конструкции автомобиля;

повышение экологичности, начиная с используемых материалов и заканчивая совершенствованием производственных процессов;

повышение профессионализма персонала.

2. Основные факторы, тормозящие внедрение ТО IV поколения:

отставание химической промышленности России и, как следствие, использование импортных материалов в производстве высокотехнологичных деталей;

высокая стоимость ТО нового поколения;

отток ведущих специалистов за рубеж;

отсутствие долгосрочного планирования;

недостаточное финансирование.

Было также отмечено редкое упоминание об экономическом кризисе и устаревшее управление производством.

3. Среди технологий и ТО были выделены:

аддитивные технологии;

облачные технологии;

элементы smart factory;

программы для станков с ЧПУ;

системы модульного производства и интеграция платформ (использование общих для различных автомобилей компонентов, комплектующих, типовых конструктивных и технологических решений).

Аддитивные технологии упрощают изготовление деталей сложных конструкций, исключают операции сварки, пайки, механической обработки и пр., что не только снижает стоимость детали и время ее изготовления, но и обеспечивает высокую прочность и целостность конструкции, снижает ее металлоемкость и вес.

Таблица 1

Опросник и частота ответов

Категория вопроса	Варианты ответов	Число ответов
I. Текущее состояние отрасли	Технологии IV поколения эффективны	6
	Технологии IV поколения неэффективны	18
II. Сдерживающие факторы	Экономический кризис	6
	Санкции	8
	Зависимость от импорта	14
	Конкуренция	10
	Коррупция	8
	Устаревшие методы управления	7
	Недостаток финансирования	15
	Высокая стоимость технологий	9
	Спад рынка	8
	Недостаток квалифицированных специалистов	12
III. Прогноз модернизации	Возможна	9
	Не будет	2
	Будет постепенной	8
IV. Наиболее перспективные технологии	Аддитивные	18
	Модульное производство	13
	Умные заводы	7
	Облачные сервисы	12
	Программные пакеты для станков	8

При этом эксперты отмечают, что аддитивные технологии целесообразно применять на этапе разработки новой продукции или при быстром прототипировании, что сокращает срок изготовления модели и затраты. При серийном производстве использование данных технологий невыгодно, так как повышает себестоимость продукции из-за высокой стоимости материала и ТО.

Облачные технологи облегчают хранение и обмен данными, минимизируют временные затраты и простои оборудования. Кроме того, их применение обусловлено стремительным ростом числа пользователей гаджетами.

Компьютерные технологии повышают эффективность управления производством. Программное обеспечение для станков с ЧПУ обеспечивает оптимизацию технологических процессов и максимальную производительность.

К модернизации же производств до уровня Smart factory эксперты относятся скептически, так как это требует не только колоссальных финансовых вложений, но принципиально новой клиентоориентированной бизнес-модели. Однако некоторые элементы Smart factory, например, использование Интернет для координации работы оборудования вполне реализуемы.

На третьем этапе проанализировали рынок ТО и разработали рекомендации для его производителей.

Установлено, что основными потребителями ТО IV поколения являются компании-производители автокомпонентов, имеющие инжиниринговые центры и стабильную многолетнюю финансовую устойчивость. С учетом этого по данным отчета аналитической компании АВТОСТАТ было выделено 260 российских компаний. Далее по данным СПАРК за три года были определены их финансовые возможности [9], проанализированы их стратегии развития и реализация инжиниринговой и инновационной деятельности. Из этого числа была выделена 61 компания (табл. 2).

Далее был выполнен расчет потенциала рынка ТО IV поколения (в денежном выражении).

На основании полученного списка потенциальных потребителей ТО IV поколения и прайс-листов компаний, занимающихся его реализацией, была рассчитана потенциальная емкость рынка методом цепного индекса и разработаны рекомендации по продвижению IV поколения.

Для каждого предприятия был определен минимальный комплект оборудования, для определения его стоимости проанализированы коммерческие предложения производителей. С учетом средней рыночной цены в качестве потенциального поставщика выбрана компания 3D-Systems, которая имеет устойчивую положительную репутацию.

Далее с целью уточнения комплектации ТО, необходимого на этапе разработки и моделирования новой продукции, было установлено, что в данный комплект входят: ручной 3D-сканер; 3D-принтер; вспомогательные системы и станции для сопровождения процесса изготовления; расходные материалы (упрочненный полиамид) (табл. 3).

Заметим, что кроме приобретения ТО IV поколения необходимы средства на обучение обслуживающего его персонала.

Исследование рынка ТО IV поколения показало, что стоимость одного комплекта с минимальной номенклатурой позиций составляет 1,8 млн долл. США. Комплектация зависит от количества потребляемого полиамида, маркеров и пр. С учетом этого установлено, что потенциал российского рынка на сегодня составляет 109,162 млн долл. США.

Таблица 2

Финансовая устойчивость российских производителей автокомпонентов (база данных СПАРК за 2013—2015 гг.)

Вид предприятий	Общее число предприятий	Прибыльных (в %)
Крупные	35	14 (40)
Средние	23	12 (52,17)
Малые	12	8 (66,67)
Микро	47	27 (57,45)

Таблица 3

Технологическое оборудование и его стоимость для инжиниринговых центров, выпускающих автокомпоненты

Оборудование (дополнительные расходы)	Число	Цена, долл. США
1. Промышленная система 3D-печати Pro 230 SLS (включая установку и калибровку системы, а также обучение двух человек)	1	1 071 200
2. 3-D сканер HandyScan 700	1	70 580
3. Маркеры для сканера с черным контуром и легкой клеевой основой	500	95
4. Модуль RCM230 быстрой смены материала	2	154 200
5. Станция удаления порошка BOS230	1	84 000
6. Система IRS Pro для переработки порошка	1	66 850
7. Система нагрева с улучшенным контролем температуры TruTemp	1	94 250
8. Станция прогрева/охлаждения порошка	1	15 400
9. Пылеуловитель	1	13 540
10. Пылесос	1	6000
11. Материал Duraform HST (упрочненный полиамид, 100 кг)	5	160 200
12. Программное обеспечение Magics RPP с модулем Sintermpdule	1	13 680
13. Трансформатор 380/240 Volt (3 Pgase, 50 Гц, 33,3 KVA)	1	5400
14. Азотная установка Провита-N60C	1	20 000
15. Компрессор CSM 15/8 MAXI Ceccato	1	10 240
16. Система пескоструйной обработки на 990 л	1	3125
17. Стеклошарики для пескоструйной обработки фракций, кг	100	782
Итого		**1 789 542**

Рекомендации и основные ограничения исследования

Для ускорения внедрения ТО IV поколения на российских предприятиях автопрома необходимо широко рекламировать потенциал аддитивных технологий на конкретных примерах успешного их использования с экономическими выкладками. При этом следует обеспечить консультации руководства предприятий и тесное сотрудничество с консалтинговыми компаниями.

Любое даже незначительное нововведение на предприятии требует инвестиций. В России кроме кредитования на приобретение основных фондов широко используется лизинг, который успешно можно применить и для модернизации производства.

Большинство экспертов отметили дефицит специалистов в России для работы на высокотехнологичном оборудовании, поэтому необходимы обучающие программы по ТО IV поколения.

По результатам исследования были сформулированы рекомендации для производителей ТО IV поколения:

использовать выездные презентации продукта с подробными финансовыми выкладками;

обеспечивать консультационные услуги с учетом принятых решений по модернизации предприятия;

сформировать предложения по лизингу;

разработать обучающую программу и предоставлять специалистов по обучению работы на ТО IV поколения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Kim A., Otani T., Leung V.** Model-Based Design for the Development and System-Level Testing of ADAS, Energy Consumption and Autonomous Driving // Proceedings of the 3-rd Automotive Electronics Congress. Paris. 2014. P. 71—81.
2. **Хель И.** Индустрия 4.0: Что такое четвертая промышленная революция? URL: http://hi-news.ru/business-analitics/industriya-4-0-chto-takoe-chetvertaya-promyshlennaya-revolyuciya.html
3. **Ford's** 3D-printed auto parts save millions, boost quality. Ford Media Center. 2013. December 13. URL: https://media.ford.com/content/fordmedia/fna/us/en/news/2013/12/12/ford_s-3d-printed-auto-parts-save-millions-boost-quality.html
4. **3D-rapid** prototyping fast tracks GM fuel efficiency gains. Learning center. 2014. URL: http://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/3d-rapid-prototyping-fast-tracks-gm-fuel-efficiency-gains
5. **Auto** industry uses 3-D printing heavily in product development // Automotive News. 2014. October 27. URL: http://www.autonews.com/article/20141027/OEM06/310279987/auto-industry-uses-3-d-printing-heavily-in-product-development
6. **Jensen T.** 3D printing: A model of the future. Piper Jaffray. 2013.
7. **Kerns J.** How 3D Printing Is Changing Auto, Manufacturing, Machine Design. 2016. URL: http://www.machinedesign.com/3d-printing/how-3d-printing-changing-auto-manufacturing
8. **АВТОСТАТ.** URL: https://www.autostat.ru/catalog/product/135/
9. **СПАРК.** URL: https://www.spark-interfax.ru/promo