ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 6 (102)
ИЮНЬ
2013

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р техн. наук
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета
д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК
д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
В.М. БАШКОВ
А.И. БЕЛИКОВ
А.И. БОЛДЫРЕВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
Ю.Р. КОПЫЛОВ
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
Г.А. СУХОЧЕВ
В.П. ТАБАКОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:
Л.П. ШЕСТОПАЛОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159**, "Пресса России" **39269**, "Почта России" **60252**) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Гончаров В.С., Васильев Е.В. Упрочнение длинномерных протяжек в ионно-плазменных установках типа ННВ-6.6-И1 3

Гуревич Ю.Г., Овсянников В.Е., Фролов В.А. Поверхностное упрочнение феррито-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом молибдена 7

Лахоткин Ю.В., Кузьмин В.П., Душик В.В., Рыбкина Т.В. Новый низкотемпературный метод нанесения твердых наноструктурированных покрытий на изделия сложной формы 9

Собачкин А.В., Попова А.А., Назаров И.В. Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошков слоистых механокомпозитов с металлической и интерметаллидной матрицей 16

ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В. Строение и свойства полимерных покрытий, полученных распылением экструдатов 23

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Болдырев А.А., Смоленцев В.П. Повышение точности базирования деталей реологическими средами с переменной плотностью 29

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Барац Ф.Я., Кочетков А.В. Охлаждение очага деформации при отделочно-упрочняющей обработки путем увеличения теплового потока в инструмент. 33

Козлов А.А., Смоленцев В.П., Климова Г.Н. Расчет и проектирование инструмента для растрового маркирования материалов 38

Нафиков М.З., Зайнуллин А.А., Загиров И.И. Геометрия контакта при восстановлении валов приваркой двух стальных проволок 42

Погонышев В.А., Логунов В.В. Повышение износостойкости шеек коленчатого вала путем нанесения пленок пластичных металлов 47

Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции.

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

© **Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2013**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 6 (102)
June
2013

Since 2005, January

Editor-in-Chief
Dr of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council
Dr of Eng. Sci., The honoured worker of a science and technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

Editorial Assistants
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

Chairman Assistants:
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
L.P. SHESTOPALOVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159**, "Pressa Rossii" **39269**, "Pochta Rossii" **60252**) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry Tele- and Broadcasting of Mass Communications Media. The certificate of registration ПИ № 77-17733, March 9, 2004

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Goncharov V.S., Vasilyev E.V. Long broaches hardening in pvd plants NNV-6.6.-I1 type 3

Gurevich Yu.G., Ovsyannikov V.E., Frolov V.A. Superficial hardening of grey cast ferrite-perlite iron by interaction with molybdenum oxide 7

Lakhotkin Yu.V., Kuzmin V.P., Dushik V.V., Rybkina T.V. New low-temperature method of hard nanostructural coatings deposition on complex shape components 9

Sobachkin A.V., Popova A.A., Nazarov I.V. The structure and properties of gas-detonation coatings various functional destination based on the powders of layered mechanocomposites with metallic and intermetallic matrix 16

POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

Belotserkovsky M.A., Chekulaev A.V. Structure and properties of coatings obtained by spraying extrudates 23

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Boldyrev A.A., Smolentsev V.P. Workpieces locating accuracy increase by rheological ambients with nonuniform density 29

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Barats F.Ya., Kochetkov A.V. Cooling of the center of deformation at finishing-strengthening processing by increase in the thermal stream in the tool 33

Kozlov A.A., Smolentsev V.P., Klimova G.N. Calculation and design tool for marking raster 38

Nafikov M.Z., Zainyllin A.A., Zagirov I.I. The geometry of the contact in the recovery shaft welding of two steel wires 42

Pogonyshev V.A., Logunov V.V. Improving wear resistance of crankshaft necks by covering them with ductile metal films 47

Reprint is possible only with the reference to the journal "Strengthening technologies and coatings".

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses

© **"Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2013**

УДК 621.793.74

В.С. Гончаров, Е.В. Васильев *(Тольяттинский государственный университет)*
E-mail: qvs777@gmail.com

Упрочнение длинномерных протяжек в ионно-плазменных установках типа ННВ-6.6-И1

Модернизирована серийная установка ионно-плазменного напыления ННВ-6.6-И1 и разработана модель износостойкого комплекса для упрочнения длинномерных протяжек из быстрорежущей стали.
Ключевые слова: *ионно-плазменное напыление, быстрорежущая сталь, износостойкость, протяжка, защитное покрытие.*

Serial PVD plant NNV-6.6.-I1 is modernized and wear resistance complex model are developed for improving wear resistance of high-speed steel long broaches.
Keywords: *cathodic arc deposition, high-speed steel, wear resistance, broache, protective coating.*

Введение

Протягивание является одним из наиболее перспективных методов высокопроизводительной обработки точных поверхностей. Протяжка – дорогостоящий высокоточный многолезвийный инструмент – работает в условиях воздействия сложного комплекса факторов: высоких контактных напряжений, температур и активного протекания физико-химических процессов [1].

Одним из путей повышения эксплуатационных характеристик протяжек является нанесение различных ионно-плазменных покрытий, таких как TiN, TiAlN, TiC, WC/C и др. Для упрочнения длинномерного режущего инструмента разработаны различные установки, которые, однако, узкоспециализированы, имеют значительные габариты и высокую стоимость [2], в связи с чем актуальна модернизация существующих стандартных установок ионно-плазменного напыления.

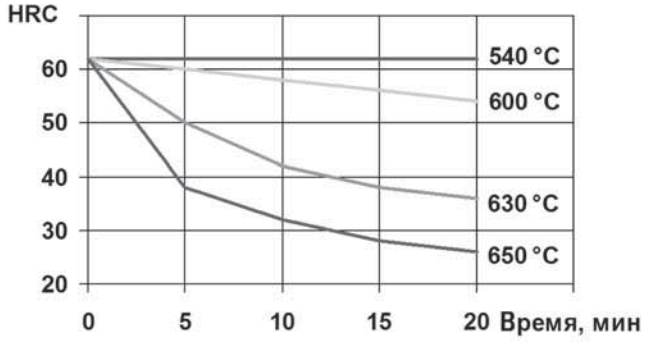


Рис. 1. Влияние температуры нагрева на разупрочнение быстрорежущей стали Р6М5

В настоящее время значительная часть протяжек изготавливается из быстрорежущей стали, которая имеет меньшую твердость (60...65 HRC) по сравнению с твердыми сплавами (70...73 HRC) и склонна к разупрочнению в результате тепловых нагрузок (рис. 1). При этом, несмотря на низкую скорость рабочего движения протяжек v = 2...12 м/мин [3], при поточной обработке деталей может наблюдаться разогрев режущей кромки до температуры 860 °С [4, 5].

Цель работы – повышение износостойкости длинномерных протяжек из быстрорежущей стали и модернизация серийной установки ионно-плазменного напыления ННВ-6.6-И1.

Материалы и оборудование

В качестве оборудования для нанесения ионно-плазменного покрытия использовалась стандартная установка ННВ-6.6-И1 (рис. 2) с диаметром и высотой рабочей камеры 600 мм.

Для осуществления ионно-плазменного упрочнения длинномерных протяжек (с учетом того, что их концевые элементы не требуют упрочнения, и, следовательно, могут находиться вне зоны действия плазменных потоков) в установке ННВ-6.6-И1 предложе-

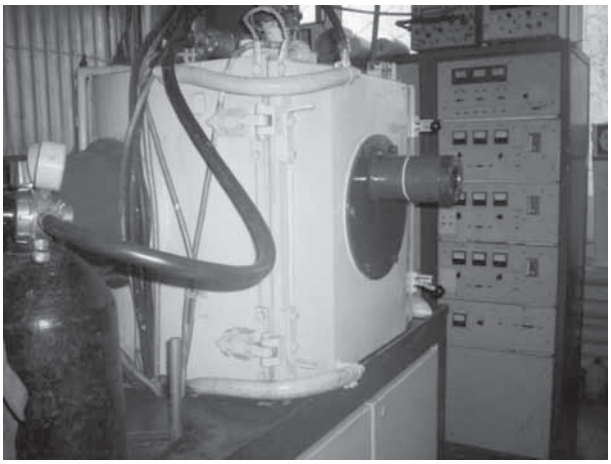


Рис. 2. Установка ионно-плазменного напыления ННВ-6.6-И1

на оригинальная конструкция вакуумной камеры и оснастки (рис. 3), которая состоит из удлиняющих цилиндров *1*, *11*; направляющих *2*, *12*; зажимов *4*, *9*; креплений *3*, *10*; кольца *5*; вала *14* и диска *15*.

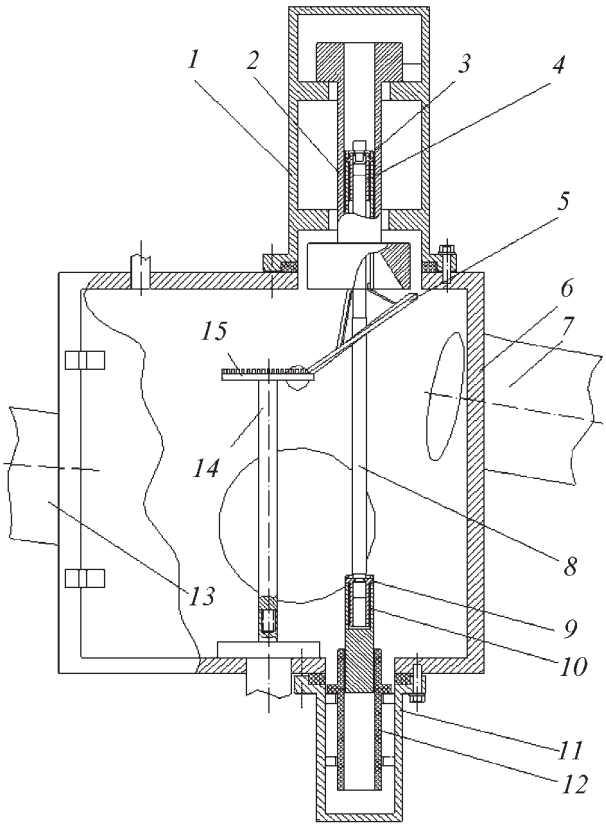


Рис. 3. Предлагаемая схема модернизации установки ННВ-6.6-И1:
1, *11* – цилиндры; *2*, *12* – направляющие; *3*, *10* – крепления; *4*, *9* – зажимы; *5* – кольцо; *6* – корпус вакуумной камеры; *7*, *13* – магнетроны; *8* – протяжка; *14* – вал; *15* – диск

Направляющие выполнены из тефлона для изоляции деталей от корпуса вакуумной камеры *6* установки. Вакуумная камера имеет удлиненную конструкцию благодаря нижнему и верхнему цилиндрам *1*, *11*. Цилиндры, в свою очередь, крепятся герметично болтами к корпусу вакуумной камеры, между ними непосредственно располагается резиновое уплотнение для обеспечения герметичности соединения.

Такая конструкция оснастки позволяет легко закреплять, жестко фиксировать длинномерный режущий инструмент длиной до 900 мм и диаметром до 30 мм в вертикальном висячем положении, а также совершать вращательное и вертикально-поступательное колебательное перемещение изделия, что обеспечивает упрочнение всей режущей части по длине. Рабочий ход инструмента определяется углом наклона кольца. Кроме того, при нанесении покрытия на малогабаритные изделия удлиняющие цилиндры *1*, *11* заменяются крышками, что придает первоначальный вид установке.

Для замены процесса ионного разогрева и облегчения предварительного подогрева был разработан *источник газовой плазмы* (ИГП) (рис. 4), основными достоинствами которого являются: широкая зона действия (до 60°); возможность управления геометрией газовой плазмы с помощью электромагнита *7*; автоматический поджиг газовой плазмы в случае сбоя горения плазмы при помощи электрода *13*; уменьшение количества примесей в потоке плазмы в момент поджига благодаря заслонке *20*.

Вольфрамовая спираль *12* используется для создания начальной электронной эмиссии, инициируя зарождение газовой плазмы. Плазмообразующий газ подается в сопла *4*, изолированные от корпуса *2* при помощи керамических вставок *3*. Токоведущие провода и патрубки подачи газа подводятся при помощи вакуумных уплотнений *16*, *17* и *18*. Втулки *10*, *11*, крышка *8* и экран *9* предусмотрены для жесткой фиксации сопел подачи газа. Корпус *2* источника газовой плазмы крепится к камере при помощи фланца *19*.

Использование ИГП позволяет исключать недостатки, присущие ионному поджигу серийной установки ННВ 6.6-И1. Устройство для электронного подогрева позволяет вести прогрев всего объема инструмента до необходимых оптимальных температур напыления без риска электроэрозионного растравливания и преждевременного разупрочнения поверхностных слоев инструмента; осуществляет ионизацию газовой смеси до высокой степени, что дает возможность эффективнее проводить процессы стимулированной ХТО. Кроме того, ИГП имеет бо́льшую производительность, чем ионная бомбардировка инструмента из-за более направленного и контролируемого процесса разогрева.

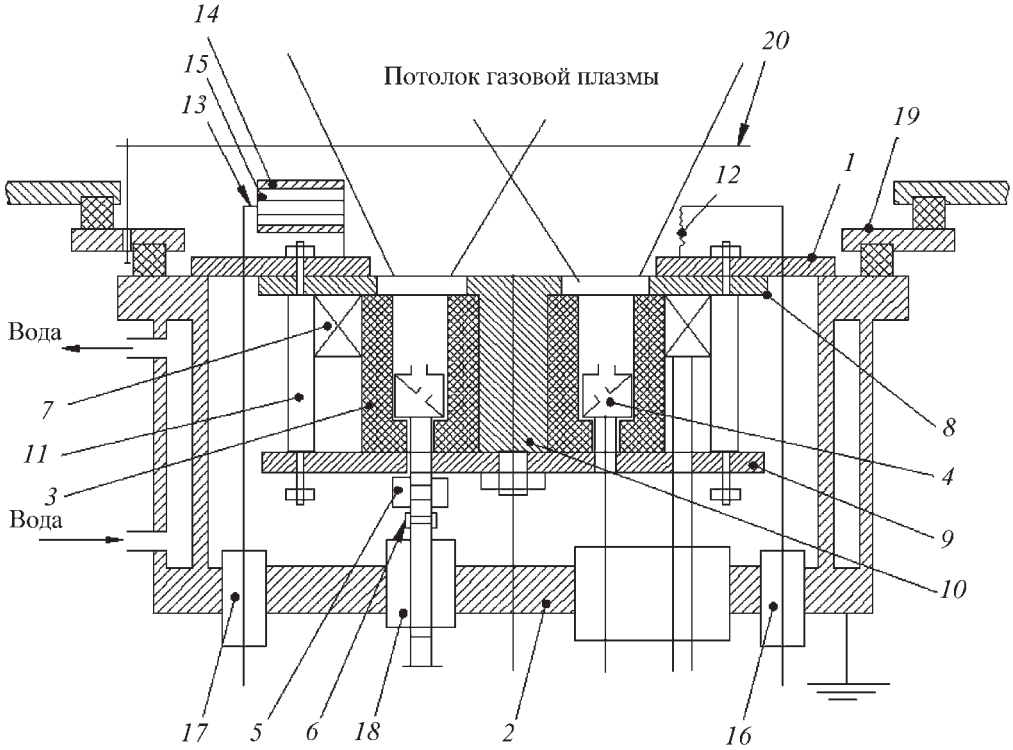


Рис. 4. Источник газовой плазмы:
1 – крышка корпуса; *2* – корпус; *3* – вставка керамическая; *4* – сопло подачи газа; *5*, *15* – изоляторы; *6* – токоподвод; *7* – электромагнит; *8* – крышка; *9* – экран; *10*, *11* – втулки; *12* – спираль; *13* – электрод; *14* – втулка; *16*, *17* – электрические вводы; *18* – уплотнитель; *19* – фланец крепления к корпусу камеры; *20* – заслонка

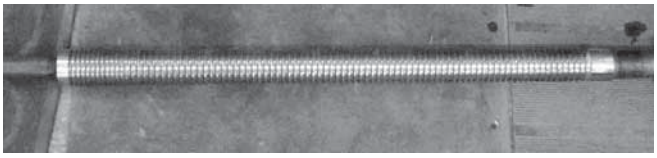


Рис. 5. Упрочняемое изделие

В качестве упрочняемых изделий использовались длинномерные протяжки (рис. 5) из быстрорежущей стали Р6М5 после закалки и низкого отпуска. Перед загрузкой в камеру изделия были промыты и обезжирены с помощью ацетона и высушены.

Модель износостойкого комплекса

На основе работы [4] была разработана модель износостойкого комплекса, представленная на рис. 6. Оптимальное число слоев и их толщина определялись опытным путем. В рассмотренном случае толщина износостойкого комплекса составляет 5,2 мкм, что находится в пределах допуска протяжек, использованных при упрочнении.

Перед нанесением покрытия предварительно азотируют рабочую поверхность инструмента на глубину 30...40 мкм, что способствует компенсации разницы тепло-физико-механических свойств материалов покрытия и инструмента и повышает твердость основы. Затем на азотированную поверхность наносят чередующиеся слои с низкой теплопроводностью, например из керамики Al_2O_3 (теплопроводность 0,35 Вт/м·К [6]), и высокой теплопроводностью, например из меди (теплопроводность 380 Вт/(м·К) [6]), что позволяет избежать локального перегрева при работе инструмента и, как следствие, разупрочнения быстрорежущей стали. При этом для сохранения твердости медные слои должны быть в 3–5 раз тоньше керамических.

После этого наносят чередующиеся износостойкие и пластичные слои. В качестве износостойких покрытий выбраны наиболее распространенные TiN и TiAlN. Они обладают высокой износостойкостью (низкий коэффициент трения), сопротивлением окислению при повышенных температурах, имеют низкую склонность к схватыванию с нагретой стружкой.

Следует отметить, что большая разница в твердости подложки и поверхностного слоя покрытия снижает ударную вязкость, что ведет к образованию усталостных трещин при динамических нагрузках инструмента [7]. Поэтому износостойкие слои напыляют в порядке увеличения твердости, что способствует уменьшению вероятности выкрашивания больших фрагментов покрытия.

Промежуточные пластичные металлические слои из титана позволяют осуществлять адгезионную связь, релаксировать возникающие напряжения, препятствуют распространению трещин в упрочненных слоях, уменьшают размер отколовшихся частиц и темп износа.

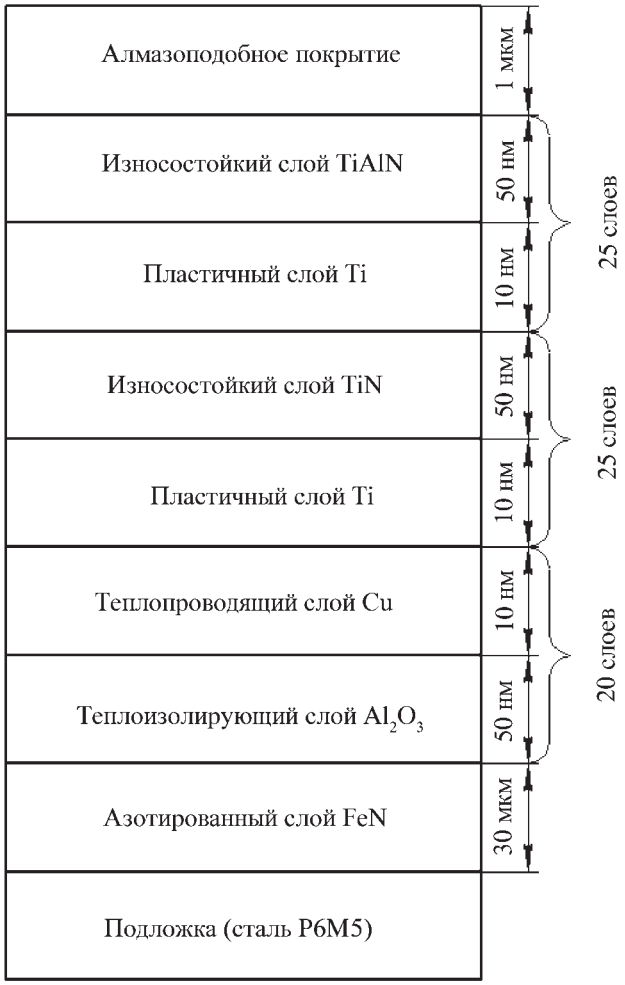


Рис. 6. Модель износостойкого комплекса

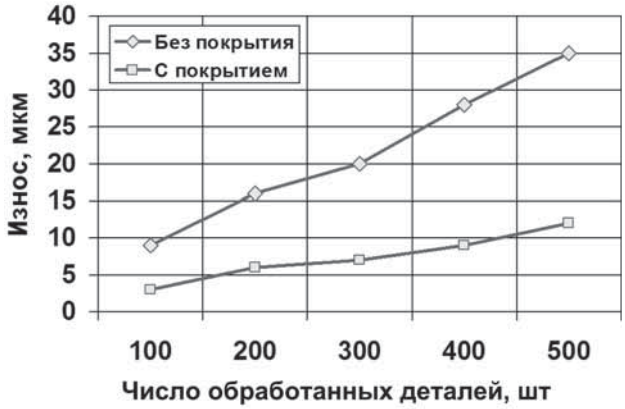


Рис. 7. Стойкость инструмента

Нанесение покрытия по разработанной модели производилось в 2 этапа:

1. Ионная очистка, азотирование, нанесение чередующихся теплоизолирующих и теплопроводящих слоев (катоды Al, Cu).

2. Смена катодов на Ti, Al, ионная очистка, напыление чередующихся износостойких и пластичных слоев.

Результаты

Техническим результатом применения разработанной модификации оборудования и модели износостойкого комплекса является возможность упрочнения длинномерных протяжек в серийных установках ионно-плазменного напыления типа ННВ-6.6-И1, уменьшение воздействия вредных факторов (коэффициент трения, напряжение на границе раздела, температура в процессе резания) на быстрорежущую сталь и существенное повышение стойкости инструмента.

Результаты испытаний инструмента при протягивании стали 40Х показали увеличение износостойкости в 2,9 раза (рис. 7).

Вывод

Разработанная схема модернизации оборудования позволяет упрочнять длинномерные протяжки в серийных установках ионно-плазменного напыления типа ННВ-6.6-И1. Предлагаемая модель износостойкого комплекса обеспечивает получение защитного износостойкого покрытия на поверхности режущего инструмента из быстрорежущей стали с повышением износостойкости в 2,9 раза, что обеспечивает ее экономическую эффективность и целесообразность применения. Результаты работы могут быть использованы в машиностроении при упрочнении длинномерного инструмента из быстрорежущей стали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гончаров В.С.** Апробация ионно-плазменных слоистых композиционных покрытий с особыми свойствами // Сб. материалов Всерос. науч.-техн. конф. "Современные проблемы повышения эффективности сварочного производства". Тольятти. 2011. С. 357–369.

2. **Гончаров В.С., Гончаров М.В.** Технология реновации и упрочнения поверхности длинномерных протяжек // Сб. статей 6-й Междунар. науч.-техн. конф. "Инженерия поверхности и реновация изделий". Киев. 2006. С. 49–52.

3. **Протяжки.** [Электронный ресурс] URL: http://www.russnab.ru/books/4Reguchiy_instrument.pdf.

4. **Гончаров В.С., Гончаров С.С., Бабенко Н.Г.** Разработка физической модели износостойкого комплекса режущего инструмента // Сб. тр. первой междунар. науч.-практ. конф. "Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности". СПб. 2005. С. 249–254.

5. **Конструкционные** материалы: справочник / Под ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.

6. **Химическая** энциклопедия в 5 т. М.: Советская энциклопедия, 1992.

7. **Патент 2296813 РФ.**: МПК7 C23C28/00 , C23C14/48. Способ упрочнения инструмента / В.С. Гончаров, А.В. Солопов, М.В. Гончаров. заявитель и патентообладатель Тольяттинский гос. ун-т. № 2004121521/02; заявл. 13.07.04 ; опубл. 10.04.07. Бюл. № 7.

УДК 621.19

Ю.Г. Гуревич, В.Е. Овсянников, В.А. Фролов *(Курганский государственный университет)*
E-mail: yqq@rambler.ru

Поверхностное упрочнение ферритно-перлитного серого чугуна взаимодействием с оксидом молибдена

Разработана технология поверхностного упрочнения деталей из ферритно-перлитного серого чугуна путем предварительного окисления его основы оксидом молибдена и последующей закалкой. Твердость после закалки соизмерима с твердостью после закалки ковкого чугуна.

Ключевые слова: *серый чугун, поверхностное упрочнение, окисление поверхности, оксид молибдена, закалка, отпуск.*

The technology of superficial hardening of details from ferrito-perlitny gray cast iron by a way of preliminary oxidation of its basis oxide of molybdenum and the subsequent training is developed. Hardness after training is commensurable with hardness after training of malleable cast iron.

Keywords: *gray cast iron, superficial hardening, surface oxidation, molybdenum oxide, training.*

Введение

Поверхностную закалку чугуна характеризуют быстрый нагрев и кратковременная выдержка при температуре аустенизации. При этом закаливаемость наиболее сильно зависит от однородности исходной структуры чугуна, поскольку за несколько секунд нагрева под закалку не успевает произойти гомогенизация аустенита. Наличие в структуре серого чугуна феррита резко ухудшает закаливаемость [1]. Структура чугуна после закалки перлитная, поэтому поверхностная закалка ферритного и ферритно-перлитного серого чугуна практически не применяется [2].

Диффузионное хромирование традиционными методами с целью упрочнения поверхности деталей из серого чугуна также практически не применяется, поскольку при этом упрочненный слой получается не более 10...20 мкм [3].

Цель работы – разработка технологии простого и надежного метода поверхностной закалки деталей из ферритно-перлитного серого чугуна.

Материалы и методы исследования

В качестве образца была взята цилиндрическая деталь с внешним диаметром 50 мм, внутренним 30 мм и поперечным сечением 15×10 мм^2 из ферритно-перлитного серого чугуна СЧ20 состава, % мас.: 3,4 C; 2,2 Si; 0,8 Mn; ≤ 0,2 P; ≤ 0,15 S. Твердость чугуна – 131 HB (ГОСТ 1412–85). Исходная структура – 90 % феррита и 10 % перлита, основа с равномерно распределенным пластинчатым графитом завихренной формы. Площадь, занятая графитом, составляла 8...12 % (рис. 1).

Перед закалкой поверхность детали окисляли оксидом молибдена Mo_2O_3, который хорошо реагирует с основой чугуна, окисляя углерод.

Нагрев детали под обработку осуществляли в открытом контейнере в контакте с порошком оксида молибдена. Сродство молибдена к кислороду больше, чем у углерода, поэтому, в случае диссоциации, он должен окислять углерод, образуя газ CO [4].

Деталь нагревали до температур 1273, 1373 K, делали выдержку 4, 8 ч и закаливали. После закалки детали подвергали низкому отпуску. Температура отпуска 273...473 K, выдержка при этих температурах – 1 ч на каждые 25 мм стенки [2].

Структуру поверхностного упрочненного слоя образцов исследовали на микроскопах "Neophot-21" и "МИМ-8", для определения микротвердости структурных составляющих использовали прибор ПМТ-3 при нагрузке 0,490...0,980 Н. Травление образцов производили 3%-ным раствором HCl в спирте.

Результаты оценивали следующим образом:

– измеряли толщину окисленного слоя с одинаковой микроструктурой;

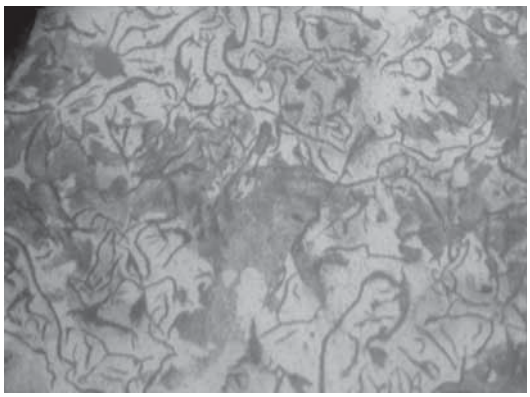


Рис. 1. Исходная микроструктура чугуна СЧ20, ×200

– на нетравленых шлифах в зонах образца с разными микроструктурами оценивали форму, размер, распределение и количество графита;

– определяли твердость детали после упрочнения (HRC) и микротвердость ($HV_{0,980}$, ГПа) упрочненного слоя до и после закалки.

Делали три замера микротвердости ($HV_{0,98}$, ГПа) по поверхности окисленной зоны (начало, середина и конец), среднее из трех замеров наносилось на график).

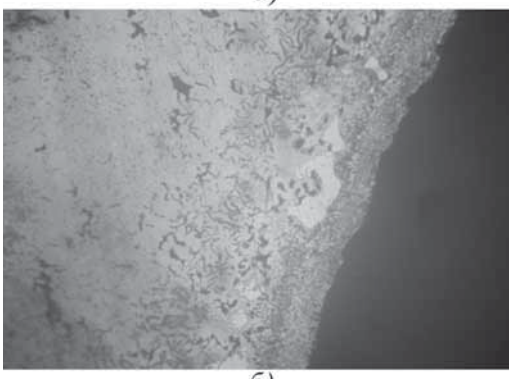
Результаты исследования и их обсуждение

Окисленная оксидом молибдена зона достаточно однородна, никаких дефектов не наблюдается, граница между структурой чугуна и окисленного слоя четкая, зона термического влияния не образуется (рис. 2, *а*). В окисленной зоне после закалки наблюдается структура мартенсита (рис. 2, *б*), в то время как основа чугуна закалилась на сорбит (рис. 3).

В закаленном на мартенсит поверхностном слое чугуна после закалки и отпуска при большом увеличении наблюдали мелкие шаровидные включения графита.

На поверхности детали был ярко выраженный ферритный кант толщиной 0,6...0,8 мм. Микротвердость закаленной поверхности в середине диффузионного слоя и на границе с чугуном после закалки и отпуска составляла $H_{0,98}$ = 5,19; 4,37; 3,76 ГПа (средняя по трем измерениям).

а)



б)

Рис. 2. Окисленный Mo_2O_3 слой:
а – до закалки; *б* – после закалки, ×200

Рис. 3. Микроструктура основы чугуна после закалки, ×300

Необходимо подчеркнуть, что только в результате диссоциации оксида молибдена и последующей диффузии кислорода вглубь поверхности основы чугуна окисление достигается на глубину 2 мм и более. Это можно объяснить тем, что скорость диффузии углерода к поверхности детали, где идет процесс окисления углерода, происходит значительно быстрее, чем диффузия молибдена вглубь чугуна.

Механизм процесса взаимодействия оксида молибдена с основой чугуна при окислении и последующей закалки состоит из следующих стадий:

– окисление элементов основы и растворение молибдена в ферритной основе чугуна;

– превращение ферритно-перлитной основы чугуна в аустенит;

– диффузия кислорода и молибдена в аустенит через ферритную кайму;

– диффузия углерода в аустените к поверхности детали, где происходит окисление;

– образование карбида молибдена и окисление углерода в аустените (феррите);

– диффузия графита в аустенит;

– превращение аустенита в мартенсит.

Диффузионная подвижность атомов молибдена соизмерима с подвижностью атомов растворителя. Однако при диффузионном легировании молибденом чугуна традиционными методами в поверхностном слое образуется слой карбидов, который препятствует диффузии молибдена вглубь чугуна.

Диффузия кислорода происходит быстрее, чем молибдена, и поэтому кислород, окисляя углерод, обеспечивает диффузию молибдена на большую глубину.

Твердость окисленного слоя ферритно-перлитного серого чугуна после закалки и отпуска 50...60 HRC, а после закалки и отпуска деталей из ковкого чугуна – 56...62 HRC [5].

Выводы

1. Разработана простая технология поверхностного упрочнения деталей из ферритно-перлитного серого чугуна путем предварительного окисления его основы оксидом молибдена и последующей поверхностной закалки.

2. Толщина упрочненного после закалки с предварительным окислением Mo_2O_3 слоя значительно больше, чем после диффузионного хромирования традиционными методами.

3. Твердость закаленного, предварительно окисленного Mo_2O_3, ферритно-перлитного серого чугуна соизмерима с твердостью закаленного ковкого чугуна.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Шерман А.Д., Жуков А.А., Абдуллаев И.О. и др.** Чугун: справочник. М.: Металлургия, 1991. 575 с.

2. **Лахтин Ю.М.** Металловедение и термическая обработка. М.: Металлургия, 1993. 449 с.

3. **Дубинин Г.Н., Аврамов Ю.С.** Авиационное материаловедение. М.: Машиностроение, 1988. 320 с.

4. **Попов П.И., Сизов И.Г.** Влияние легирующих элементов на структуру и свойства чугуна с вермикулярным графитом // МиТОМ. 2006. № 6. С. 41–43.

5. **Zupp R.R., Stevenson.** The Influence of Vanadium of the Activity of on Coefficient of Carbon in the Fe–C–V System at 100 °C; Correlation of the Activity Coefficient of Carbon in Iron – Base Systems // Trans. Metall. Soc. AIME 1986. V. 236. № 9. P. 1316–1323.

УДК 621.793

Ю.В. Лахоткин, В.П. Кузьмин, В.В. Душик, Т.В. Рыбкина
(Институт физической химии и электрохимии им. А.Н. Фрумкина РАН, г. Москва)
E-mail: lakhotkin@ipe.rssi.ru

Новый низкотемпературный метод нанесения твердых наноструктурированных покрытий на изделия сложной формы

Представлен новый низкотемпературный метод формирования износо-, эрозионно- и коррозионно-стойких покрытий на основе карбидов вольфрама химическим осаждением из газовой фазы. Метод позволяет осаждать безпористые, трещиностойкие, наноструктурированные покрытия с заданной микротвердостью в интервале 11...40 ГПа, заданной толщины в пределах 15...100 мкм на узлах трения любой сложной формы.

Ключевые слова: *химическое газофазное осаждение (CVD), особотвердое покрытие, карбид вольфрама.*

New low-temperature method of wear-, erosion- and corrosion-resistant coatings based on tungsten carbides CVD is presented in the article. The method allows to deposit pore free, crack-resistant nanostructural coatings with controlled microhardness within 11...40 GPa, with controlled thickness within 15...100 μm on friction units of complex shape.

Keywords: *chemical vapor deposition (CVD), superhard coating, tungsten carbide.*

Введение

Развитие машиностроения в XXI веке определяется инновационными технологиями формирования твердых покрытий, в частности на поверхности узлов трения. Это направление определяет новую область науки о материалах – "инженерию" поверхности. Среди основных методов упрочнения металлических поверхностей в настоящее время выделяются два: детонационный метод (D-GUN) и высокоскоростное напыление (HVOF) [1, 2]. Другие способы менее перспективны. Так, диффузионные покрытия, хотя и способны упрочнять изделия сложной формы, но они не являются достаточно твердыми для эксплуатации в абразивной среде. В мировой практике развиты в основном азотирование или цементация в ее современном варианте – с применением плазмы тлеющего разряда. Диффузионные процессы синтеза твердых соединений в приповерхностном слое изделия обычно протекают при очень высокой температуре [3], что требует последующей закалки и механической доводки геометрии изделия.

Процессы нанесения твердого хрома ограничены из-за токсичности электролитов [4], а современные

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант 12-08-00529).

процессы *физического газового осаждения* (PVD) могут обеспечить нанесение исключительно тонких (несколько микрон) твердых слоев, которые используются в основном для повышения работоспособности режущих инструментов по металлу [5]. Другие PVD-покрытия, например ионно-плазменные, магнетронные, вакуумно-дуговые, а также имплантация и лазерные технологии применяются для упрочнения изделий весьма ограниченно.

Специфика твердых покрытий на изделиях сложной формы определяется несколькими факторами. Технология их нанесения должна обеспечить нанесение покрытия одинаковой толщины на рабочей поверхности этих изделий, причем толщина покрытия должна быть заданной и контролируемой, а морфология покрытия должна быть гладкой, чтобы ее можно было легко довести до нужной чистоты. Это означает, что твердое покрытие должно быть заданной толщины на всей рабочей части изделия, включая полости сложной формы и внутренние каналы, с припуском на обработку не более 1 мкм. Микронеровность слоя после осаждения не должна превышать 0,8 мкм, чтобы для получения необходимой чистоты требовались только полировка или хонингование без дорогостоящей шлифовки. Толщина покрытия должна укладываться в допуск, характерный для пар трения. Обычно он измеряется величиной 20...170 мкм.

Только диффузионные и гальванические покрытия удовлетворяют этим требованиям, но они не обладают необходимой твердостью. Наши экспериментальные данные свидетельствуют о том, что хорошая износостойкость будет наблюдаться только у твердых слоев с нижним пределом микротвердости 12 ГПа, который равен твердости песка (основного компонента загрязнений).

Промышленные покрытия по технологиям D-GUN и HVOF имеют твердость около 10...12 ГПа (не выше 13,5 ГПа), но их невозможно нанести на изделия с затененными участками, например на внутреннюю поверхность цилиндра небольшого размера. Это сильно ограничивает конструкцию узлов трения. Обычно толщина этих покрытий 120...1000 мкм с шероховатостью слоя после осаждения более 5...30 мкм. Поэтому узлы трения с указанными покрытиями необходимо шлифовать, чтобы добиться нужного размера, а затем – полировать для придания рабочей поверхности необходимой чистоты.

Все рассмотренные выше покрытия являются в разной степени пористыми, а значит, не стойкими в коррозионном отношении. Твердый хром и диффузионные покрытия имеют микротрещины, а при использовании газотермических технологий (D-GUN и HVOF) нижний предел пористости в слоях достигает 0,6...0,8 %.

Методы химического газофазного осаждения, которые позволяют наносить покрытия на изделия сложной формы, основаны на разложении металлоорганических соединений [6] и на восстановлении летучих галогенидов водородом в среде функционального газа, содержащего азот и/или углерод [7]. Первые почти не пригодны для трибологических применений из-за низкого уровня физико-механических свойств и недостаточной адгезии к конструкционным материалам. Осаждение твердых покрытий из смеси галогенидов с углерод (азот)-содержащих газов с водородом протекает при температуре выше 750 °С, что негативно отражается на механических свойствах подложки.

Таким образом, в мировой практике нет технологии нанесения твердых покрытий на узлы трения, удовлетворяющих всем вышеописанным требованиям.

CVD-синтез покрытий на основе карбидов вольфрама

В работе представлен новый низкотемпературный метод осаждения покрытий на основе карбидов вольфрама из газовой фазы. Метод основан на протекании гомо-гетерогенных химических реакций из газообразной смеси гексафторида вольфрама, пропана и водорода на нагретой до 370...500 °С поверхности изделия при давлении 1...10 кПа [8, 9]. Достоинством метода является то, что из этой смеси реагентов можно синтезировать все возможные W–C-композиции: индивидуальные карбиды WC, $WC_{(1-x)}$, W_2C, W_3C, их смеси между собой и смеси карбидов с металлическим вольфрамом, изменяя лишь соотношение реагентов, температуру подложки и общее давление.

На рис. 1 представлена фазовая диаграмма W–C-фаз, полученная в зависимости от соотношения пропана и водорода в газовой смеси как основного параметра, определяющего стехиометрический состав карбида. Нами были изучены и другие макрокинетические закономерности синтеза карбидных фаз [10]. Например, скорость роста карбидов при прочих равных условиях возрастает в следующем ряду: WC, W_2C, W_3C. В типичных условиях с минимальной скоростью, равной 8 мкм/ч, формируется монокарбид вольфрама, а максимальная скорость роста, равная 15 мкм/ч, наблюдается при синтезе субкарбида вольфрама. Синтез карбидов вольфрама осуществляется в результате протекания цепи гетерогенных и гомо-гетерогенных реакций, где ключевую роль играет образование димерных комплексов из низших фторидов вольфрама [11]. Последние взаимодействуют с фторуглеродными радика-

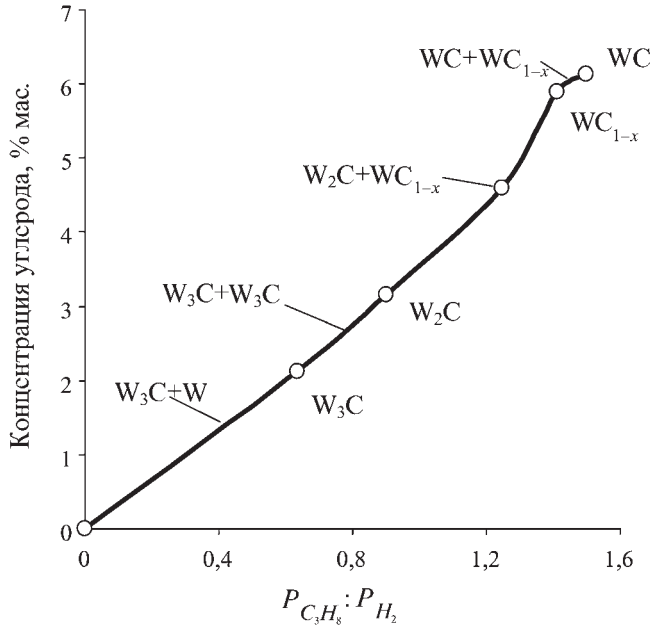


Рис. 1. Состав карбидных фаз в зависимости от соотношения пропана и водорода в газовой смеси

лами из газовой фазы, и происходит синтез карбида на стадии кристаллизации [8]. Важно подчеркнуть, что рост карбида происходит путем атомарного процесса, т.е. нанотехнологической сборки "снизу–вверх". Этот вариант нанотехнологической сборки является одним из самых перспективных в создании наноматериалов и нанопокрытий.

Как видно из рис. 1, фторидный метод синтеза карбидов вольфрама позволяет целенаправленно проводить синтез следующих типов твердых покрытий с различной структурной иерархией без замены реагентов:

1. Особотвердые индивидуальные карбиды и их смеси между собой (1-й тип).

2. Многослойные покрытия, составленные из чередующихся слоев карбида и металлического вольфрама (2-й тип).

3. Нанокомпозитные покрытия, состоящие из смеси металлического вольфрама с карбидными включениями (3-й тип).

Данным методом можно синтезировать около 12 карбидовольфрамовых композиций с различными механическими свойствами. Необходимо отметить, что субкарбид вольфрама W_3C является метастабильным соединением, который образуется только при низкотемпературном синтезе. При температуре отжига выше 650 °С он распадается на устойчивые фазы W и W_2C.

Характеристики карбидовольфрамовых покрытий

Основные характеристики покрытий конструкционного назначения следующие: микротвердость, максимальная толщина, вязкость (трещиностойкость), адгезия к подложке (главным образом к стали), пористость, сопротивление к абразивному износу, эрозии и коррозии. Микротвердость определяется фазовыми, структурными факторами и внутренними напряжениями в покрытии. Рентгенографическим методом Дебая–Шеррера установлено, что покрытия из карбидов вольфрама являются наноструктурными материалами. Например, размер кристаллитов (области когерентного рассеяния) субкарбида составляет величину около 20 нм, полукарбида – 16...20 нм, гексагонального монокарбида – 4...5 нм и кубического монокарбида вольфрама – 2...3 нм. Более полные сведения об индивидуальных карбидах представлены в таблице.

На рис. 2, *а* представлены данные по микротвердости покрытий из карбидов вольфрама, полученных при нагрузке 0,98 Н на приборе ПМТ-3. С помощью данного газофазного метода можно получать карбидные покрытия с микротвердостью 29...40 ГПа. Индивидуальные карбиды относятся к классу особотвердых материалов, а кубический монокарбид $WC_{(1-x)}$ является уникальным соединением и сравним с карбидом бора по твердости. Повышенные механические свойства этого монокарбида можно отнести за счет наноструктуры, так как зерна диаметром менее 10 нм не могут содержать дислокаций [10]. Высокая микротвердость карбидных слоев отражается на их износостойкости. Методика определения абразивной износостойкости карбидовольфрамовых покрытий представлена в [11].

Данные по абразивной износостойкости полукарбида вольфрама, приведенные на рис. 3, показывают, что абразивная стойкость карбидного покрытия в 2 раза выше, чем у твердого сплава ВК-6. При этом в присутствии смазки абразивная стойкость покрытия

Свойства карбидных осадков

Тип карбида	Тип решетки	Размер ОКР, нм	Микротвердость, ГПа	Максимальная толщина, мкм
WC	гекс.	4...5	21...24	10
$WC_{(1-x)}$	куб.	2...3	38...40	12
W_2C	гекс.	16...20	32...35	18
W_3C	куб.	≥ 20	29...31	25

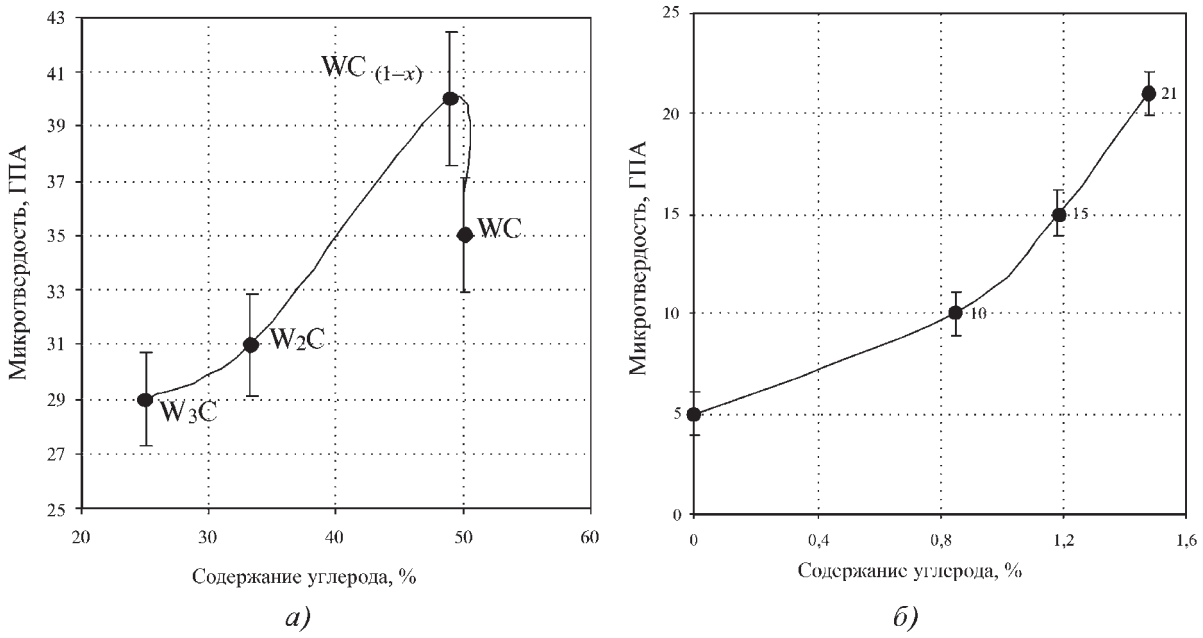


Рис. 2. Микротвердость слоев из карбидов вольфрама (*а*) и зависимость микротвердости нанокомпозитных слоев на основе вольфрама от содержания углерода в них (*б*)

увеличивается в 20 раз, а стойкость сплава ВК-6 – в 3 раза. Стойкость против абразивного износа в присутствии смазки у покрытия W_2C оказалась в 10 раз выше, чем у ВК-6 [11]. В условиях однонаправленного скольжения покрытие W_2C имеет существенно более низкий коэффициент кинетического трения, чем непокрытая сталь 45, причем в условиях граничного трения со смазкой коэффициент трения поверхностей, покрытых W_2C, почти на порядок ниже, чем у стали 45 [11]. Нами показано, что абразивная стойкость покрытия из полукарбида вольфрама в 10 раз выше, чем у инструментальной стали Р6М5.

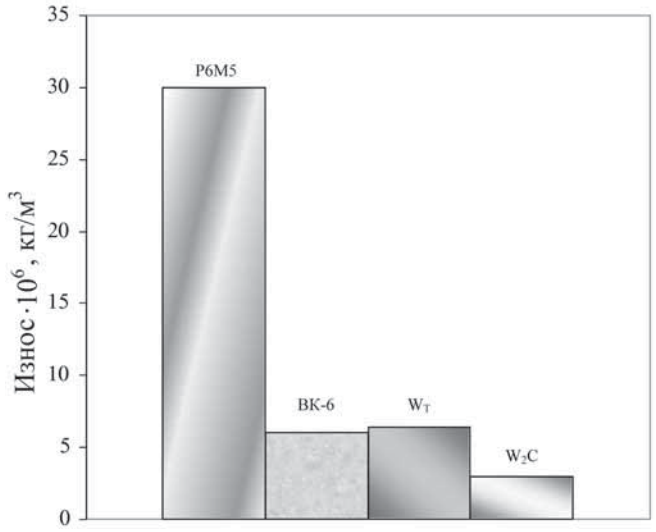


Рис. 3. Результаты испытаний на абразивный износ твердых материалов и покрытий: $W_т$ – CVD-твердый нанокомпозит на основе вольфрама $H_μ$ =17 ГПа; W_2C – CVD-карбид вольфрама $H_μ$ = 33 ГПа; Р6М5 – быстрорежущая сталь $H_μ$ = 8,5 ГПа; ВК-6 – твердый сплав $H_μ$ = 18 ГПа

Разброс данных по микротвердости определяется в основном различным уровнем внутренних напряжений роста в пленках. Эти ростовые напряжения и термические напряжения, связанные с разницей в коэффициентах термического расширения карбидной пленки и стальной подложки, являются ответственными за растрескивание приповерхностного слоя покрытия. Максимальная толщина покрытия, при которой не наблюдается растрескивание, представлена в таблице. Видно, что максимальная толщина карбидного слоя на углеродистой стали повышается с уменьшением содержания углерода в них, что коррелирует с разницей в *коэффициентах термического расширения* (КТР).

Главный недостаток твердых и сверхтвердых монолитных покрытий заключается в их природной хрупкости, и карбиды вольфрама не являются исключением. Из данных, представленных на рис. 2, можно сделать вывод о возможности осаждения разнообразных карбидовольфрамовых композиций, наделенных различными физико-механическими свойствами. Повышение вязкости карбидовольфрамовых композиций можно осуществить двумя способами: получение многослойных покрытий (карбид вольфрама–вольфрам) и одновременное осаждение вольфрама и карбида вольфрама.

Первый прием известен в практике PVD-технологий [5]. Тем не менее, применительно к CVD-процессам, формирование чередующихся карбид-вольфрамовых многослойных покрытий, такой метод неизвестен. Основное отличие многослойных покрытий, полученных PVD- и CVD-методами, состоит в том, что при физическом осаждении можно получать очень тонкие слои (около 5...10 нм), переключая различные мишени. Химическое газофазное осаждение протекает в реакционной смеси определенного состава, и быстро изменять состав этой газовой смеси не удается. В этой связи многослойные CVD-покрытия имеют значительную толщину (20...50 мкм), причем толщина каждого слоя не менее 2...5 мкм.

Специфика CVD-процессов заключается в получении достаточно толстых (30...50 мкм) многослойных покрытий конструкционного назначения, которые перспективны для повышения эрозионной и коррозионной стойкости материалов. Суммарная твердость при этом снижается до 14...25 ГПа. Под ней подразумевается средняя твердость, полученная при больших нагрузках, при которых в поле деформации попадали несколько слоев.

Покрытия третьего типа состоят из матрицы металлического вольфрама с карбидными включениями. Данный подход, основанный на совместном осаждении металлических и карбидных кластеров, представляет собой новое направление в "инженерии поверхности". Карбидные частицы имеют размер 2...5 нм (рис. 4) и обладают практически теоретической прочностью. Путем регулирования размера карбидных частиц и субзерен вольфрама можно плавно изменять микротвердость в диапазоне 11...21 ГПа (см. рис. 2, *б*). Испытания показали, что абразивная стойкость нанокомпозитного покрытия с микротвердостью 17 ГПа не хуже стойкости твердого сплава ВК-6 и в 5 раз выше, чем у инструментальной стали Р6М5 (см. рис. 3). Эти нанокомпозитные покрытия имеют исключительную важность, так как максимальная толщина покрытия (до 100 мкм) достаточна для обеспечения допуска в узле трения изделий точного машиностроения и обладает при этом высокой управляемой трещиностойкостью.

Адгезия является ключевой характеристикой любого покрытия. Она зависит от термических и физико-химических процессов, протекающих на поверхности подложки при зарождении твердой фазы. Термический фактор при синтезе карбидов вольфрама не играет заметной роли ввиду низкой температуры процесса (500 °С). Механизм химических процессов на поверхности достаточно сложный и не выяснен до конца. В работе [9] представлен термодинамический подход к установлению прочных химических связей, отвечающих за адгезию слоев. Наши эксперименты

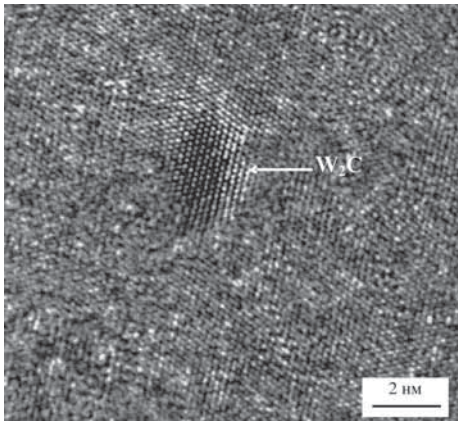


Рис. 4. Изображение слоев твердого нанокомпозита на основе вольфрама, полученное методом просвечивающей микроскопии высокого разрешения. Размер карбидных включений 2...5 нм. Размер металлической фазы 30...60 нм [7]

показали, что прочность адгезии W–C-покрытий на отрыв от большинства металлических подложек превышает величину 150 МПа, а сцепление с некоторыми сплавами превышает 0,5 ГПа.

Специфика фторидного низкотемпературного процесса заключается в создании многокомпонентного адсорбционного слоя фторидов в различных степенях окисления при синтезе и росте карбидной пленки. Этот хемосорбционный слой является ответственным не только за прочную адгезию карбидной фазы на металлической подложке, но и за регулярный атомарный рост. Согласно теории кристаллизации, развитой для химического осаждения из газовой фазы с участием химически активных реагентов [9], зарождение и последующий рост пленки происходит на активных центрах кристаллизации, которые рождаются при взаимодействии хемосорбированного галогенидного слоя с растущим кристаллом.

Высокие энергии связи фторидов способствуют образованию подвижных адсорбционных комплексов, обеспечивающих диффузионный подвод "строительного материала" как через газовую фазу, так и по поверхности. Пористость растущего слоя будет стремиться к нулю, что и наблюдается на практике. Беспористые пленки из карбидов вольфрама являются непроницаемыми для химических растворов и исключают коррозию основы сквозь покрытие. CVD-карбиды вольфрама коррозионно устойчивы в растворах неорганических кислот и сероводорода в широком диапазоне их концентраций. В качестве примера на рис. 5 представлены данные по скорости коррозии карбидного покрытия в 1Н растворе H_2SO_4 при комнатной температуре [8]. Видно, что W–C-покрытия значительно более стойки в серной

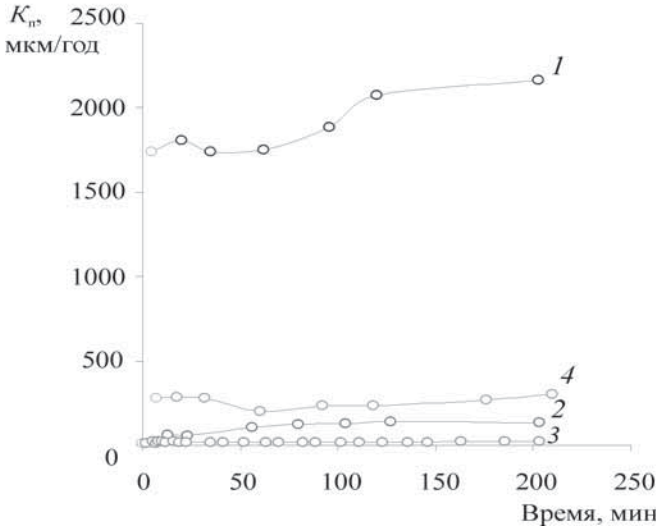


Рис. 5. Зависимость скорости коррозии от времени в 1Н серной кислоте при 20 °С следующих материалов:
1 – сталь 45; *2* – сталь 45 с никелевым покрытием (5 мкм); *3* – сталь 45 с карбидо-вольфрамовым покрытием (30 мкм); *4* – никелевая фольга

кислоте по сравнению с перечисленными ниже материалами.

Применение

Среди твердых веществ уникальными являются только два материала: алмаз и карбид вольфрама. Карбид вольфрама содержит самый тугоплавкий металл (вольфрам) и неметалл (углерод), что свидетельствует о максимальной силе межатомной связи между ними и вследствие этого – об экстремальных физико-механических свойствах. Твердые сплавы состоят в основном из монокарбида вольфрама. Все попытки ученых, длящиеся около столетия, для замены этого дорогостоящего соединения на более дешевый карбид титана не увенчались успехом. Изготовить узлы трения, которые обычно бывают сложной формы, из твердого сплава очень дорого. Поэтому целесообразно использовать карбид вольфрама в виде покрытий на дешевой стальной подложке вместо массивного твердого сплава. К тому же твердый сплав в тонких сечениях очень хрупок.

Карбидовольфрамовые композиции, полученные по фторидной технологии, занимают свою нишу на рынке покрытий (рис. 6) в области толщин 10...100 мкм и являются уникальными с точки зрения упрочнения практически любых материалов, начиная от углеродистых, инструментальных, коррозионно-стойких сталей, титановых сплавов и кончая твердым сплавом. Использование термического CVD-метода дает возможность покрывать твердым слоем детали сложной геометрии, недоступной для нанесения PVD-способом или методом распыления в плазме карбидных порошков со связкой. Наиболее перспективные области применений перечислены ниже.

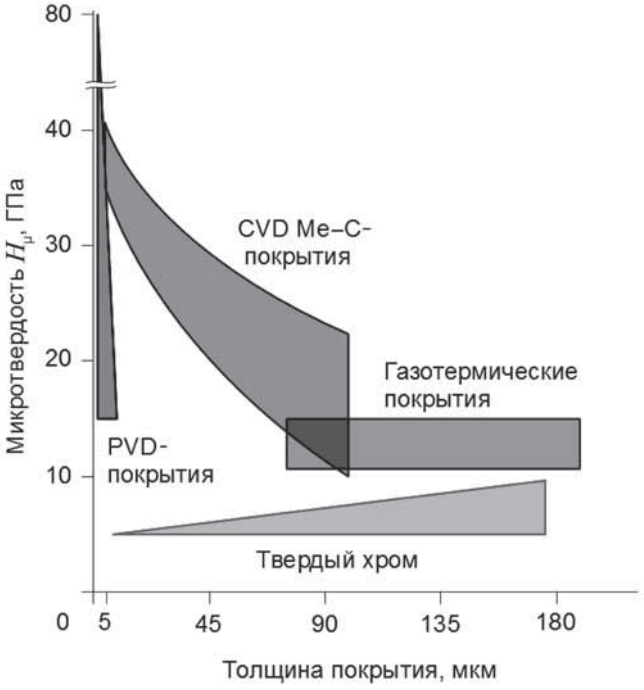


Рис. 6. Область использования твердых конструкционных покрытий

В *первую* очередь можно отметить упрочнение нефтегазового и бурового оборудования (насосы, узлы трения и эрозии). Проблемы, связанные с сероводородной коррозией, износом двигающихся узлов и эрозией неподвижных частей буровых долот, шарошек и исполнительных механизмов, работающих под землей, приобретают особое значение в связи с высокой стоимостью их замены. W–C-покрытия перспективны для применения в турбобурах, системах направленного бурения и др. Карбидные покрытия можно наносить внутрь цилиндров и на наружные поверхности деталей центробежных и поршневых нефтяных насосов. В центробежных насосах, например, слабым узлом является пара трения на вращающемся валу.

Как известно, твердый сплав или самосвязанный карбид кремния, которые применяются в этих изделиях, чрезвычайно хрупки, особенно в тонких сечениях, а W–C-покрытия успешно решают эту проблему. Конструкция вращающихся дисков центробежных наносов также требует упрочнения, так как здесь необходимо выдерживать размер щели (часто сложной формы) в условиях гидроабразивного износа.

Многие узлы в нефтегазодобывающем оборудовании, например опорные подшипники, направляющие поток буровой жидкости вкладыши и др., требуют упрочнения рабочих поверхностей. Например, фильтры в нефтяных скважинах сейчас изготавливаются из твердого сплава. Однако стальные фильтры, покрытые W–C-покрытиями, более устойчивы к ударным нагрузкам и, естественно, более дешевы. Эффект от применения карбидных покрытий в изделиях буровой и нефтегазовой техники достаточно велик. Изделия можно эксплуатировать в 4...12 раз дольше, а в особо экстремальных условиях изделия совершенно не работают без карбидных покрытий.

Другое применение в этой области – это нанесение покрытий на металл-металлические уплотнения запорной и регулирующей арматуры высокого и сверхвысокого давления и повышенной температуры. Главным требованием к изделиям, работающим при высоком давлении, является беспористость приповерхностного слоя и хорошее качество полировки. На сегодняшний день покрытий, удовлетворяющих этим требованиям, кроме предлагаемых W–C-покрытий, нет.

Важной особенностью карбидных покрытий является доступность качественной полировки поверхности вследствие гладкой исходной морфологии покрытия. Кроме интенсивной коррозии, абразивного и эрозионного износа рабочие поверхности шаровых кранов, задвижек подвергаются "схватыванию" под высоким давлением и (или) повышенной температуре, которое предотвращается W–C-покрытиями. Большой интерес представляют также регулировочные краны, которые применяются для мониторинга нефтяных скважин.

Перечисленные выше примеры относятся не только к нефтегазовому, но и к химическому производству. W–C-покрытия перспективны для работы в контакте не только с нефтью при высоком содержании сероводорода, но и в кислотах, расплавленных металлах, а также в химически агрессивных газах и т.д. Указанные покрытия с успехом могут заменить твердый хром и газотермические покрытия благодаря более высокой износо- и коррозионной стойкости.

Перспективно использовать износо- и эрозионностойкие покрытия на деталях горно-добывающего оборудования (экскаваторы, транспортеры, водоструйные аппараты и т.д.), которые используются в труднодоступных участках или очень агрессивных условиях. Например, срок службы подшипников скольжения с W–C-покрытием повышается в 50 раз по сравнению с низколегированной сталью.

Приведенные выше примеры показывают многообразие использования покрытий из карбидов вольфрама в машиностроении, химической, нефтегазовой промышленности и металлургии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Davis J.R.** Handbook of Thermal Spray Technology. ASM International. 2004. P. 41–99.
2. **Бартеньев С.С., Федько Ю.Р., Григорьев А.И.** Детонационные покрытия в машиностроении. Л.: Машиностроение, 1982. С. 45–86.
3. **Материаловедение**: уч. для вузов / Б.Н. Арзамазов, В.И. Макарова, Г.Г. Мухин и др. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. С. 196–206.
4. **Сайфулин Р.С.** Композиционные покрытия и материалы. М.: Химия, 1977. С. 119–146.
5. **Хокинг М., Васантасри В., Сидки П.** Металлические и керамические покрытия. М.: Мир, 2000. С. 48–95.
6. **Сыркин В.Г.** CVD-метод. Химическая парофазная металлизация. М.: Наука, 2000. С. 17–26.
7. **Lakhotkin Yu.V., KuzminV.P.** Tungsten carbide coatings and method for production the same. Patent PCT/RU/99/00037, filed 11.02.1999, published WO 00/47796 (17.08.2000 Gazette 2000/33).
8. **Душик В.В.** Формирование наноструктурированных карбидовольфрамовых слоев, стойких к коррозионному воздействию. Автореферат дис. ... канд. хим. наук. М.: ИФХЭ РАН, 2012. 24 с.
9. **Лахоткин Ю.В.** Физико-химические основы осаждения сплавов вольфрама с переходными металлами V–VII групп из парогазовой смеси их фторидов с водородом. Дис. ... д-ра хим. наук: М. 1995. С. 161–191.
10. **Головин Ю.И.** Наноиндентирование и его возможности. М.: Машиностроение, 2009. С. 123–124.
11. **Лахоткин Ю.В., Топоров Ю.П., Кузьмин В.П. и др.** Исследование трибологических свойств W_2C слоев, полученных газофазным химическим осаждением // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2011. № 2. С. 23–28.
12. **Патент 2402625 РФ.** Легированный вольфрам, полученный химическим осаждением из газовой фазы / С.А. Александров, Ю.Н. Жук, Ю.В. Лахоткин. Опубл. 27.10.2010. Бюл. № 30.

УДК 621.793.79

А.В. Собачкин, А.А. Попова, И.В. Назаров *(Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова, г. Барнаул)*
E-mail: anicpt@rambler.ru

Структура и свойства газодетонационных покрытий различного функционального назначения на основе порошков слоистых механокомпозитов с металлической и интерметаллидной матрицей[1]

Работа посвящена исследованию морфологии и свойств коррозионно-стойких, износостойких и биосовместимых покрытий, полученных по технологии газодетонационного напыления. В качестве материалов для напыления применялись механоактивированные порошковые композиты. Определены наиболее рациональные режимы напыления покрытий, исследованы макро- и микроструктура, топография поверхности, а также свойства покрытий (микротвердость, износостойкость, биосовместимость), проведен энергодисперсионный анализ исходного материала и газодетонационного покрытия.

Ключевые слова: *композиционный слоистый материал, механоактивационная обработка, газодетонационное напыление, самораспространяющийся высокотемпературный синтез, коррозионно-стойкие покрытия, износостойкие покрытия, биосовместимые покрытия.*

This paper is devoted to the study of the morphology and properties of corrosion-resistant, wear resistant and biocompatible coatings obtained by gas-detonation spraying technology. As the materials for spraying were used mechanically activated powders. Determine the most rational modes of spraying, general and fine structure, surface topography, as well as the properties of coatings (microhardness, wear resistance, biocompatibility), carried out energy dispersive analysis of original material and gas-detonation coatings.

Keywords: *composite laminated material, the mechanical activation treatment, gas-detonation spraying, self-propagating high temperature synthesis, corrosion-resistant coatings, wear-resistant coatings, biocompatible coatings.*

Введение

Развитие науки и техники должно быть в большой мере подчинено решению экономических и социальных задач общества, необходимости создания принципиально новых видов техники и обеспечению широкого внедрения новых прогрессивных технологий, повышению эффективности использования ресурсов и снижению энерго- и материалоемкости производства. В современных условиях особое значение приобретают проблемы надежности и долговечности машин и механизмов, экономного использования материалов, энергии и трудовых ресурсов, а также экологические проблемы.

Поверхностный слой детали в условиях эксплуатации подвергается наиболее сильному механическому, тепловому, магнитно-электрическому, световому и другим воздействиям. Потеря деталью своего служебного назначения и ее разрушение, в большинстве случаев, начинаются с поверхностного слоя, например возникновение и развитие усталостной трещины, коррозия, эрозия, износ и др. [1]. Кроме этого, зачастую поверхность изделия должна отвечать не только требованиям защиты детали от какого-либо воздействия, но и обладать рядом специфических характеристик, например, для использования изделий в медицинской практике.

Поэтому интенсификация рабочих процессов в различных видах узлов и агрегатов, а также расширение области использования того или иного изделия требуют от материалов сочетания свойств, в ряде случаев исключающих друг друга. В этом случае целесообразно использовать принципиально новый подход к выбору материалов уже на стадии проектирования: основу детали изготавливать из одного материала, который обеспечит прочность и заданные параметры конструкции, а на поверхности, которые должны обладать специальными свойствами, наносить тонкие слои других материалов, придавая поверхностным слоям необходимые свойства.

В связи с этим в промышленности находят все более широкое применение и имеют большие перспективы методы газотермического нанесения покрытий с последующей финишной обработкой нанесенного слоя либо без такой обработки. Известные в литературе [2] сведения о газотермических способах нанесе-

[1] Работа выполнена в рамках реализации ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. (Гос. контракт № 02.740.11.0828).

ния покрытий свидетельствуют о том, что, в силу специфических свойств наносимых покрытий и условий эксплуатации восстанавливаемых деталей каждый из них находит свое применение в области создания покрытий.

Среди способов газотермического напыления покрытий, предназначенных для работы в наиболее тяжелых условиях при действии экстремальных нагрузок и температур, наиболее перспективным является газодетонационный. Этот метод нанесения покрытий позволяет получать покрытия при меньшем нагреве напыляемой детали, что позволяет избежать деформации последней в процессе напыления, а также исключить неблагоприятные явления, сопутствующие процессу при нагреве детали, такие как насыщение поверхности изделия газами. Физико-механические и эксплуатационные свойства газодетонационных покрытий существенно превышают аналогичные показатели покрытий, полученных другими газотермическими методами. Кроме того, для газодетонационного напыления используется более простое оборудование по сравнению с плазменными или плазменно-вакуумными способами нанесения покрытий.

Низкая газопроницаемость, высокая износо-, коррозионно- и жаростойкость покрытий, возможность получения диэлектрических покрытий, работающих при высоких температурах, покрытий, используемых в качестве твердой смазки, а также покрытий для восстановления изношенных деталей являются характерными для газодетонационного напыления. Относительно новым направлением применения газодетонационного способа является область создания биосовместимых покрытий [3, 4]. Нет сомнения, что дальнейшая разработка, совершенствование и внедрение метода газодетонационного напыления сыграют важную роль при выполнении основной задачи материаловедения – создании материалов с заранее заданными свойствами.

На сегодняшний день одним из перспективных направлений достижения требуемых свойств покрытий является применение для газодетонационного напыления порошков в виде слоистых композитов с металлической или интерметаллидной матрицей (связкой). Использование композитов с подобной структурой позволяет снизить или устранить недостатки покрытий, нанесенных "чистыми" (т.е. без материала связки) порошковыми соединениями [5].

В связи с этим цель работы заключается в исследовании структуры и свойств покрытий различного функционального назначения, полученных газодетонационным способом из механоактивированных композиционных порошковых материалов с металлической и интерметаллидной матрицей.

Объекты и методы исследований

Нанесение покрытий осуществлялось на экспериментальной установке газодетонационного напыления "Катунь М". Она предназначена для нанесения покрытий из порошковых материалов на рабочие поверхности различных изделий с целью придания им качественно новых свойств. В качестве детонирующего состава используется смесь пропан-бутана и кислорода.

Напыление проводилось в трех режимах работы установки с последующим выбором наиболее рационального режима, параметры которого определялись путем визуально-измерительного контроля нанесенного покрытия. На образцах с покрытиями, полученными на наиболее рациональном режиме работы установки, проводились дальнейшие исследования.

В процессе работы были нанесены газодетонационным методом и исследованы следующие виды покрытий:

а) покрытия, предназначенные для защиты изделия от коррозии в особо агрессивных средах;

б) покрытия, предназначенные для обеспечения высокой износостойкости узлов и агрегатов;

в) биосовместимые покрытия для применения имплантатов в медицинских целях.

В качестве материала для получения газодетонационных покрытий использовались порошковые смеси, предназначенные для создания на поверхности изделия необходимых свойств. Порошки представляют собой композиты вида "матрица – частицы с особыми свойствами". Получение композита осуществлялось путем механоактивационной обработки в планетарной шаровой мельнице АГО-2С. Обоснование применения каждого из видов порошковой смеси дано ниже.

Перспективным направлением для создания коррозионно-стойких покрытий является применение минерального сырья. Например, в работе [6] для этого используется порошок базальта, однако недостатком таких покрытий является неравномерность и относительно невысокая микротвердость материала поверхностного слоя.

Для уменьшения указанных недостатков в работе в целях создания коррозионно-стойких газодетонационных покрытий применялась порошковая смесь базальт–никель-хромовая матрица.

Одним из эффективных способов достижения высокой износостойкости является введение в поверхностный слой изделия твердых сплавов, таких как тугоплавкие карбиды металлов. Износостойкость рабочей поверхности существенным образом зависит от типа и количества твердой фазы в полученном поверхностном слое. К примеру, путем больших усилий и энергозатрат металлургически удается ввести в из-

делие упрочняющую фазу в виде определенного содержания карбидов: Fe_3C; Mn_3C; Cr_7C_3; W_2C; WC; VC; TiC; B_4C, Mo_2C и т.д., а также карбоборидов, нитридов железа и легирующих элементов. Из всех широко применяемых для легирования тугоплавких карбидов металлов карбид титана обладает наиболее высокой температурой плавления, а также твердостью.

В связи с этим для нанесения износостойкого покрытия в работе использовалась порошковая смесь синтезированных в матрице карбидов титана, полученная по технологии механически активируемого *самораспространяющегося высокотемпературного синтеза* (СВС) [7, 8].

Костная система живого организма формируется и поддерживается в результате сложных биохимических реакций. В современной медицинской практике при потере или разрушении кости для ее замены применяют имплантаты. Применение имплантатов, когда физико-химические и механические свойства металлической основы и костной ткани существенно различаются, может приводить к активному отторжению имплантата. Для уменьшения отрицательного влияния этих факторов необходимо создать между костью и имплантатом переходную зону, которая может быть получена в виде покрытия. Предполагается, что элементный и фазовый составы покрытия должны максимально совпадать с составом натуральной кости и/или способствовать формированию костной ткани на своей поверхности. В качестве исходного материала для созданий биоактивных покрытий зачастую применяется порошок биологического гидроксиапатита кальция – $Ca_{10}(PO_4)_6(OH)_2$. Однако покрытия из данного материала обладают недостаточной прочностью сцепления с основой [3]. Поэтому в настоящей работе для создания газодетонационных покрытий использовалась смесь гидроксиапатит – титан-никелевая матрица.

Общая методика исследования порошковой смеси и напыленного покрытия была следующей: проведение *растровой электронной микроскопии* (РЭМ) с энергодисперсионным анализом порошка, изучение общей структуры покрытия, проведение РЭМ с энергодисперсионным анализом напыленного покрытия, определение топографии поверхности покрытия, изучение микротвердости газодетонационных покрытий, проведение специфических исследований покрытий (износостойкости, биосовместимости).

Для определения размеров частиц различных порошковых смесей и установления микроструктуры газодетонационных покрытий использовался растровый электронный микроскоп "EVO 50 XVP" фирмы Carl Zeiss с максимальным увеличением до 1 млн крат и разрешающей способностью 2 нм.

Спектральный анализ проводился на растровом электронном микроскопе "EVO 50" фирмы Carl Zeiss, снабженном микроанализатором "EDS X-Act" с Si-drift детектором фирмы Oxford Instruments. Прибор позволяет производить анализ элементов B–U. Разрешение по Mn $K\alpha$ = 133 эВ.

Исследование макроструктуры материалов осуществлялось на оптическом микроскопе "Axio Observer Z1m" фирмы Carl Zeiss. Прибор позволяет осуществлять работу в светлом и темном поле, работать в режиме дифракционно-интерференционного контраста. Диапазон увеличений составляет 25...1500 крат.

Топография поверхности была определена путем компьютерного трехмерного моделирования на основе данных, полученных с помощью интерферометра-профилометра "Zygo New View 7300".

Для измерения твердости газодетонационных покрытий использовался микротвердомер для проведения испытаний по Виккерсу "402 MVD" с возможностью работы в автоматическом и ручном режиме в диапазоне нагрузок 0,01...2,00 кг.

Определение износостойкости производилось в соответствии с ГОСТ 23.204–78 "Обеспечение износостойкости изделий. Методы определения истирающей способности поверхностей при трении". Триботехнические свойства материалов определялись на триботехническом комплексе. Во время испытаний варьировались следующие режимы: нагрузка составляла 190...950 Н, окружная скорость 0,2...1,0 м/с. Путь для каждого образца составлял 1000 м. Испытания производились по схеме диск–колодка при вращательном движении в режиме сухого трения. Материал диска – сталь 40, на колодку из стали 40 проводили напыление покрытий. Износостойкость оценивалась по величине весового износа. Величина износа определялась путем непосредственного замера массы образца до и после испытаний на трение.

В биологической части экспериментов использовались мыши-самцы линии BALB/c. Животным под эфирным наркозом подкожно вводили по 1 имплантату с нанесенным в асептических условиях столбиком сингенного костного мозга, взятого из бедренной кости. Для адгезии клеток органную культуру костного мозга на подложке культивировали в течение 45 мин в содержащей 95 % среды RPMI-1640 (ICN) и 5 % эмбриональной телячьей сыворотки (ICN). Костный мозг служил источником стволовых клеток и ростовых факторов. Через 45 сут имплантаты извлекали, фотографировали в отраженном свете с фиксированными параметрами. Проводили количественную морфометрию цифровых изображений согласно статистике серых уровней до и после имплантации посредством программы Photoshop.

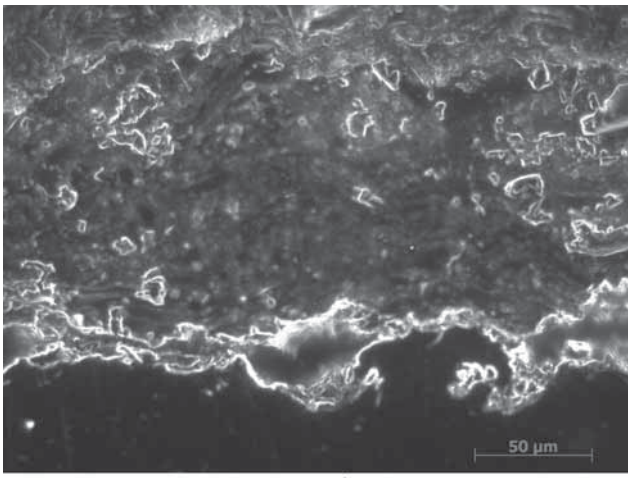
Газодетонационное коррозионно-стойкое покрытие на основе базальта

Энергодисперсионный анализ порошковой смеси базальт–NiCr показал, что в состав порошка, помимо матрицы в виде соединений Ni и Cr, входят следующие компоненты в виде соединений с кислородом: магний, алюминий, кремний, кальций и железо.

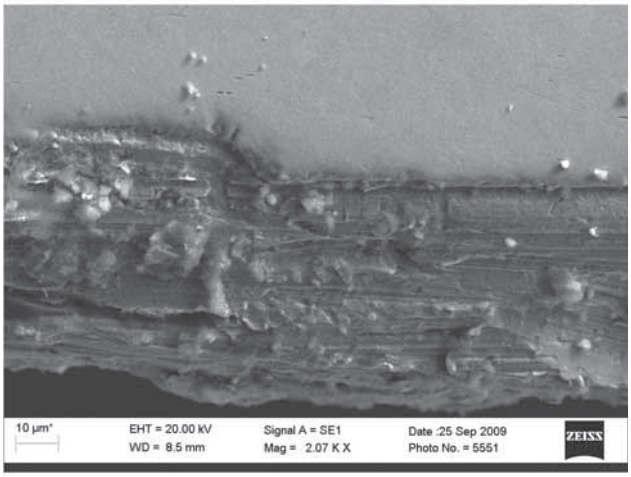
После напыления базальтовой смесью был проведен ряд исследований, направленных на изучение свойств получившегося детонационного покрытия. Оптическая (рис. 1, *а*) и растровая электронная (рис. 1, *б*) микроскопии поперечного среза покрытия показали, что детонационное покрытие на основе базальта является плотным, слоистым, без видимых пор на поперечном срезе.

Результаты измерения микротвердости базальтового покрытия в виде графической зависимости приведены на рис. 2. Поскольку покрытие из базальта ожидаемо будет обладать стойкостью к агрессивным средам, то область его применения будет конкурировать с покрытиями из электрокорунда. Поэтому для сравнения на том же рисунке приведена графическая зависимость изменения микротвердости по поперечному срезу газодетонационного покрытия, полученного из электрокорунда.

По результатам определения топографии поверхности базальтового покрытия была установлена величина шероховатости, которая определяется прибором с высокой точностью и составляет от *Ra* 3,45 до *Ra* 4,61, что может быть приемлемо для деталей, эксплуатирующихся без последующей обработки. Относительно высокую шероховатость поверхности можно объяснить применяемым сырьем и способом получения покрытия.



а)



б)

Рис. 1. Результаты оптической (*а*) и растровой электронной (*б*) микроскопии поперечного среза базальтового покрытия

Газодетонационное износостойкое покрытие с синтезированными в матрице карбидами титана

Порошковая смесь для создания износостойкого покрытия была получена по технологии механически активируемого СВС. На первом этапе порошковую смесь, состоящую из углерода, титана и матрицы на основе NiCr, подвергают предварительной механоактивационной обработке в планетарной шаровой мельнице-активаторе [9]. После такой обработки порошковая смесь является слоистым механокомпозитом вида Ti+C+X % NiCr. Результаты РЭМ-анализа, подтверждающие данный вывод, представлены на рис. 3.

После получения механокомпозита следует второй этап технологического процес-

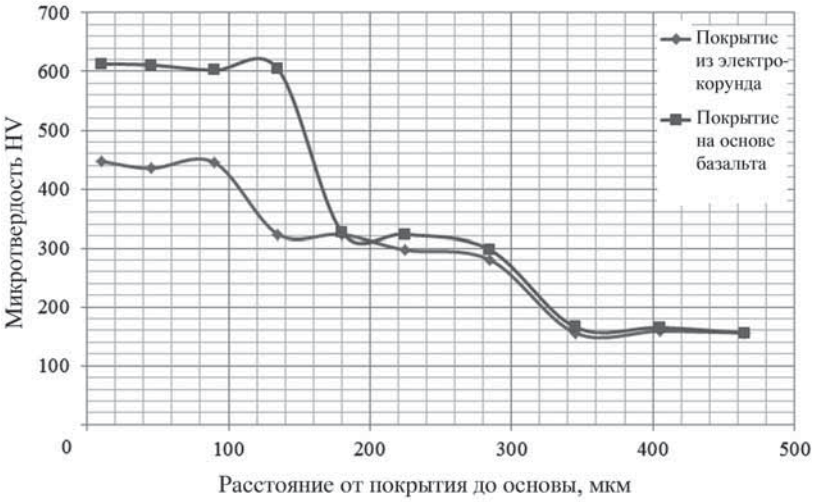


Рис. 2. Микротвердость поперечного среза газодетонационных покрытий

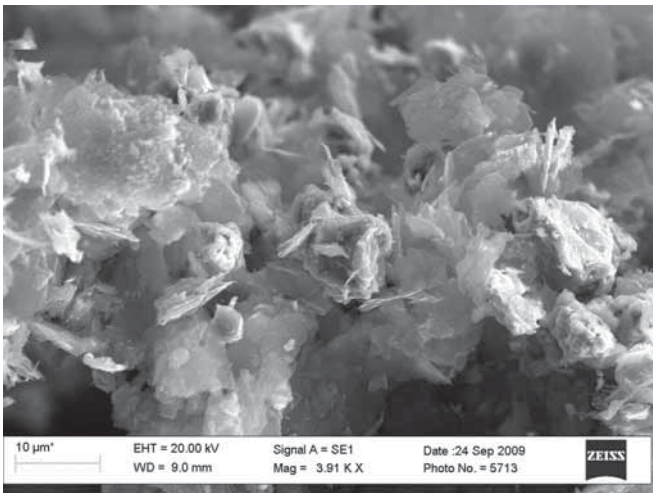


Рис. 3. РЭМ-изображение порошковой смеси исходного механокомпозита после обработки в активаторе

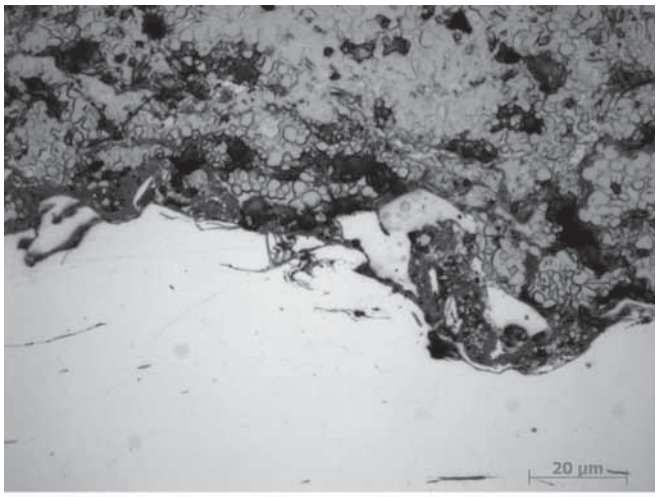
са синтеза – проведение реакции СВС, необходимой для образования карбида титана в относительно ограниченном объеме матрицы. В результате реакции удалось синтезировать стехиометрический карбид титана TiC.

После газодетонационного напыления полученной порошковой смесью был проведен оптический анализ поперечного среза образца с покрытием (рис. 4), который показал относительную неравномерность распределения карбидного зерна по объему покрытия.

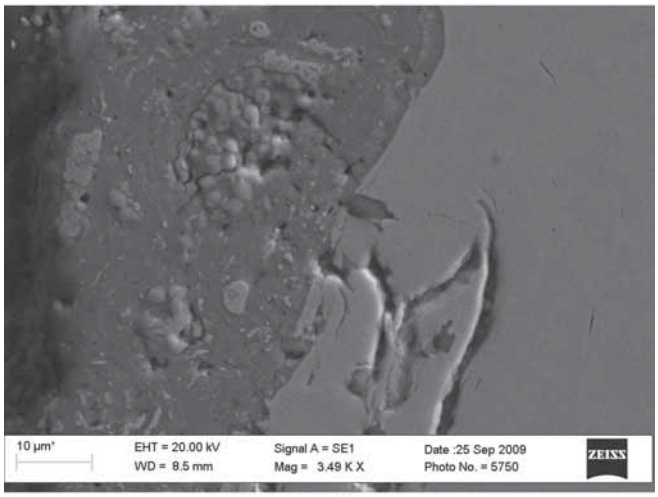
Следующим этапом исследований было проведение энергодисперсионного анализа напыленного покрытия по поперечному срезу. Результаты представлены в табл. 1. Картина распределения элементов по поперечному срезу позволяет судить, что в покрытии присутствуют карбиды титана, а также составляющие матрицы – прежде всего, никель и хром.

Определение топографии поверхности покрытия показало, что шероховатость составляет от *Ra* 2,43 до *Ra* 5,26. Относительно высокую шероховатость поверхности можно объяснить применяемым сырьем и способом получения покрытия.

Следует отметить, что для газодетонационных покрытий отсутствует четкая линейная взаимосвязь между микротвердостью поверхностного слоя и его износостойкостью. Поэтому были проведены экспериментальные исследования износостойкости образцов с покрытием, определяемой по величине весового износа. Испытывали покрытия с различным процентным содержанием металлической матрицы. Данные по определению износостойкости приведены в табл. 2. Установлено, что увеличение процентного содержания металлической матрицы в композиционном материале приводит к росту весового износа. Так, например, при изменении содержания NiCr от 20 до 60 % весовой из-



а)



б)

Рис. 4. Структура поперечного среза газодетонационного покрытия с карбидными включениями:
а – оптическая микроскопия; *б* – растровая электронная микроскопия

Таблица 1

Результаты энергодисперсионного анализа поперечного среза покрытия с синтезированными в матрице карбидами титана

Элемент	Содержание	
	% мас. (±0,01 %)	% атм. (±0,01 %)
C	12,24	32,43
Si	0,49	0,55
Ti	26,17	17,39
Cr	1,53	0,94
Mn	0,35	0,20
Fe	42,55	24,25
Ni	16,07	23,29

Таблица 2

Результаты определения износостойкости

Показатель	Окружная скорость 0,2 м/с					Окружная скорость 1,0 м/с				
Нагрузка на образец, Н, ±	190	380	570	760	950	190	380	570	760	950
Износ образца с покрытием состава TiC+20 % NiCr, г, ±0,0005 г	0,003	0,004	0,007	0,012	0,014	0,002	0,005	0,008	0,012	0,020
Износ образца с покрытием состава TiC+40 % NiCr, г, ±0,0005 г	0,004	0,006	0,009	0,014	0,018	0,004	0,008	0,013	0,018	0,027
Износ образца с покрытием состава TiC+60 % NiCr, г, ±0,0005 г	0,009	0,014	0,021	0,029	0,032	0,010	0,013	0,018	0,028	0,038

нос при нагрузке в 950 Н увеличился в 2 раза. Процесс износа характеризуется быстрым ростом в начале пути трения и дальнейшей его стабилизацией. Это не противоречит известным данным по износостойкости различных материалов [8, 10].

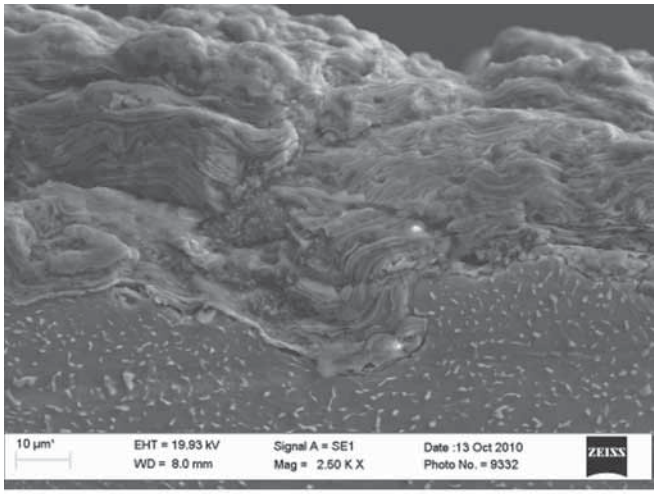
Биосовместимые газодетонационные покрытия

В качестве исходного материала для созданий биоактивных покрытий применялась смесь порошков: биологического гидроксиапатита кальция и разрешенного в медицине соединения TiNi. Соединение TiNi синтезировалось по технологии СВС и механоактивационной обработке и использовалось в качестве интерметаллидной матрицы для частиц порошка гидроксиапатита. Рентгенофазовый анализ полученного порошкового композита не выявил посторонних фаз.

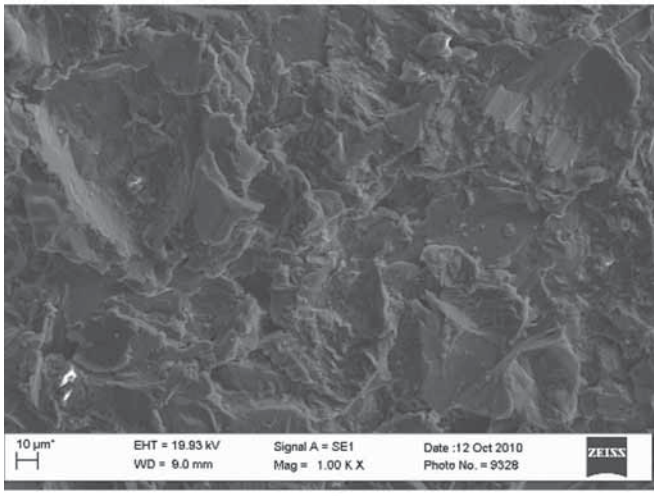
По результатам РЭМ-исследования установлено, что покрытия имеют пористую структуру и ярковыраженный рельеф, характер которого не меняется при использовании порошка гидроксиапатита различных фракций и проведении предварительной пескоструйной обработки. Покрытия имеют пористую структуру. На рис. 5, *а* можно наблюдать характер границы раздела покрытие–подложка: размер пор от 2 до 16 мкм, наличие дендритных структур из неоплавленных частиц. Рельеф поверхности имеет волнистый характер и состоит из гребней и углублений размером до 50 мкм. Можно предположить, что такой рельеф покрытия будет способствовать активной роли имплантата в процессе костеобразования.

Исследования шероховатости покрытий на основе гидроксиапатита кальция показали зависимость от размера напыляемых частиц. При распылении частиц фракции 1...10 мкм шероховатость поверхности покрытий составляет *Ra* 3,5. При увеличении размера частиц до диапазона 20...30 мкм наблюдается рост значений шероховатости до *Ra* 4,72, а при напылении частиц гидроксиапатита размером 50...300 мкм шероховатость достигает 6...24 мкм (рис. 6).

Рентгенофазовый анализ покрытия также не обнаружил, помимо гидроксилапатита и матрицы TiNi, других фаз, в том числе и титановой подложки, что подтверждает преимущество газодетонационного способа для формирования качественных покрытий, однородных по толщине и фазовому составу.



а)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры поверхности детонационного гидроксиапатитового покрытия: *а* – поперечное сечение; *б* – поверхность покрытия

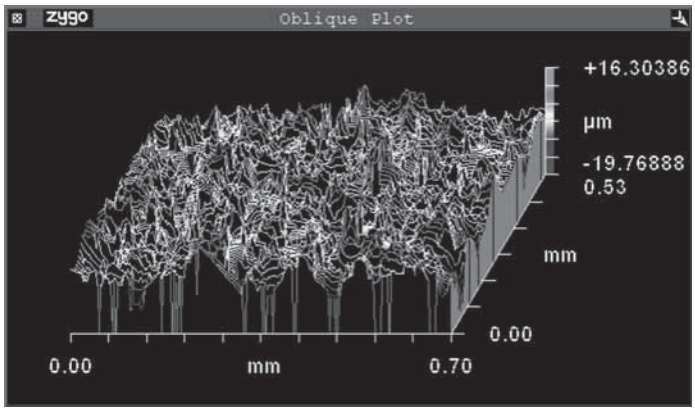


Рис. 6. Профиль шероховатости поверхности покрытия при распылении частиц в диапазоне от 50 до 300 мкм

Исследование реакции тканей на подкожную имплантацию животным титановых имплантатов с разработанными кальций-фосфатными покрытиями показало, что через 1,5 мес. эксперимента не было выявлено признаков воспалительных процессов и инфекционных заражений, что определяет их высокую биологическую совместимость [10]. Изучение адгезии костно-мозговой ткани к поверхности имитаторов имплантатов in vivo по росту тканевых пластинок в условиях биомеханических нагрузок в пределах до 4Н показало эффективность применения покрытия, нанесенного газодетонационным методом.

Также в результате проведенных исследований было установлено, что кальций-фосфатное покрытие индуцирует рост тканевых пластинок со 100%-й вероятностью, что свидетельствует об оптимальности их поверхностного рельефа для прикрепления и созревания клеток. Гистологический анализ продемонстрировал, что во всех случаях при испытании покрытий, нанесенных газодетонационным методом, в тесте эктопического костеобразования формируется костная ткань.

Выводы

1. Применение слоистых механокомпозитов с металлической и интерметаллидной матрицей для газодетонационного напыления позволяет обеспечить сохранение фазового и элементного составов исходной порошковой смеси в нанесенном покрытии.

2. По итогам исследований покрытия на основе базальта установлено, что изделия с таким покрытием обладают сравнительно высокой твердостью. Фазовый состав исходного порошка базальта и газодетонационного базальтового покрытия не изменяется, что позволяет сделать вывод о возможном наследовании таких свойств базальта, как чрезвычайная коррозионная стойкость. Поэтому изделия с покрытиями на основе базальта будут способны противостоять воздействию высоко агрессивных сред (например, в условиях морской воды), что повлечет увеличение срока службы таких узлов, как винты двигателей морских и речных судов.

3. Анализ результатов исследований износостойкости газодетонационных покрытий с синтезированными в матрице карбидами титана показал, что износ образцов с покрытием, по сравнению с образцами из закаленной стали 40Х, в 8–10 раз меньше. Это позволяет рекомендовать газодетонационный способ нанесения покрытий на основе карбида титана для изделий, работающих в условиях высокого абразивного и эрозионного изнашивания.

4. Проведенные биологические испытания in vivo продемонстрировали биосовместимость и биоактивность разработанных покрытий на основе гидроксилапатита кальция. Титановые имплантаты с покрытиями на основе кальций-фосфата с высокой вероятностью способствуют формированию костной ткани в тесте эктопического костеобразования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** износостойкости рабочих органов сельскохозяйственных машин электродуговой наплавкой порошковым электродом / А.В. Собачкин, А.А. Ситников, В.И. Яковлев, М.Е. Татаркин, М.В. Логинова, М.Н. Сейдуров // Ползуновский альманах. 2011. № 4/2. С. 133–136.

2. **Людаговский А.В.** Газотермическое напыление покрытий: учебное пособие. М.: РГОТУПС, 2006. 43 с.

3. **Общая** и тонкая структура детонационных биосовместимых покрытий из гидроксиапатита кальция / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, М.Н. Сейдуров, А.А. Попова // Ползуновский вестник. 2010. № 4/2. С. 38–40.

4. **Подготовка** исходного порошка гидроксиапатита кальция для детонационно-газового напыления на титановую основу / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, Н.П. Тубалов, А.А. Попова, Ю.П. Шаркеев, Е.В. Легостаева // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 269–272.

5. **Процессы** структурообразования при детонационно-газовом нанесении защитных покрытий из композиционных порошков $TiAl_3$, Ni_3Al / В.Ю. Филимонов, В.И. Яковлев, М.А. Корчагин, М.В. Логинова, А.С. Семенчина, А.В. Афанасьев // Физика горения и взрыва. 2008. Т. 44. № 5. С. 106–111.

6. **Яковлев В.И., Шабалин В.Н., Собачкин А.В.** Детонационное напыление покрытий из базальта // Проблемы и перспективы развития литейного, сварочного и кузнечно-штамповочного производств. Межвузовский сборник трудов. Барнаул: Изд-во Алтайского государственного технического университета им. И.И. Ползунова, 2009. С. 237–242.

7. **Собачкин А.В., Яковлев В.И., Ситников А.А.** Применение методов самораспространяющегося высокотемпературного синтеза и механоактивационной обработки для создания новых наплавочных материалов // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 9. С. 17–22.

8. **Покрытия** из механоактивированных СВС-материалов для рабочих органов сельскохозяйственных машин, наплавленные ручным дуговым способом / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, А.В. Собачкин, М.Н. Сейдуров, М.Е. Татаркин // Ползуновский вестник. 2012. № 1/1. С. 273–277.

9. **Структура** и свойства наплавленных электродуговых покрытий из порошков механоактивированных СВС-композитов / А.А. Ситников, В.И. Яковлев, М.Н. Сейдуров, М.Е. Татаркин, А.В. Собачкин, Н.В. Степанова, И.Ю. Резанов // Обработка металлов: технология, оборудование, инструменты. 2011. № 3 (52). С. 51–54.

10. **The structure** and physical and mechanical properties of a novel biocomposite material, nanostructured titanium-calcium-phosphate coating / Y.P. Sharkeev, E.V. Legostaeva, Y.A. Eroshenko, O.A. Kashin, I.A. Khlusov // Composite Interfaces. 2009. V. 16. № 4. P. 535–546.

УДК 621.793

М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев
(Объединенный Институт машиностроения НАН Беларуси)
E-mail: mbelotser@gmail.com

Строение и свойства полимерных покрытий, полученных распылением экструдатов

Представлены результаты экспериментальных исследований процесса формирования покрытий газопламенным распылением полимерных экструдатов. Было установлено влияние состава факела, дистанции напыления и скорости охлаждения на структуру и свойства полимерных покрытий.
Ключевые слова: *газопламенное распыление полимерных экструдатов, прочность сцепления, структура покрытий, коррозионная стойкость.*

The results of experimental studies of the formation of flame-sprayed coatings of polymer extrudates are given. It was found the influence of flame spraying distance, and the cooling rate on structure and properties of polymer coatings.
Keywords: *flame spraying of polymer extrudates, the adhesion strength, the structure of coatings, corrosion resistance.*

Введение

Все большее практическое применение находит метод нанесения защитных покрытий газопламенным распылением экструдатов и шнуров, изготовленных из термопластичных полимеров [1–3]. Успешное развитие этой технологии обусловлено, прежде всего тем, что в сравнении с нанесением полимерных порошков распыление экструдатов обеспечивает большую стабильность свойств покрытий, лучшее распределение наполнителя, особенно наноразмерного [4], меньшую себестоимость.

В статье приведены результаты дальнейших исследований метода газопламенного распыления полимерных экструдатов и, в частности, выполнена оценка влияния состава горючей смеси, дистанции напыления и скорости охлаждения на структурные изменения полимера и физико-механические свойства наносимых слоев. Полученные данные будут использованы при разработке технологических процессов формирования из термопластов коррозионно-стойких и антифрикционных покрытий.

Методы проведения исследований

Нанесение покрытий осуществляли с использованием газопламенного терморaспылителя, позволяющего распылять шнуры и экструдаты диаметром 3 мм из термопластичных полимеров [5]. В экспериментах использовались экструдаты из полиамида ПА 6, *полиэтилентерефталата* (ПЭТФ) и *полиэтилена низкого давления* (ПЭНД). В качестве модифицирующего наполнителя использовалась *ультрадисперсная алмазно-графитовая смесь* (УДАГ) [6] в количестве 0,1...0,2 % мас. Покрытия наносили на образцы из низкоуглеродистой стали при различных составах горючей смеси, скорости охлаждения и дистанции напыления.

Морфологию, химический состав покрытий и надмолекулярную структуру полимера в покрытиях оценивали с помощью сканирующего электронного микроскопа "JSM-5610 LV" с системой химического анализа EDX JED-2201. Фазовый состав полимера в покрытии идентифицировался методом рентгеноструктурного анализа на установке "ДРОН-3" в монохроматизированном CoK_α-излучении.

Прочность сцеплений полимерных покрытий с металлической подложкой, подготовленной струйно-абразивным методом с удельной энергией потока 70...150 кДж/с·м^2 и размером частиц 0,8...1,5 мм, определяли методом отрыва штифта нормально приложенной нагрузкой. Внутренние напряжения в полимерном слое оценивали консольным методом [7].

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе исследований было оценено влияние технологических режимов напыления на физико-химическое состояние (химический, физический составы и структуру) покрытия.

Установлено, что степень кристалличности полимера в нанесенном покрытии зависит в наибольшей степени от скорости охлаждения. Дифрактограммы, полученные при различных скоростях охлаждения покрытия, содержат рефлексы от кристаллического полиамида и диффузное гало под ними (рис. 1).

Качественное исследование первичной кристалличности (аморфно-кристаллического состояния) состава покрытий показало, что полимер в покрытии, полученном при медленном охлаждении, характеризуется относительно высокой степенью кристалличности, на что указывает присутствие в дифракционном спектре интенсивных линий от кристаллического полиамида (рис. 1, *а*). В случае быстрого охлаждения покрытия объемное содержание кристаллической фазы существенно снижается. Об этом свидетельствует уменьшение интенсивности дифракционных линий от кристаллического полиамида (рис. 1, *б*). Модификация полиамида наноразмерными добавками УДАГ, даже при медленном охлаждении покрытий, приводит к наиболее низкому содержанию кристаллической фазы (рис. 1, *в*). Исследование фазового состава покрытий, отожженных в течение 3 ч при температуре 0,7...0,8 от температуры плавления полиамида ПА 6 и медленно охлажденных, показало, что последующий нагрев покрытий приводит к уменьшению содержания кристаллической фазы.

Известно, что режим охлаждения влияет не только на первичную кристаллическую структуру полимеров, но в еще большей степени на вторичную, надмолекулярную. Определено, что при медленном охлаждении покрытия из ПА 6 характеризуются надмолекулярной структурой, состоящей из линейных агрегатов в виде однородных по величине кольцевых сферолитов размером 8...12 мкм (рис. 2, *а*).

При высоких скоростях охлаждения (закалке) этих же покрытий образование надмолекулярной структуры полимера завершается (останавливается) на стадии сворачивания макромолекул в сферические глобулы с неоднородным по размеру составом (рис. 2, *б*), присутствуют как небольшие (5...10 мкм), так и мелкие (2...4 мкм) образования глобулярного типа. Кроме этого, у этих покрытий выявлено наличие большого количества макротрещин,

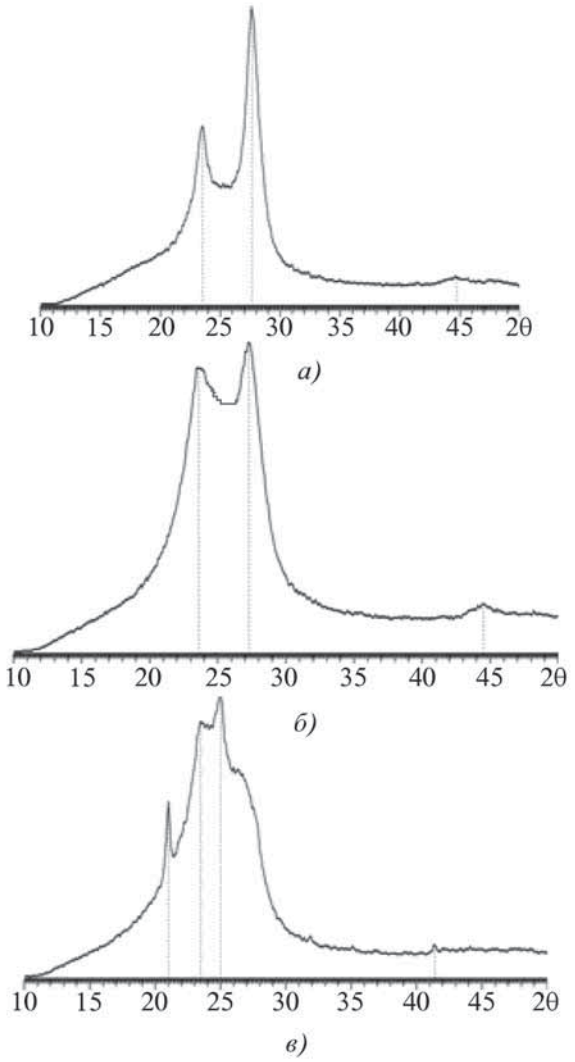


Рис. 1. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoK_a) от покрытий полиамида ПА 6:
а – медленное охлаждение; *б* – быстрое охлаждение; *в* – медленное охлаждение с добавкой 0,2 % мас. УДАГ

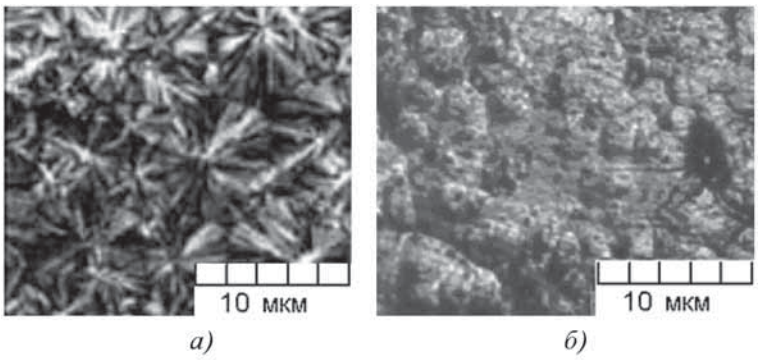


Рис. 2. Надмолекулярная структура полиамида ПА 6 в покрытии:
а – медленное охлаждение (воздух, 22 °С); *б* – быстрое охлаждение (вода, 8 °С)

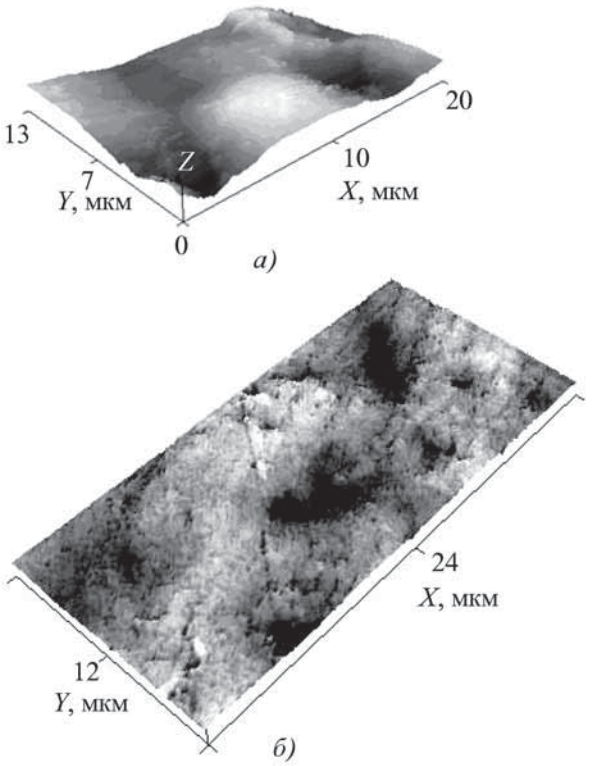


Рис. 3. Изменение размера надмолекулярной структуры полиамида в покрытии в зависимости от соотношения пропана и воздуха в горючей смеси:
а – 1/20; *б* – 1/30

вероятнее всего, проходящих по границам раздела между отдельными глобулами.

Анализируя надмолекулярные структуры в покрытиях, отличающихся лишь скоростью охлаждения, можно отметить, что путем регулирования режимами охлаждения получатся либо кристаллическая структура в полимере, характерная для пачек (сферолитов), либо аморфная структура, характерная для глобул.

Оценка влияния состава горючей смеси на процессы образования первичной и вторичной кристаллических структур показала, что изменения наблюдаются лишь при медленном охлаждении. При этом они оказывают существенное влияние только на надмолекулярную структуру полимера. С повышением содержания окислителя в составе горючей смеси факела наблюдается увеличение размера надмолекулярных образований (рис. 3).

Исследования структурных особенностей полимера в покрытии в зависимости от состава горючей смеси показали, что наибольшее (полное) совпадение атомных групп до и после распыления полиамида ПА 6 соответствует режиму распыления стехиометрическим составом горючей смеси, на что указывает инфракрасный спектр полос поглощения атомных групп. При этом число характеристических полос поглощения атомных групп и положение максимумов совпадают, изменяется лишь их интенсивность при некоторых волновых числах [2], что свидетельствует о сохранении физико-химических особенностей полимера в покрытии после его газотермического распыления.

Изменение интенсивности во всей области поглощения связано с тем, что в процессе газотермического воздействия на полимер при расплавлении в нем происходит образование и перераспределение связей типа О–Н, С–Н и других, которые, в свою очередь сшивая макромолекулы полимера, уменьшают долю различных связей, характерных для исходного полимера. Подтверждением данного обстоятельства является то, что наибольшее изменение интенсивности поглощения наблюдается в области частот поглощения 500...2000 см$^{-1}$, характерных для кратных связей полимера, например амидных при 1680...1700 см$^{-1}$, а наименьшее несовпадение интенсивности поглощения наблюдается в области частот 2500...3600 см$^{-1}$, характерных для одинарных связей О–Н, С–Н.

Установлено, что при увеличении количества воздуха в пламени количество одинарных связей О–Н, С–Н увеличивается, что подтверждается увеличением интенсивности поглощения.

Исследование показало существенное влияние содержания воздуха в горючей смеси (распыляющей струе газа) на адгезию покрытий при распылении не модифицированного полиамида (рис. 4). Это обусловлено изменением физико-химического и механического взаимодействий полимера с металлической подложкой. Изменение физико-химического

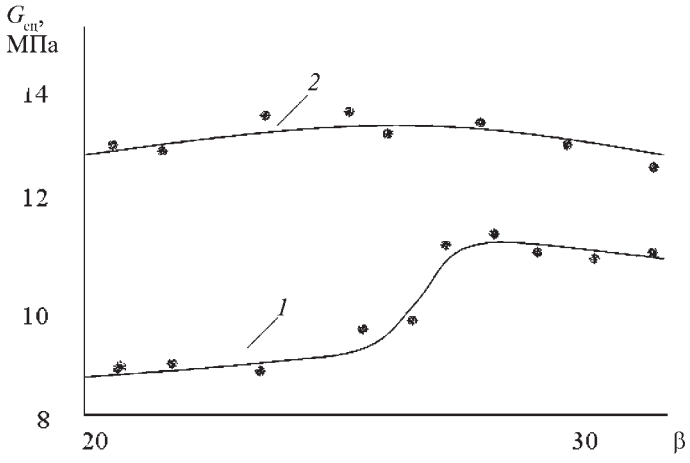


Рис. 4. Влияние соотношения объема воздуха к объему горючего газа в смеси (β) на адгезию покрытий, напыленных материалами:
1 – ПА 6; *2* – ПА 6+0,2 % мас. УДАГ

взаимодействия является результатом изменения степени термического окисления полимерных макромолекул. С увеличением соотношения объема воздуха к объему горючего газа в смеси (β) происходит интенсификация процесса возникновения в полимере кислородсодержащих групп (–OH, –COOH и др.). Известно [8], что для множества полимеров их окисление приводит к увеличению энергии взаимодействия полимер – металл. Кроме этого, было установлено, что с увеличением степени окисления полимерного расплава увеличивается размер надмолекулярных образований (см. рис. 3), что свидетельствует об уменьшении вязкости и силе поверхностного натяжения расплава. Данное обстоятельство способствует увеличению энергии взаимодействия полимера с подложкой за счет повышения процесса смачивания.

Механическое взаимодействие полимера с металлом заключается в проникновении полимерного расплава в неровности, поры металла и последующим заклиниванием затвердевшего полимера в них. Вследствие некоторой вязкости расплава полного заполнения дефектов поверхности металла расплавом не происходит, контакт адгезива с субстратом не может быть абсолютным. С изменением количества воздуха в распыляющей струе газа происходит изменение ее термодинамических параметров, что, в свою очередь, влияет на кинетику проникновения расплава в дефекты металлической поверхности. Увеличение скорости струи газа повышает энергию удара полимерных частиц и избыточное давление на образующийся слой расплава, происходит "вдавливание" расплава с сопровождающимся вытеснением макрообъемов адсорбированных веществ (газы, пары воды, органические вещества и др.) с поверхности подложки. Это обусловливает увеличение площади соприкосновения расплава с покрываемой поверхностью и увеличение взаимодействия реакционноспособных поверхностных атомов металлов и полярных групп макромолекул полимера. Следует отметить, что наличие адсорбированных газов (пузырей) на поверхности подложки является потенциальным очагом разрушения адгезионной связи, так как около воздушных полостей на границе раздела происходит концентрация напряжений.

Химический анализ выделяющихся макрообъемов веществ с металлической поверхности, подготовленной струйно-абразивной обработкой, показал, что они представляют собой пузырьки воздуха. В связи с тем, что газонасыщенность покрытий, нанесенных восстановительным и окислительным пламенем, практически одинаковая (таблица), можно сделать вывод, что газовые образования в покрытии не являются результатом окисления полимерных макромолекул, а представляют собой свободные объемы. Минимальное значение газонасыщенности покрытий

Газонасыщенность покрытий в зависимости от вида пламени

Вид пламени	Значение β	Газонасыщенность покрытия, %
Нормальное	24	10...12
Восстановительное	19	24...26
Окислительное	30	26...28

наблюдается при использовании нейтрального пламени, что объясняется большей динамикой струи газа, приводящей к лучшему вытеснению из полимерного слоя газовых свободных включений.

Максимальные значения адгезии соответствуют нейтральному пламени с небольшим избытком окислителя, т.е. на 1 объем пропана в смеси приходится 24...26 объемов воздуха. При бóльшем соотношении β воздух выполняет неоднозначную роль. С одной стороны, увеличивается интенсивность образования кислородсодержащих связей, обеспечивающих образование прочных связей с металлом, с другой – также увеличивается и энергия межмолекулярного взаимодействия, результатом чего является уменьшение подвижности макромолекул полимера и уменьшение контакта кислородсодержащих групп полимера и металла. Кроме этого, при увеличении количества избыточного (несгораемого) воздуха скорость высокотемпературной струи газа уменьшается, что приводит к уменьшению площади соприкосновения полимерного слоя с подложкой. Общим результатом является уменьшение адгезионной прочности.

При распылении экструдата из полиамида ПА 6, модифицированного 0,2 % мас. УДАГ в сравнении с распылением экструдата из "чистого" ПА 6, отмечается существенное увеличение прочности сцепления формируемых покрытий, а также меньшее влияние состава горючей смеси на адгезию. Повышение адгезии или увеличение адгезионной прочности покрытий из модифицированного полимера объясняется, прежде всего, их меньшими внутренними напряжениями. Снижение напряжений обусловлено следующим. Во-первых, образованием пространственных физических связей адсорбционного типа между активными центрами полимерных макромолекул и активными фрагментами поверхностного слоя наполнителя. Это дает возможность релаксации перенапряжений на межфазной границе с одновременным сохранением эффективных связей полимера с поверхностью наполнителя при деформации композиций.

Во-вторых, присутствие графита, имеющего ярко выраженную пластинчатую форму, образует ориентационную укладку структурных элементов полимера

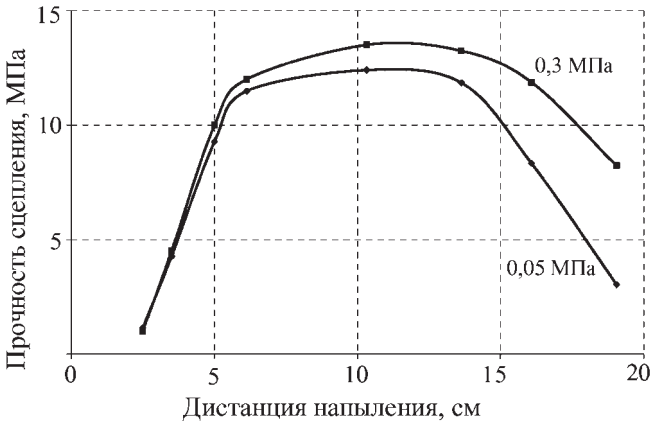


Рис. 5. Зависимость прочности сцепления покрытий от дистанции напыления при различном давлении горючей смеси в камере сгорания термораспылителя

вдоль частичек наполнителя. Пластинчатое строение частиц графита обусловливает образование вблизи его поверхности фибриллярной структуры. Это приводит к параллельной укладке фибрилл друг относительно друга и в последующих слоях полимера, удаленных от поверхности наполнителя. Частицы графита, не являясь центрами образования вторичных надмолекулярных структур, способствуют параллельной укладке друг относительно друга структурных элементов полимера.

Более низкие связи полимера с поверхностью графита, по сравнению с активной поверхностью алмаза, и фибриллярная, следовательно, более эластичная надмолекулярная структура обусловливают сравнительно низкие усадочные напряжения в таких покрытиях. В результате образуются более эластичные покрытия, характеризующиеся меньшими внутренними напряжениями.

Уменьшение влияния состава горючей смеси на адгезию модифицированных покрытий связано с тем, что наполнитель УДАГ способствует интенсификации термоокисления полимера. Следует отметить, что для покрытий из не модифицированного ПА 6 наблюдается адгезионный тип разрушения, а для покрытий из модифицированного ПА 6 характерен смешанный тип разрушения, представляющий собой разрушение как по границе, так и в объеме полимера.

Оценка адгезионных свойств покрытий от дистанции напыления показала, что максимальными значения прочности сцепления на отрыв обладают покрытия, напыленные на дистанции 0,06...0,14 м (рис. 5).

Экстремальный характер полученных зависимостей обусловлен наличием оптимальных значений количества тепла, вложенного в полимерный материал. При меньших дистанциях напыления происходит перегрев полимерного расплава, подтверждением чего является существенное потемнение полимера на подложке. При дистанциях более 0,14 м покрытие формируется относительно "остывшими" частицами и сплавление происходит не в полной мере.

Установлено, что увеличение скорости охлаждения покрытий ПА 6 с 5 до 20 °С/с практически не изменяет величину прочности сцепления со стальной подложкой, которая составляет 12...14 МПа. Дальнейшее повышение скорости охлаждения резко снижает величину адгезии, что очевидно связано со снижением степени кристалличности. Быстрое охлаждение расплава затрудняет протекание релаксационных процессов в полимере, что приводит к формированию более напряженных покрытий.

Исследования влияния режимов напыления на коррозионную стойкость покрытий показали, что проницаемость покрытий в большей мере зависит от скорости охлаждения покрытия, чем от состава распыляющей газопламенной струи.

При изменении состава горючей смеси в пределах устойчивого горения факела значения проницаемости покрытий из ПЭНД и ПЭТФ, полученных при скорости охлаждения 20...30 °С/с, для среды соляной кислоты варьировались в пределах не более 10 %. При этом увеличение окислителя в составе горючей смеси приводит к увеличению проницаемости покрытия.

Анализ результатов влияния скорости охлаждения на проницаемость покрытий показал, что для различных термопластов увеличение или уменьшение скорости охлаждения покрытия играет не однозначную роль. Так для покрытий из ПЭТФ увеличение скорости охлаждения от 5 до 50 °С/с увеличивает проницаемость более чем в 5 раз, а для покрытий из ПЭНД увеличение скорости охлаждения наоборот позволяет уменьшить проницаемость почти в 2 раза. По всей видимости, этот факт является следствием того, что ПЭНД имеет значительно большую скорость кристаллизации, чем ПЭТФ. Минимальные значения проницаемости для покрытий из ПЭНД получены при скоростях охлаждения 30...35 °С/с. Вероятно, за это время ПЭНД достигает практически максимальной степени кристаллизации и дальнейшее уменьшение скорости охлаждения приводит лишь к росту надмолекулярных структур.

Вследствие того что проницаемость не всегда свидетельствует о степени защитных свойств покрытий, была выполнена также оценка их химической стойкости по изменению адгезионных свойств покрытий в зависимости от длительности пребывания в растворе соляной кислоты.

Графики зависимости прочности сцепления покрытий из ПЭНД и ПЭТФ, полученных при медленном (8...12 °С/с) и быстром (45...50 °С/с) охлаждении,

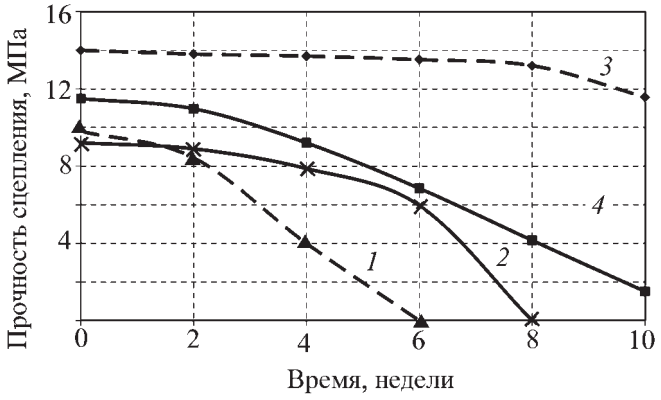


Рис. 6. Влияние времени экспозиции в растворе соляной кислоты на прочность сцепления покрытий:
1, *2* – ПЭНД; *3*, *4* – ПЭТФ
——— – быстрое охлаждение; - - - - - – медленное охлаждение

от времени экспозиции в растворе соляной кислоты приведены на рис. 6.

Анализ полученных результатов показывает, что каждое покрытие характеризуется своим некоторым интервалом времени, когда прочность сцепления практически не изменяется (менее 10 %). Именно по этому времени можно судить о сроке службы (работоспособности) покрытия. Для покрытий из ПЭНД уменьшение проницаемости в 1,5 раза позволяет повысить работоспособность в четыре раза.

Выводы

Показано, что режимы формирования покрытий газопламенным распылением полимерных экструдатов или шнуров оказывают существенное влияние на структуру полимера – образуется либо кристаллическая, либо аморфная структура. Установлено, что при нанесении покрытий газопламенным распылением экструдатов из полиамида ПА 6 увеличение степени кристалличности полимера в покрытии способствует повышению прочности сцепления. Определены технологические режимы нанесения покрытий, при которых покрытия обладают наибольшей прочностью сцепления и наименьшей проницаемостью. Для формирования покрытий с адгезией 12...14 МПа рекомендуется осуществлять процесс распыления нейтральным пламенем с небольшим избытком окислителя (на 1 объем пропана 25...27 объемов воздуха), при этом дистанцию напыления выдерживать 0,07...0,14 м и осуществлять охлаждение (кристаллизацию) покрытия со скоростью не более 20 °С/с.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Патент № 10711** Респ. Беларусь, МПК B 05 D 1/08. Способ газопламенного напыления покрытий / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев; заявитель Объединенный ин-т машиностроения НАН Беларуси. № а 20050857; заявл. 31.08.05; опубл. 30.06.08 // Афіцыйны бюл. Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2008. № 3. С. 75.

2. **Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В.** Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 8. С. 16–22.

3. **Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В., Камко А.И.** Повышение долговечности узлов трения скольжения сельскохозяйственных машин газопламенным напылением полимерных покрытий // Ремонт, восстановление, модернизация. 2010. № 12. С. 2–7.

4. **Korobov Yu., Belotzercovski M., Chekulaev A.** Modeling of Flame Spraying of Polymer Wire with Nanofillers // Mathematical modeling and computer simulation of material technologies. Int. Conf. MMT–2008. Israel. Sept. 08–12. 2008. P. 2-65–2-71.

5. **Патент 2996** Респ. Беларусь. МПК B 05 B 7/20. Устройство для газопламенного напыления проволочных материалов / М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев, А.С. Прядко, В.М. Изоитко; заявитель ИМИНМАШ НАН Беларуси. № 20060093; заявл. 17.02.06; опубл. 30.08.06 // Афіцыйны бюл. / Нац. цэнтр інтэлектуал. уласнасці. 2006. № 4. С. 157.

6. **Долматов В.Ю.** Ультрадисперсные алмазы детонационного синтеза. Получение, свойства, применение. СПб.: СПбГПУ, 2003. 344 с.

7. **Wicks Z.W., Jones S., Pappas P.** Organic coatings. Science and technology. Chichester: John Wiley&Sons Ltd. 1994. Vol. 2. 438 p.

8. **Довгяло А.В., Юркевич О.Р.** Композиционные материалы и покрытия на основе дисперсных полимеров. Технологические процессы. Минск: Навука і тэхніка, 1992. 256 с.

УДК 621.9

А.А. Болдырев, В.П. Смоленцев *(Воронежский государственный технический университет)*
E-mail: smolen@inbox.ru

Повышение точности базирования деталей реологическими средами с переменной плотностью

Рассмотрен процесс базирования деталей с комбинированным воздействием магнитных полей на реологические магнитные жидкости, способные формировать в поверхностных слоях на границах немагнитных металлов уплотненные слои, позволяющие удерживать деталь при чистовой механической обработке или при электрических методах изготовления изделий.

Ключевые слова: *реологическая жидкость, уплотненный слой, установка заготовок.*

The article deals with workpieces locating process with combined influence of magnetic fields on rheological liquids that can form on surface layers at the boundaries of nonmagnetic metals compacted mats allowing to hold the worpiece during finishing mechanical treatment or electrical methods of product fabrication.

Keywords: *rheological liquids, compacted mats, workpiece holding.*

Введение

Одним из показателей качества изделий является стабильность размеров при обработке. На чистовом этапе изготовления детали необходимо обеспечить точное базирование заготовки, используя для этого адаптацию контактной среды, в частности реологической *магнитной жидкости* (МЖ), способной в управляемом магнитном поле создавать контактные слои по границам опорных баз заготовок. Проводимые исследования показали, что применение реологических сред позволяет обеспечить более точное положение сопрягаемых поверхностей, не прибегая к дорогостоящим элементам приспособлений с индивидуальным профилем. В работе показаны технологические режимы для эффективного применения известных жидкостей с переменными характеристиками для чистовой обработки металлических деталей в машиностроении.

Механизм базирования заготовки в магнитной жидкости на столе станка

Во внешнем магнитном поле (например, на электромагнитном столе станка) токопроводящие наночастицы сближаются в зоне действия намагниченности в среде МЖ и уплотняются. Происходит перераспределение наночастиц с аномальным повышением их концентрации вблизи полюсов [1].

Покрытие частиц *поверхностно-активным веществом* (ПАВ), например олеиновой кислотой, позволяет избежать образования из частиц агрегатов, которые не могут способствовать повышению вязкости МЖ (рис. 1) и препятствуют реологическим преобразованиям.

В поле с напряженностью H образуется намагниченность частиц. Возникают силы F_1 и F_2 сближения частиц 1 и 2 до соприкосновения с наружной оболочкой ПАВ, тормозится движение частиц в магнитном поле, повышается вязкость МЖ.

Очевидно, что плотность упаковки частиц в магнитном поле вблизи заготовки будет тем больше, чем

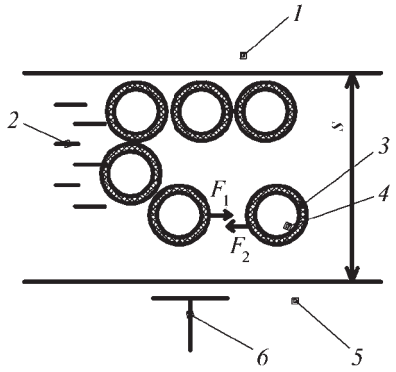


Рис. 1. Поведение МЖ в магнитном поле:
1 – заготовка; *2* – жидкая основа МЖ; *3* – ПАВ; *4* – частица магнетита; *5* – стол станка; *6* – сила действия намагниченности в поле напряженности (H); s – зазор между заготовкой и столом

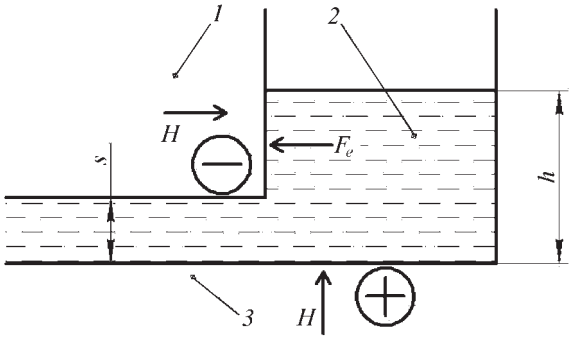


Рис. 2. Силы, действующие на заготовку, закрепленную на столе станка:
1 – немагнитная заготовка; *2* – МЖ; *3* – стол станка; *H* – вектор действия магнитного поля; *h* – высота слоя МЖ; *s* – зазор между заготовкой и базой станка за счет погрешности базирования; F_e – сила воздействия МЖ под влиянием магнитного поля

выше намагниченность (J_1) материала частиц. Между заготовкой и уплотненной массой частиц формируется нормальная сила (F_e), которая зависит от площади боковой поверхности заготовки, помещенной в МЖ с глубиной слоя *h* (рис. 2).

Прохождение магнитных силовых линий в зоне токопроводящей частицы, покрытой непроводящим ПАВ, можно смоделировать как разность напряженностей (*H*) поля в зазоре или со стороны действия магнитного поля с намагниченностью *J* (желательно иметь предельную намагниченность J_{max}) (рис. 3). На пути магнитного поля могут быть или нетокопроводящая жидкость, или токопроводящая частица и непроводящее покрытие (ПАВ). По закону Кирхгофа силовые линии на участке 1–2 (см. рис. 3) пойдут [2]

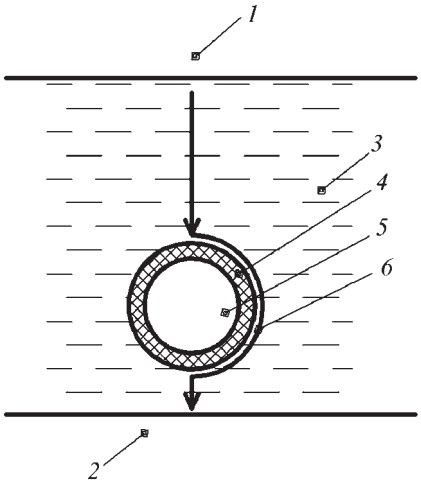


Рис. 3. Прохождение магнитных силовых линий через МЖ:
1 – немагнитная заготовка; *2* – стол станка; *3* – МЖ; *4* – ПАВ; *5* – наночастица; *6* – направление действия сил и траектория силового поля при напряженности *H*

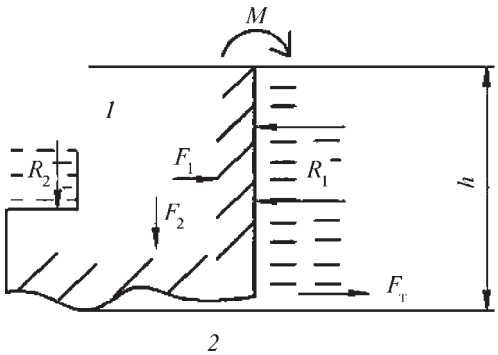


Рис. 4. Силовое воздействие на закрепляемую заготовку (*1*): *2* – стол станка; F_1, F_2 – силы, действующие на МЖ со стороны заготовки (*1*); R_1, R_2 – реакции МЖ после увеличения вязкости в магнитном поле; $F_т$ – сила трения между заготовкой и столом станка (*2*); *M* – момент опрокидывания заготовки под действием сил резания

как в обход частицы, так и через нее, где воздействие покрытия выразится в потере напряженности и намагниченности магнитного поля. Распределение силового поля на *2* канала будет зависеть от размеров частицы, её геометрии, толщины покрытия, зазора между заготовкой, проводимости среды, расстояния между частицами и многих других факторов.

Для базирования заготовки на столе станка и удержания ее в процессе обработки следует создать силу трения вдоль стола, предотвращающую сдвиг заготовки под действием сил резания и опрокидывание заготовки при ее обработке под действием момента (*M*). Для этого нужно найти силы реакции R_1 и R_2, через которые можно рассчитать предельно допустимые силы резания и режимы обработки, используемые в процессе формообразования, ограниченные этими силами. Опрокидывающий момент (*M*) и дополнительное сопротивление сдвигу заготовки зависят от высоты слоя (*h*) МЖ, определяющего давление ($P_б$) на боковые стенки заготовки (рис. 4).

Для большинства заготовок не базовые поверхности (на рис. 5 боковые) могут иметь не плоский профиль, в таком случае распределение боковых сил будет отличаться от показанных на рис. 4 реакций МЖ. Пересчет давлений МЖ на такие поверхности можно сделать с помощью коэффициентов запаса с величиной 1,3–1,5.

Численные значения структурных составляющих МЖ по [1]:

– размеры ферромагнетиков (наночастиц) – диаметр от 2 до 10 нм (в [1] имеются сведения об использовании частиц с диаметром до 0,1 мкм);

– толщина слоя покрытия наночастиц – от 2 до 10 нм (в [1] указывается возможность получения покрытий из поверхностно-активных веществ с толщиной до 0,2 их диаметра);

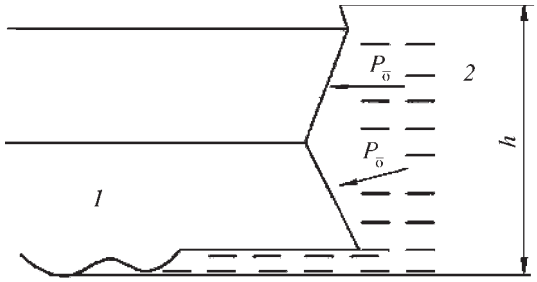


Рис. 5. Силы, действующие со стороны МЖ на плоскую заготовку (*1*): *2* – МЖ; $P_б$ – давление на боковые поверхности заготовки; *h* – высота слоя МЖ

– объемное содержание (C_V) наночастиц более 50 % (для использования МЖ при удержании заготовки). В остальных случаях C_V = 10...20 %;

– напряженность поля (H) при использовании МЖ 480 кА/м;

– условие существования МЖ в зоне земного тяготения.

Зависимости для расчета силы закрепления заготовки

Для удержания заготовки на столе необходимо установить силу ($F_н$) нормального давления на поверхность стола, определяющую величину трения между базовыми участками заготовки и опоры станка с МЖ при полном погружении ее или участка в МЖ.

По [1], [2]:

$$F_н = (\mu_0 m_z \Delta H) S_e, \quad (1)$$

где μ_0 – постоянная магнитной проницаемости в вакууме ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м);

m_z – магнитный момент частицы;

ΔH – градиент напряженности магнитного поля, кА/м;

S_e – площадь заготовки (вид сверху).

Сопротивление силы заготовки при резании ($F_с$) будет складываться из составляющих ($F_т$) от трения контактных поверхностей, прижатых массой (m) заготовки и трением при нормальном действии $F_н$, а также сопротивлением (F_e) вязкой МЖ в поле магнитного воздействия на нее с учетом площади ($S_б$) участка заготовки, контактирующей с МЖ со стороны, противолежащей действию силы резания

$$F_с = F_т + F_e > K_P P_z, \quad (2)$$

где P_z – сила резания;

K_P – коэффициент, учитывающий динамические и другие воздействия на заготовку в процессе обработки.

Для оценки силы, сдвигающей заготовку, можно использовать зависимость [3] для расчета составляющей силы резания P_z (точение):

$$P_z = 10\, C_{P_z} t_{P_z}^x S_{P_z}^y \mathrm{v}_{P_z}^n K_P, \quad (3)$$

где C_{P_z}, x_{P_z}, y_{P_z}, n_{P_z} – эмпирические коэффициенты из [3];

t – глубина резания;

S – подача;

v – скорость резания;

для сверления крутящий момент $M_{кр}$ [3]:

$$M_{кр} = 10 C_{M_{кр}} D_{M_{кр}}^q t_{M_{кр}}^x S_{M_{кр}}^y K_P, \quad (4)$$

где $C_{M_{кр}}$, $q_{M_{кр}}$, $x_{M_{кр}}$, $y_{M_{кр}}$ – коэффициенты из [3];

D – диаметр сверла (фрезы);

для фрезерования [3]:

$$P_z = \frac{10\, C_{P_z} t^{x_{P_z}} S_z^{y_{P_z}} B^{u_{P_z}} z}{D^{q_{P_z}} n^{w_{P_z}}} K_P, \quad (5)$$

где u_{P_z}, w_{P_z} – коэффициенты из [3];

S_z – подача на зуб;

B – ширина фрезерования;

n – частота вращения шпинделя:

для шлифования [3]:

$$P_z = C_{P_z} \mathrm{v}^a S^b t^c K_P, \quad (6)$$

где a, b, c – эмпирические коэффициенты.

Сила трения контактных поверхностей:

$$F_т = K_т (F_н + F_\partial), \quad (7)$$

где F_∂ – сила прижима от массы (m) заготовки;

$K_т$ – коэффициент трения поверхностей;

$$F_т = K_т (\mu_0 m_z \Delta H + \partial m) S_e. \quad (8)$$

Сила сопротивления (F_e) вязкой среды (МЖ) зависит от ее плотности. Плотность можно принять равной силе в начале течения упругого материала (МЖ). По [1] эту силу можно найти через максимальное касательное (τ_{max}) напряжение (формула Трека):

$$F_e = \frac{\tau_{max}}{S_\delta}, \quad (9)$$

где $\tau_{max} = \left\{ \frac{1-\mu}{2} \left[1 - \tau \mathrm{arctg}\left(\frac{1}{\tau} \right) \right] - \frac{3}{4(1+\tau^2)} \right\}$,

где μ – вязкость среды (для МЖ);

τ – касательное напряжение $\tau = \frac{z}{2l}$, где z – зазор между поверхностями контактных тел (толщина слоя максимальной вязкости); l – ширина заготовки.

$$\tau_{max} = 0{,}31 F_о \text{ (решение задачи Герца).} \quad (10)$$

$$F_e = F_H S_\delta = \mu_0 m_z \Delta H S_\delta, \quad (11)$$

$$F_e = K_т \mu_0 m_z \Delta H S_e + K_т \partial m + \\ + \mu_0 m_z \Delta H S_e = \mu_0 m_z \Delta H (K_т S_e S_\delta) + K_т \partial m. \quad (12)$$

Критерий применяемости МЖ для базирования заготовки при обработке:

$$\Delta\bar{\rho} V g L \le kT, \quad (13)$$

где $\Delta\bar{\rho}$ – разница в плотности материалов частиц и основы (жидкости);

V – объем частицы;

g – гравитационная постоянная у поверхности земли;

L – высота слоя МЖ;

kT – энергия теплового движения частиц (k – постоянная Больцмана; T – температура МЖ).

По [1] предельная толщина слоя L = 10 мм.

Результаты экспериментальной проверки

Установка для измерения приращения вязкости МЖ в магнитном поле устроена по принципу капиллярного вискозиметра. На стойке закреплен калиброванный сосуд с капиллярным отверстием. По времени вытекания МЖ в сравнении с водой находится вязкость среды без поля (определяемая начальной вязкостью жидкости-носителя и концентрацией магнитной фазы в ней). Затем с помощью постоянного магнита создается поле, повышающее вязкость МЖ. Измерение времени истечения проводится повторно и рассчитывается приращение вязкости среды при наложении магнитного поля.

Для жидкости на основе трансформаторного масла, изготовленной в Ивановском государственном энергетическом университете, вязкость в поле редкоземельного постоянного магнита выросла более чем в 3 раза, что с достаточной степенью достоверности отвечает теоретическому расчету.

Измерение удерживающей способности "затвердевшей" в магнитном поле МЖ проводилось на образцах, установленных в слое МЖ и сдвигаемых силой, измеряемой динамометром. Удельная удерживающая сила принимала значения до 50 Н/см^2, что соответствует значениям для промышленных магнитных столов и позволяет рекомендовать метод закрепления для операций чистового шлифования.

Рекомендуемый состав МЖ для использования в технике:

– магнетит $FeO{\cdot}Fe_2O_3$ (плотность 5,24 г/см^3, намагниченность насыщения 477,7 кА/м, начальная намагниченность 70 кА/м, удельное сопротивление 5...10^{-5} ом·м) – 65...70 %;

– поверхностно-активное вещество (олеиновая кислота) – 10...15 %.

В случае использования МЖ для закрепления заготовок состав может изменяться за указанные пределы.

Удельная МЖ может создавать [1] перепад давления в зазоре 0,05...0,15 МПа.

При известной площади контакта заготовки со столом S_e можно найти минимальную высоту слоя МЖ ($h_{\min}$) при ширине заготовки l и длине l_g:

$$F_c = \mu_0 m_z \Delta H S_e (K_т l l_g + l h) + K_т \partial (l l_g + h) \rho_з l l_g, \quad (14)$$

где $\rho_з$ – плотность материала заготовки.

Надежное закрепление будет обеспечено в случае $h_{\min} \le h$.

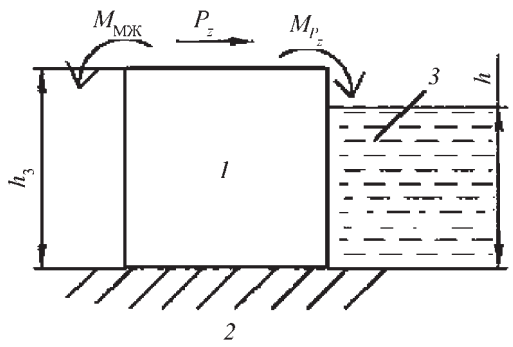


Рис. 6. Моменты сил при опрокидывании заготовки:
1 – заготовка; *2* – стол станка; *3* – МЖ; $h_з$ – высота заготовки; h – высота слоя МЖ; P_z – сила резания; M_{P_z} – момент силы резания; $M_{МЖ}$ – момент сопротивления "затвердевшей" МЖ

Для оценки опрокидывающего момента (M) необходимо сравнить параметры поворота детали за счет силы резания с моментом сопротивления повороту из-за упора в "застывшую" МЖ (рис. 6).

Сопоставляя значения вязкости МЖ в магнитном поле, соответствующие сопротивлению сдвигу, с силами резания при различных методах формообразования, можно рекомендовать предложенный метод закрепления заготовок на финишных операциях механической обработки (чистовое шлифование, полирование, доводка, хонингование), а также для черновой и чистовой электроэрозионной и размерной электрохимической обработок.

Выводы

1. Получены качественные и количественные зависимости, характеризующие показатели поверхностных слоев реологических сред на границе с базовыми участками заготовок. Это позволило обосновать область предпочтительного использования нового вида жидкостей как универсального и ресурсосберегающего средства подготовки производства на стадии чистовой обработки металлических изделий.

2. Обоснованы технологические режимы для управления свойствами реологических жидкостей в зоне контакта с базовыми поверхностями заготовок, что обеспечило повышение точности формообразования и ускорение сроков освоения конкурентоспособной техники новых поколений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Магнитные жидкости** в машиностроении / Д.В. Орлов, Ю.О. Михалёв, Н.К. Мышкин и др.: под общ. ред. Д.В. Орлова, В.В. Подгоркова. М.: Машиностроение, 1993. 272 с.

2. **Смоленцев Е.В.** Эффект проводимости гранульных сред и использование его в комбинированной размерной обработке // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2012. № 1. С. 29–31.

3. **Справочник** технолога-машиностроителя: В 2-х т. / под ред. А.М. Дальского, А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова, А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2001. Т. 2. 944 с.

УДК 621.9

Ф.Я. Барац *(ООО "Научно-исследовательский центр технического регулирования", г. Саратов),*
А.В. Кочетков *(Пермский национальный исследовательский политехнический университет, г. Пермь)*
E-mail: soni81@mail.ru

Охлаждение очага деформации при отделочно-упрочняющей обработке путем увеличения теплового потока в инструмент

Исследовано влияние параметров отделочно-упрочняющей обработки на эффективность и основные характеристики качества процесса алмазного выглаживания инструментами, оснащенными природным алмазом. Алмазное выглаживание закаленной до высокой твердости быстрорежущей стали позволяет существенно повысить качество обрабатываемой поверхности.
Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, отделочно-упрочняющая обработка, инструмент, алмазный индентор, шероховатость.*

Influence of parameters of strengthening processing on efficiency and the basic characteristics of quality of process of diamond processing is investigated by the tools equipped with natural diamond. Diamond processing of the fast-cutting steel tempered to high hardness allows to raise quality of a processed surface essentially.
Keywords: *the superficial plastic deformation, strengthening processing, the tool, diamond, a roughness.*

Введение

Актуальность темы определяется необходимостью совершенствования теории и практики технологии отделочно-упрочняющей обработки круглых резцов, получивших широкое распространение в металлообрабатывающей промышленности. Алмазное выглаживание как один из методов обработки *поверхностным пластическим деформированием* (ППД) позволяет на закаленных высокопрочных инструментальных сталях значительно снизить шероховатость поверхности, упрочнить поверхностный слой и образовать в теле благоприятное распределение сжимающих остаточных напряжений [1, 2].

Постановка задачи

В работах многих отечественных и зарубежных исследователей отмечается, что напряжения, оставшиеся в поверхностных слоях после ППД, помимо других факторов, тесно связаны с температурным полем, возникающим в очаге деформации и в прилегающих к нему областях. Неблагоприятные условия теплообмена в приконтактной зоне и значительные контактные температуры являются главной причиной спада остаточных сжимающих напряжений у самой поверхности обкатанных или выглаженных изделий. Это относится и к ППД методом выглаживания алмазными инструментами. В зависимости от физико-механических свойств обрабатываемого материала и режимов обработки глубина упрочненного слоя может измениться в широких пределах – от 0,2 до 25 мм, а твердость поверхностного слоя может быть увеличена на 40...50 % по сравнению с исходной.

Применение природных алмазов для обработки ППД обеспечивает исключительно низкую шероховатость поверхности почти на всех пластичных металлах и сплавах любой твердости. Усилие, с которым осуществляется процесс выглаживания алмазом, позволяет обрабатывать тонкостенные и маложесткие изделия, при этом упрочняется поверхностный слой и в нем образуются остаточные сжимающие напряжения. Все это становится возможным благодаря уникальным физико-механическим и эксплуатационным свойствам алмаза как инструментального материала.

Алмаз обладает высокой теплопроводностью. Коэффициент теплопроводности его более чем в два раза превышает коэффициент теплопроводности твердого

сплава ВК8, в пять раз выше, чем стали Р18 и сплава Т15К6, в десятки раз превышает коэффициент теплопроводности минералокерамики. Высокая теплопроводность алмаза при использовании его в качестве инструментального материала обеспечивает хороший теплоотвод из зоны обработки, вследствие чего на контактных поверхностях имеют место сравнительно меньшие температуры, чем при выглаживании другими инструментальными материалами. Благоприятный термический режим в области контакта создается также благодаря высокой теплоемкости алмаза [2].

Метод решения

Наиболее эффективным средством снижения температуры местного поля является интенсификация теплового потока в инструмент. В том случае, когда местное поле вызвано действием местных источников теплоты, такие условия обеспечиваются, как было показано, путем увеличения размеров контакта в направление скорости обработки. Если же местное поле возникает в результате действия кольцевого источника, то более целесообразно увеличивать размер контактной поверхности в направлении движения подачи, поскольку большие градиенты контактных температур имеют место по образующей изделия. Неравномерность температурного поля в контакте в направлении главного движения и в направлении движения подачи может быть снижена, если при выглаживании инструментом со сферической рабочей поверхностью ему сообщить вращение относительно оси державки (рис. 1, *а*) со скоростью $v_и$. Если же при этом ось инструмента сместить относительно оси изделия (*h*, см. рис. 1, *б*), то одновременно будет более рационально использована рабочая поверхность индентора.

Такой способ отделочно-упрочняющей обработки целесообразнее вести инструментом с тороидальной рабочей поверхностью (рис. 1, *в*). При такой схеме выглаживания в процессе работы из зоны контакта непрерывно выходят нагретые участки рабочей поверхности инструмента, которые, охлаждаясь в потоке СОЖ, вновь поступают в рабочую зону. При этом температура выглаживания снижается, улучшаются условия смазки, значительно увеличивается активный участок рабочей поверхности инструмента, что приводят к повышению стойкости инструмента в 10–15 раз [2].

На рис. 2 показана конструкция пружинной державки, в которой для вращения инструмента по приведенной выше схеме в качестве привода используется обрабатываемая деталь. Инструмент закрепляется на специальной оправке-шестерне *1*, зацепляющейся с червяком *2*, смонтированном в упругом кронштейне *3*. При вращении детали *4* за счет сил трения приводятся в движение червяк и далее – оправка с инструментом.

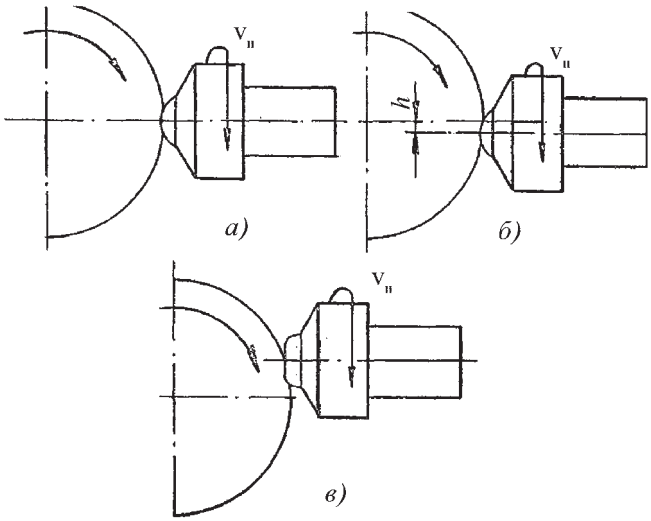


Рис. 1. Схема установки индентора при обработке

Значительное улучшение теплофизической обстановки в очаге деформаций может дать осциллирующее движение индентора в направлении образующей изделия. Эксперименты, выполненные под руководством Ю.Г. Шнейдера [2], показали, что такой метод ППД позволяет программировать микрорельеф упрочненной поверхности, что дает возможность значительно улучшить эксплуатационные свойства изделий.

На рис. 3 показана конструкция устройства для отделочно-упрочняющей обработки с приводом осцилляции индентора по дуге окружности от обрабатываемой детали. Конструкция базируется на устройстве, показанном на рис. 2, в котором инструментальная оправка *1* выполнена с эксцентрично расположенным

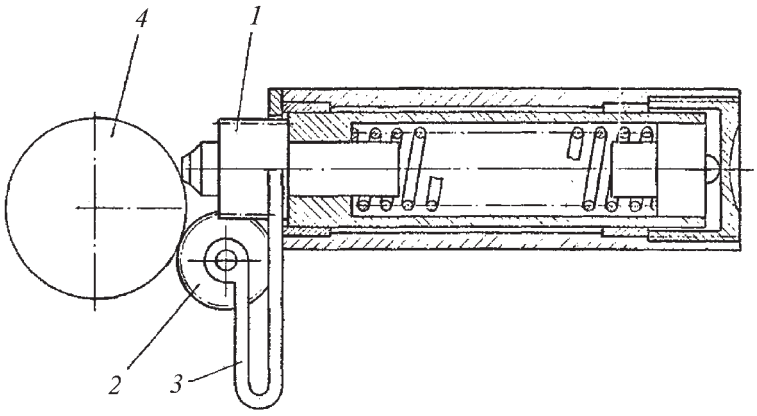


Рис. 2. Конструкция инструментальной державки

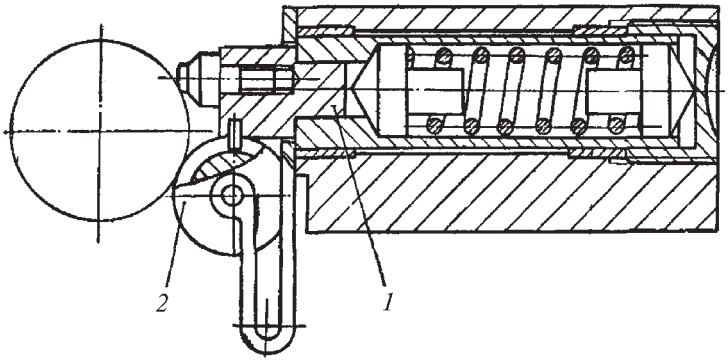


Рис. 3. Конструкция устройства для нанесения регулярного микрорельефа

индентором, а червяк *2* заменен роликом с копирной кривой, кинематически связанной с оправкой *1*. В процессе обработки вращательное движение ролика передается на инструментальную оправку в виде возвратно-качательных движений. Достоинствами устройства являются простота конструкции и надежность в работе. Возможность изменять характер копирной поверхности путем использования сменных роликов расширяет диапазон его использования.

Эффективность процесса отделочно-упрочняющей обработки во многом зависит от рационального использования инструмента. Особенно это относится к алмазу как инструментальному материалу при выглаживании. В этой связи одной из важнейших задач при внедрении процесса алмазного выглаживания в производство является восстановление изношенной поверхности инструмента. Известно, что *алмазные выглаживающие инструменты* (АВИ) допускают пять и более переточек. Однако заточка инструмента представляет собой весьма трудоемкую и продолжительную операцию. Поэтому механизация процесса заточки и доводки во многом способствовала бы более широкому распространению этого процесса.

Разработанная для этой цели конструкция полуавтоматического заточного приспособления представлена на рис. 4. Приспособление базируется на плите *1*, в которой с помощью втулки *2* и *3* вмонтирован переходник *4*. Все механизмы приспособления смонти-

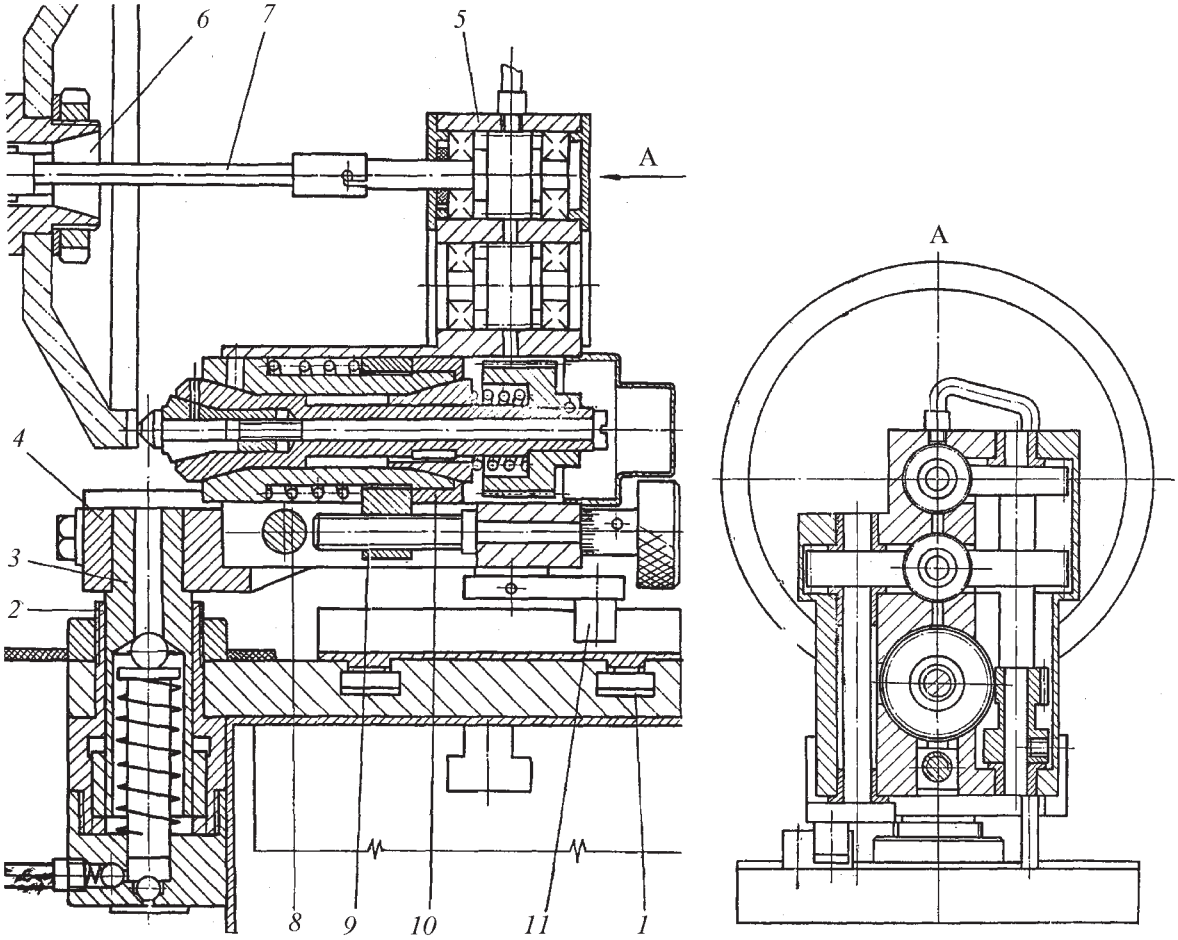


Рис. 4. Устройство для заточки АВИ

рованы в корпусе *5*, который болтами закрепляется на переходнике. В нем размещены шпиндельный узел и механизмы осевого перемещения шпинделя, механизмы вращательного движения шпинделя и качательного движения корпуса. Привод механизмов вращательного движения шпинделя и качательного движения корпуса приспособления осуществляется непосредственно от шпинделя заточного станка с помощью специальной оправки *6* с гибким валом *7*. Обработка алмаза производится нижней частью шлифовального круга, относительно которого положение инструмента за счет резьбового соединения между втулками *2* и *3* изменяется, обеспечивая равномерную выработку по всей плоскости алмазного слоя. Это же движение используется для привода плунжерного насоса, с помощью которого осуществляется смазка механизмов приспособления.

Для заточки АВИ со сферической рабочей поверхностью оси вращения инструмента и возвратно-качательного движения его располагают в одной плоскости, затем с помощью калибра и механизма осевого перемещения шпинделя устанавливают заданный радиус затачиваемой сферы (рис. 5).

Угол качания корпуса при заточке сферы можно принять равным центральному углу этой сферы, тогда возвратно-качательное движение должно совершаться симметрично относительно положения, при котором ось инструмента нормальна к рабочей плоскости круга. Однако целесообразно качание инструмента осуществлять из нормального положения только в одну сторону на угол φ, при этом угол качания уменьшается в два раза и соответственно уменьшается эксцентриситет кривошипа. Величина эксцентриситета может быть вычислена из соотношения

$$l = \frac{H\ \sin(\varphi + \gamma) - h}{2},$$

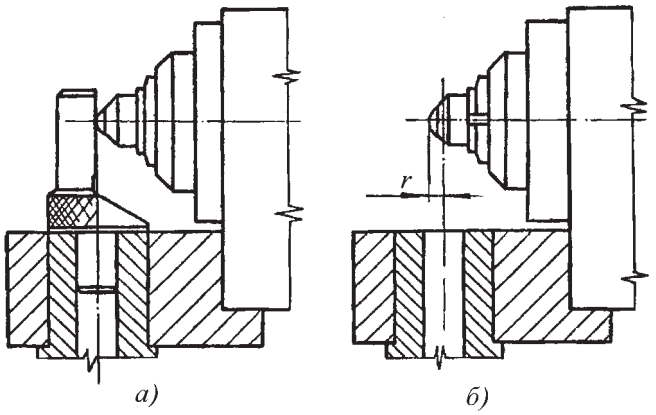


Рис. 5. Расположение затачиваемой сферы

где H – расстояние от оси качания корпуса до оси вращения кривошипа; h – расстояние от оси вращения инструмента до оси вращения кривошипа; $\gamma = \arcsin\frac{h}{H}$ – угол между плоскостью, в которой расположены оси качания корпуса и вращения инструмента и осью вращения кривошипа. Для заточки АВИ с тороидальной рабочей поверхностью используется вращательное движение инструмента, но при этом оси вращения инструмента и его возвратно-качательного движения должны располагаться в параллельных плоскостях на расстоянии радиуса R друг от друга. Качательное движение осуществляется из нормального положения в одну сторону. При заточке АВИ с конусной рабочей поверхностью отключается качательное движение инструмента (устанавливается $l = 0$), а с цилиндрической – отключается вращательное движение инструмента. В последнем случае качательное движение должно осуществляться из нормального положения в обе стороны.

Приспособление, налаженное на заданный радиус (на рис. не показано) и угол качания, продольными и поперечными перемещениями стола заточного станка подводится к шлифовальному кругу, который предварительно закрепляется в специальной оправке на шпинделе универсально-заточного станка.

Используя вертикальное перемещение шлифовальной головки и продольное перемещение стола, совмещают ось шпинделя станка с осью приводного вала приспособления, на котором закрепляют один конец гибкого вала, а поперечным перемещением стола вводят другой конец в шлицевое отверстие оправки *6*. Включением вращения шпинделя станка приводят в движение механизмы приспособления, и поперечным перемещением стола станка подводят затачиваемый инструмент до соприкосновения с рабочей плоскостью шлифовального круга.

Момент касания инструмента с кругом определяют на слух. Это положение стола фиксируется. Необходимый припуск на заточку устанавливают осевым перемещением гайки *9* (см. рис. 4), которое осуществляется вращением винта в сторону отвинчивания. Отсчет значения припуска осуществляют по нониусу. В момент установок припуска гайка *9* сдеформирует пружину *8*, так как инструмент находится в контакте с шлифовальным кругом, между гайкой *9* и торцом втулки *10* образуется зазор, величина которого должна быть равна припуску на заточку. Заточка продолжается до тех пор, пока не будет полностью устранен зазор между гайкой *9* и втулкой *10*, т.е. когда будет сошлифован весь припуск на заточку.

Процесс заточки АВИ ведется в несколько проходов. Черновая заточка осуществляется алмазным кругом АЧК 150×10×3×32 зернистостью АСП10, АСВ10

100%-ной концентрации на металлической связке М1. Число оборотов шлифовального шпинделя – 3000 в мин. Припуск на заточку при переточке инструмента равен ≈0,15...0,20 мм. Шероховатость поверхности после заточки должна соответствовать 2,5 мкм.

Для получистовой заточки применяют мелкозернистые алмазные круги из природных (АЧ-А5) или синтетических (АСМ40-АСП5) алмазов 100%-ной концентрации, связка металлическая М1. Для чистовой заточки зернистость круга не должна превышать АСМ28. Припуски на получистовую и чистовую заточки равны соответственно 0,02...0,03 и 0,010...0,015 мм. Шероховатость поверхности после чистовой заточки должна соответствовать 0,5 мкм и 0,08 мкм. Окончательная обработка АВИ производится чугунным кругом (СЧ21-40) с плотной структурой, рабочая поверхность которого шаржируется алмазным порошком АСМ3-АСМ5. Шероховатость поверхности после доводки должна соответствовать 0,02 мкм по шкале *Ra*. При заточке и доводке торцевое биение рабочей поверхности круга не должно превышать соответственно 0,003 и 0,001 мм.

Приспособление позволяет получить форму и размеры рабочей поверхности инструмента с достаточной для практики алмазного выглаживания точностью. Точность геометрии инструмента определяется, главным образом, положением переходника относительно корпуса приспособления.

Для инструментов со сферической рабочей поверхностью особенно важно, чтобы ось его вращения и ось качания пересекались, т.е. были расположены в одной плоскости. Если это условие не будет соблюдено, то рабочая поверхность инструмента будет отлична от сферической. Поэтому после наладки приспособления на заданный радиус и угол качания необходимо проверить точность установки корпуса относительно переходника. Для этого на время проверки устанавливают качание инструмента симметрично относительно его нормального положения к кругу.

Далее приводят в движение механизмы приспособления и подводят инструмент до соприкосновения с шлифовальным кругом. Если ось качания не пересекает ось вращения инструмента, касание последнего с шлифовальным кругом будет происходить только при качании инструмента в одну сторону. В этом случае необходимо произвести коррекцию относительного положения корпуса и переходника, добиваясь такого их взаимного положения, при котором касание инструмента с кругом происходило при качании в обе стороны. Идентичность касания при качании в ту и другую сторону определяется на слух по силе шума.

После коррекции точности установки корпус должен быть прочно закреплен на переходнике. При таком способе коррекции погрешность установки не превышает 0,005...0,01 мм. Точность формы инструментов с цилиндрической и тороидальной рабочими поверхностями не зависит от взаимного положения корпуса и переходника. Их относительное положение сказывается лишь на величине смещения оси цилиндрического участка рабочей поверхности или оси радиуса тора относительно оси державки инструмента. При необходимости заданная величина такого смещения может быть установлена специально и для инструментов с цилиндрической рабочей поверхностью.

Обсуждение результатов

Точность размеров АВИ зависит от точности установки инструмента в приспособлении по калибру и от величины износа шлифовального круга за время заточки одного инструмента, а для тороидальных инструментов – также от точности установки корпуса относительно переходника на размер [3, 4].

Износ шлифовального круга в наибольшей мере сказывается на точности заточки. Величину износа шлифовального круга можно компенсировать поперечным перемещением стола на расстояние, равное величине этого износа. В противном случае радиус рабочей поверхности инструмента будет больше заданного на величину износа круга за время заточки данного инструмента.

Заключение

Данное заточное приспособление, позволяющее вести полуавтоматический цикл, простое в наладке и удобное в эксплуатации. Относительная несложность и технологичность конструкции позволяют изготовить его на любом машиностроительном предприятии.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Барац Я.И., Барац Ф.Я., Аксенов А.А.** Новое в зубообработке главной пары заднего моста автомобиля // Промышленность и высшая школа: материалы Междунар. науч.-техн. конф. "100 лет Российскому автомобилю". М.: МАМИ, 1996. 2 с.

2. **Шнейдер Ю.Г.** Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. М. 1982. 48 с.

3. **Барац Ф.Я., Кочетков А.В.** Исследование остаточных напряжений при отделочно-упрочняющей обработке быстрорежущей стали // Технология машиностроения. 2013. № 1.

4. **Барац Ф.Я., Кочетков А.В.** Режимы и качество обработки инструментов из быстрорежущих сталей методом ППД // Автомобильная промышленность. 2013. № 2.

УДК 621.9.047

А.А. Козлов, В.П. Смоленцев, Г.Н. Климова
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: soy4astnik@mail.ru

Расчет и проектирование инструмента для растрового маркирования

Рассмотрены особенности конструкции и технологии изготовления инструмента для растрового электрохимического маркирования деталей. Предложен способ устранения износа элементов, входящих в растр инструмента, путем управляемой компенсации перетекания токов между элементами.
Ключевые слова: *растровое маркирование, инструмент для растрового маркирования.*

In work of the design and manufacturing tools for scanning electrochemical marking parts. We propose a method for eliminating wear items included in the raster tool, driven by compensation currents flowing between the elements.
Keywords: *bitmap marking, labeling tool for marking.*

Введение

Электрохимическое нанесение информации на металлические изделия позволяет создать универсальные инструменты в форме растра, состоящего из отдельных элементов (стержней, трубок и др.), изолированных друг от друга и связанных с программирующим устройством, подающим ток на те элементы, которые участвуют в формировании конкретных индексов при маркировании деталей.

Форма и размеры элементов определяют размеры знаков (букв, цифр, символов и др.). Известно [1], что стандартная ширина штриха должна составлять 10 % от высоты знаков, следовательно, для мелких шрифтов (например, для часто применяемого размера 2,5 мм) контур обвода должен быть не более 0,18...0,25 мм. С учетом межэлектродных зазоров при размерной электрохимической обработке, диэлектрического покрытия, рассеивания тока на границе контура знака размер его элемента в растре не может превышать 0,10...0,15 мм. Все элементы находятся в непосредственной близости друг от друга (рис. 1) и разделены тонким диэлектрическим слоем, не всегда достаточным для устранения перетекания тока между элементами *3*, формирующими знак, и элементами *1*, не участвующими на рассматриваемой операции маркирования.

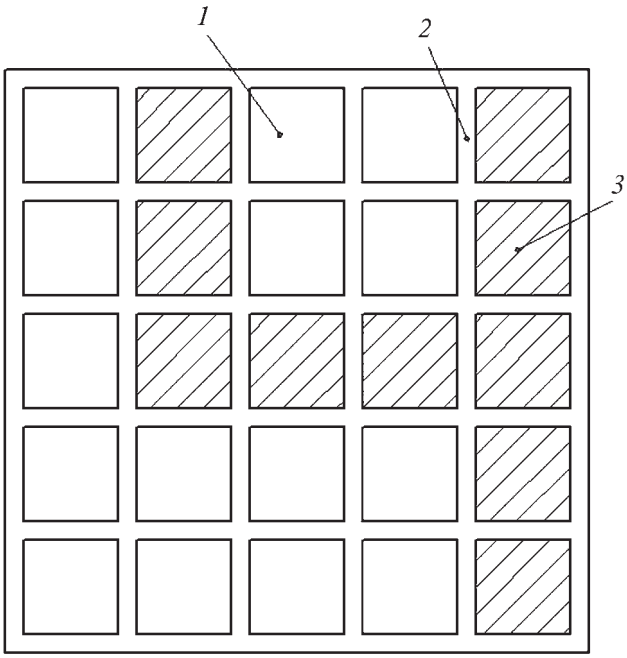


Рис. 1. Растровая решетка электрода-инструмента:
1 – элемент, не участвующий в процессе маркирования; *2* – диэлектрическое покрытие; *3* – элемент, формирующий знак

На рис. 1 приведен пример стилизованного изображения буквы "Ч". При маркировании в процессе участвуют элементы, отмеченные штриховкой. Обработка выполняется электродом-инструментом с рабочей частью в форме растровой решетки, установленной с зазором на место маркирования детали. В зазоре имеется электролит (его состав приведен в [2]), через который ток перетекает на нейтральные элементы *1* (см. рис. 1). За счет разности потенциалов между элементами *1* и *2* образуются гальванические пары, вызывающие анодное растворение одного из видов соседних элементов, т.е. износ электрода-инструмента; теряется одно из главных преимуществ электрохимического маркирования – неизменность геометрии информационных знаков при их применении. Авторам удалось разработать новый способ устранения износа инструмента.

Проектирование без износного растрового электрода-инструмента

В основу предлагаемого способа устранения износа за счет перетекания токов положена система

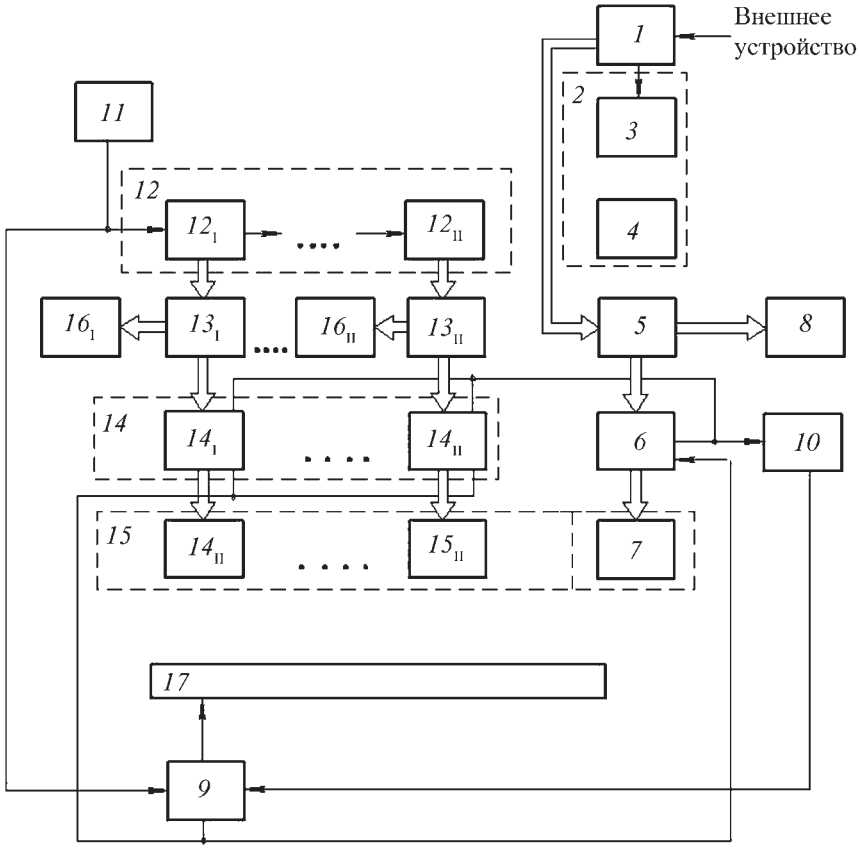


Рис. 2. Управляющее устройство для растрового маркирования:
1 – блок задания на растровом электроде-инструменте программы для получения требуемой информации на детали; *2* – блок формирования контура знаков на электроде-инструменте; *3* – счётчик сигналов, формирующих информационные индексы; *4* – дешифратор индексов; *5* – блок памяти информации о требуемых знаках на детали; *6* – ключи коммутации элементов растра; *7* – элемент растровой решетки; *8* – элементы индексации формы знаков; *9* – источник технологического тока; *10* – блок защиты системы от перегрузок; *11* – датчик положения зоны информации на детали; *12* – счетчик сигналов, переводимых в *n*-разрядный двоично-десятичный ход; *13* – дешифратор сигналов счетчика *12*; *14* – блок ключей коммутации счетчика *12*; *15* – элементы растровой решетки, подключенные к отрицательному полюсу источника *9*; *16* – указатели индексации; *17* – положительный полюс источника тока *9*

управления токами, поступающими на элементы растра, путем гашения блуждающих токов по сигналам обратной связи. Схема устройства, реализующая способ, приведена на рис. 2.

Устройство управления порядком подключения элементов растровой решетки электрода-инструмента работает от процессора, преобразующего сигналы с клавишного устройства в команды на подачу и регулирование величины тока от источника *9* на элементы, формирующие информационные знаки. Сигнал поступает на блок *1* задания программ, преобразуется блоком *2* в контур элементов по форме знака, что контролируется счетчиком *3*. Далее импульс передается к элементам *8* растровой решетки электрода-инструмента *15*. Для практических целей требуется совмещать в одном информационном блоке численные, буквенные шифры с символическими изображениями. При этом часть участков блока может быть постоянной для всех информационных изображений, поэтому целесообразно выделить их в форме самостоятельного отрезка и с помощью управляющего устройства соединить в единое целое с переменной информацией, соблюдая стандартные интервалы между составляющими отрезками (буквами, цифрами, словами и др.).

Если требуется получить на детали информационную запись из *m* знаков, где изменяются только последние *n* знаков (например, порядковые номера), то блок *1* (см. рис. 2) формирует код для каждого записываемого знака. Информация об этом поступает через дешифратор *4* в блок памяти *5*. Одновременно с блока *1* напряжение от источника *9* поступает на вход счетчика *3*, а с его выхода – на вход дешифратора *4*, который на выходе формирует сигнал на запись информации в первый разряд блока памяти *5*, откуда сигнал с высоким уровнем напряжения идет на ключи *6*, управляющими нормированной подачей отрицательного полюса тока на элементы *7* растровой решетки электрода-инструмента, что улавливается элементами *8* и индексируется в форме знаков на табло. Это дает возможность контролировать набор, устранять перетекание тока между элементами растра и своевременно корректировать правильность информации. Далее формируются последующие знаки, которые фиксируются в блоке памяти *5*, и так все $m - n$ знаков (постоянная информация).

Знаки переменной информации (n) вносятся в блок *5* после установления положения места нанесения этой части надписи по датчику *11* положения детали, после чего сигнал поступает на счетчик *12*, состоящий из последовательно соединенных двоично-десятичных счетчиков, подключающих различные элементы растровой решетки, формирующие пере-

менные знаки при маркировании. Дешифраторы *13* устанавливают коды, содержащие выходы высоких и низких уровней. От высоких уровней срабатывают ключи *14*, подающие отрицательный ток на элементы *15* растровой решетки. Появляется переменный знак, который визуально наблюдается на табло индикатора *16*. После этого с датчика *11* сигнал поступает на реле времени и к положительному полюсу *17* источника тока *9* подключается деталь на время анодного растворения контура знаков и осаждения на них контрастного осадка.

После установки на стол станка следующей детали по сигналу от датчика *11* счетчик *12* подает команду дешифратору *13* на изменение одного или нескольких знаков переменной части информации. В процессе маркирования контролируется ток перетекания, вызывающий износ элементов. Ток перетекания вызывает перегрузку ключей *6* или *14*, что дает команду блоку защиты *10*, который отключает подачу тока на перегруженный элемент и предотвращает разрушение его и соседних элементов растра.

Конструкция элементов растрового электрода-инструмента

Растровый электрод-инструмент может быть выполнен из металлических сплошных или трубчатых элементов, имеющих круглое или многогранное сечение. При растровом маркировании размеры сечения элемента ограничены шириной штриха знака, наносимого на деталь. Для шрифтов до 7 номера (наиболее употребляемые для маркирования) толщина линий контура составляет до 0,7 мм, что позволяет использовать элементы растра с размерами сечения 0,5±0,1 мм. Такие детали могут иметь отверстия до 0,30...0,35 мм (для круглого сечения). При толщине изоляционного покрытия *2* (см. рис. 1) не более 0,03 мм минимальное расстояние между соседними элементами при рядном их расположении по соображениям прочности должен быть не менее 0,2 мм и лимитируется стандартными интервалами между буквами (цифрами) и словами.

Интервалы зависят от размеров шрифта, зоны нанесения информации. Их изменение характеризуется так называемым "уширением" [2] – ширины индекса на детали относительно размера элемента растрового знака на электроде-инструменте. На рис. 3 показано "уширение" толщины штриха при маркировании стальных деталей шрифтом № 5, имеющим стандартную толщину линий обвода контура 0,5 мм [1], расстояние между буквами 0,7±0,1 мм. На рис. 3 показано изменение ширины знаков при различном напряжении и плотности тока, регулируемой межэлектродным зазором.

Постоянная часть "уширения", показанная на рис. 3, может быть учтена при проектировании растрового электрода-инструмента путем уменьшения поперечного размера элемента растра (если это возможно с позиции сохранения прочности и жесткости инструмента). Для шрифта № 5 рассматриваемый диапазон "уширения" (см. рис. 3) укладывается в поле допуска информационного штриха на детали. Если размер шрифта менее 3,5 мм, то желательно уменьшить межэлектродный зазор до 0,02...0,03 мм) за счет чего увеличить плотность тока, снизить время обработки. Кроме того, уменьшение зазора дает возможность усилить контрастность изображения и достичь требуемой читаемости информации при использовании низкого напряжения, что также ограничит "уширение" (см. рис. 3).

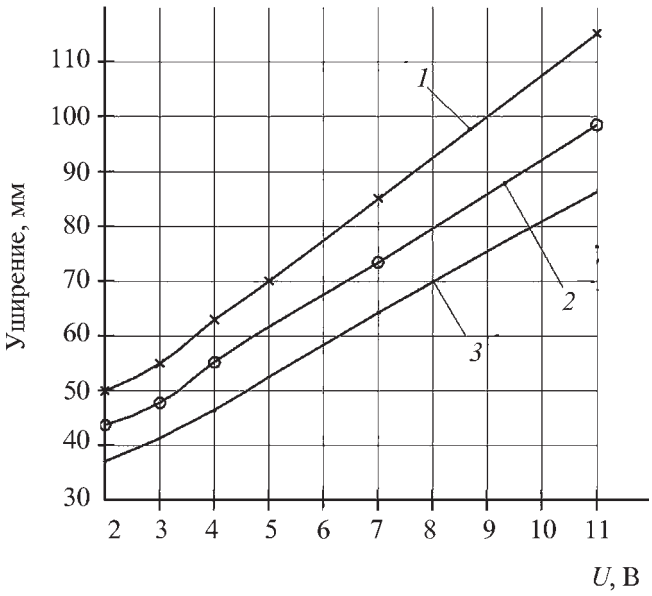


Рис. 3. Увеличение поперечного размера штриха на детали ("уширение") в зависимости от напряжения (*U*) и плотности тока, А/мм^2:
1 – 0,8; *2* – 5,0; *3* – 12,0

При проектировании растрового электрода-инструмента из пустотелых элементов, служащих для подачи рабочей среды к месту маркирования, необходимо учитывать следующие факторы: сохранять площадь металлической части сечения элемента достаточной для подвода тока; обеспечить жесткость элементов растра в объединяющем их корпусе (трубной решетке) без взаимного касания, вызывающего нарушение формы индекса и брак детали; иметь интервалы между знаками информации, обеспечивающие стандартные изображения надписей, но не нарушающие прочности трубной решетки.

Нанесение знаков информации из реологической жидкости

В последние годы решена проблема нанесения информации путем формирования индексов из реоло-

гической жидкости [3] в управляемом магнитном поле. Такие знаки выполняются в форме локальных покрытий и не изменяют геометрических размеров детали. Недостатком подобной информации является низкая стойкость знаков, особенно при эксплуатации с воздействием абразивных гранул. Однако такой вид маркирования оказывается экологически и технически обоснованным при нанесении информации на детали с диэлектрическим покрытием, которое может быть эластичным (например, резина, эмали, лаки, краски). Применение реологических жидкостей позволяет использовать защитные свойства покрытий после маркирования и сохранять полученную информацию за счет внешних защитных слоев диэлектрика.

Еще одним достоинством применения реологических жидкостей для маркирования является возможность нанесения информации без разборки узлов, например при техническом осмотре двигателей, в период эксплуатации с сохранением сплошности эластичных жаропрочных покрытий.

Высота знаков из реологической жидкости в период действия внешнего магнитного поля, поступающего от растрового инструмента, может достигать нескольких мм. Она ограничена пространством между эластичным диэлектрическим покрытием и поверхностью детали. Однако после отключения тока при маркировании упругие силы покрытий снижают высоту индексов, что может привести к размыванию границ контура знаков и снижению качества информации. Поэтому необходимо время формирования знаков из реологической жидкости ограничить, как это показано в [2], интервалом в несколько десятых долей сек. После чего контур знаков фиксируется прижатием эластичного покрытия, сохраняется в таком виде в течение всего периода эксплуатации изделия и может быть в любой момент прочитан имеющимися контрольными средствами.

На рис. 4 приведено "уширение" знаков, нанесенных на стальные изделия, имеющих диэлектрические эластичные покрытия.

Из рис. 4 следует, что толщина слоя осадка реологической жидкости, формирующей знак и определяющей его выступание над поверхностью детали, зависит от свойств эластичного покрытия. Чем большую упругость имеет покрытие, тем меньше остаточная толщина слоя осадка. Критерием оценки (граница "А", см. рис. 4) использования жидкости для маркирования может служить читаемость информации после удаления с детали покрытия (толщина ~0,2 мм для стали).

При маркировании деталей с эластичным диэлектрическим покрытием контур знака на поверхности становится частью инструмента для нанесения информации, так как ширина штриха определяет наибольший размер сечения элемента.

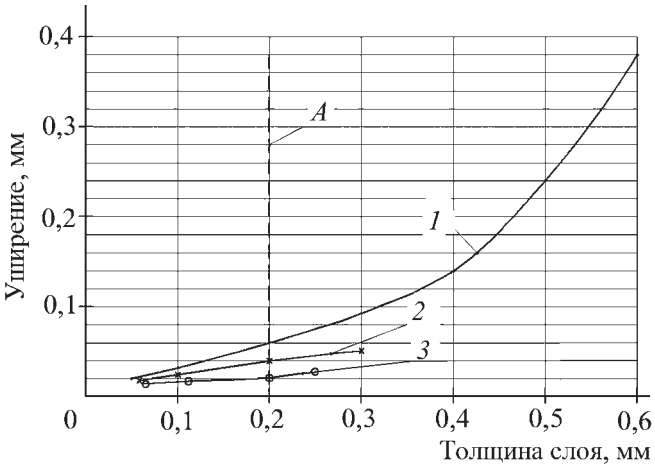


Рис. 4. Изменение ширины контура знака ("уширение") в зависимости от толщины слоя, формирующего знак из реологической жидкости:
А – граница читаемости информации на стали с эластичным диэлектрическим покрытием из резины (*1*), лака (*2*), жаростойкой эмали (*3*) толщиной 0,20; 0,05; 0,15 мм соответственно

Из рис. 4 видно, что при маркировании стальных деталей с покрытием из лака (кривая *2*) и эмали (кривая *3*) возможно обеспечивать наибольшую толщину слоя из реологической жидкости. При этом "уширение" составляет не более 0,05 мм. По [1] такое "уширение" позволяет получить стандартные знаки растровым электродом-инструментом с размером шрифта от 2,5 мм даже с использованием полых элементов инструмента.

Резиновые покрытия *1* (см. рис. 4), имеющие высокую эластичность, позволяют получить знаки с большим выступанием (иметь большую толщину), но в этом случае четкость контура надписей снижается, а толщина линий знаков резко возрастает и выходит за пределы допустимых, особенно для шрифтов с высотой менее 5 мм (наиболее употребительные в технике знаки). Поэтому приходится ограничивать толщину слоя из реологической жидкости до 0,3...0,4 мм. Тогда возможно изготовить растровый электрод-инструмент с размером сечения элемента около 0,3 мм, пригодного для нанесения информации с высотой более 3 мм.

Уменьшение ширины штриха возможно за счет изменения режимов обработки [4, 5]. Это позволяет проектировать элементы растровых электродов-инструментов с размерами их сечений без учета "уширения" знаков, что упрощает изготовление и сборку инструментов и повышает жесткость составляющих частей. Так расчет режимов маркирования по зависимостям,

приведенным в [4], позволяет увеличить размер сечения растрового элемента для шрифта высотой 3 мм с 0,22 до 0,29 мм. При этом становится возможным без нарушения предела жесткости конструкции выполнить в элементе отверстие диаметром 0,12 мм и сохранить площадь сечения, требуемую для подвода тока при маркировании.

Способ, приведенный в [5], открывает возможность проектировать и изготавливать электроды-инструменты с постоянным сечением элементов, а за счет управляемого изменения электрического поля локально изменять ширину штриха, что требуется, например, при нанесении информации арабскими шрифтами и при формировании схем, рисунков.

Выводы

1. Расчет и изготовление электродов-инструментов для растрового маркирования представляет сложную инженерную задачу, поскольку в этом случае требуются элементы, имеющие размер сечения менее 0,2...0,3 мм, и для них может потребоваться трудоемкое изготовление отверстий малого диаметра для подачи рабочей среды.

2. Наряду с трудоемкими прецизионным изготовлением и сборкой растровых электродов-инструментов в работе предлагаются новые способы управления размерами сечений элементов путем изменения параметров режимов, что позволяет снять ограничения по использованию шрифтов малых размеров, достаточно часто применяемых в промышленности.

3. Предложен новый вид обработки с использованием реологической жидкости для маркирования металлических деталей, имеющих эластичные диэлектрические покрытия, без их частичного удаления, что открывает возможность наносить на детали безизносную информацию, например даты испытаний изделий и их результаты.

4. Предложен растровый инструмент для автоматизированного нанесения шрифтов, изображений с постоянной и переменной информацией, устраняющий перетекание тока в пределах растровой решетки и износ элементов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Общетехнический** справочник. Под ред. Е.А. Скороходова. М.: Машиностроение, 1990. 496 с.

2. **Смоленцев В.П., Смоленцев Г.П., Садыков З.Б.** Электрохимическое маркирование деталей. М.: Машиностроение, 1982. 72 с.

3. **Пат. 2229966 (РФ).** Электрод-инструмент для электрохимического маркирования и способ его изготовления / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, А.В. Лёвин, Р.Х. Абу. Бюл. изобр. 2004. № 26.

4. **А.С. 621519 (СССР).** Способ электрохимического получения углублений / З.Б. Садыков, В.П. Смоленцев, Д.И. Панина). Бюл. изобр. 1978. № 32.

5. **Пат. 2284882 (РФ).** Способ растрового маркирования металлов информацией с переменной шириной штриха и устройство для его осуществления / В.П. Смоленцев, Г.П. Смоленцев, Л.В. Квасова. Бюл. изобр. 2006. № 28.

УДК 621.621.02

М.З. Нафиков, А.А. Зайнуллин, И.И. Загиров
(Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа)
E-mail: nafikovmz@rambler.ru

Геометрия контакта при восстановлении валов приваркой двух стальных проволок

Рассмотрена геометрия контакта присадочного металла с поверхностями детали и инструмента при восстановлении валов контактной приваркой двух стальных проволок. Показано, что контактные площадки ограничиваются двумя перекрывающимися по ширине полуэллипсами. Составлены уравнения теплового баланса.

Ключевые слова: *проволока, электроконтактная приварка, контакт, геометрия, тепловой баланс.*

We consider the geometry of the contact with the additional metal parts and tools surfaces contact in restoring of the shafts by contact welding of two steel wires. The contact areas limited with two overlapping semi ellipses are shown. The equations the heat balance are made up.

Keywords: *a wire, electro-contact building-up, contact, geometry, thermal balance.*

Введение

К числу наиболее эффективных и ресурсосберегающих способов восстановления изношенных деталей относятся основанные на методах шовной сварки электроконтактные способы [1]. Этими способами на изношенных поверхностях формируется металлопокрытие самого высокого качества с минимальными припусками на последующую механическую обработку [2]. В качестве присадочного материала могут при-

меняться стальные ленты и проволоки, а также металлические порошки.

Дешевым, доступным и удобным видом присадочного материала при контактных способах восстановления являются стальные проволоки. Этот вид присадочного материала не требует предварительной подготовки и раскроя, при его применении можно восстанавливать по винтовой линии изношенные шейки любой ширины. *Контактная приварка проволок* (КПП) – один из немногих способов восстановления, при котором в металлопокрытии формируются благоприятные сжимающие остаточные напряжения [2, 3]. Промышленностью выпускается самая широкая номенклатура проволок различного химического состава и диаметра.

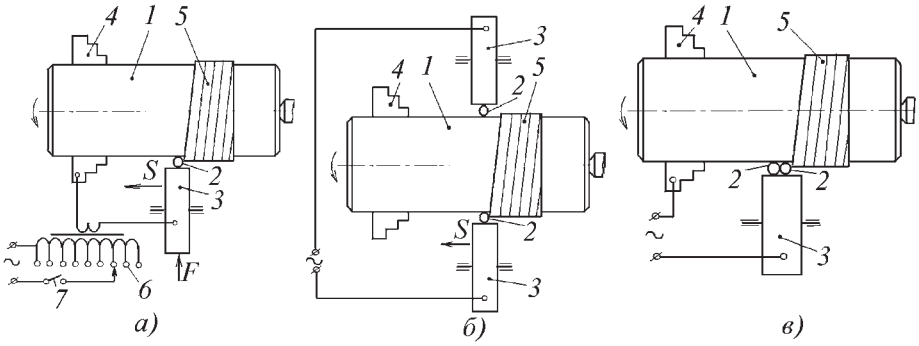


Рис. 1. Схемы КПП:
а – основная; *б* – двухроликовая двумя проволоками; *в* – одновременно двумя проволоками; *1* – деталь; *2* – присадочная проволока; *3* – ролик-электрод; *4* – патрон; *5* – металлопокрытие; *6* – сварочный трансформатор; *7* – прерыватель тока

Формирование сварного соединения основного и присадочного металлов при контактной приварке проволок происходит без образования общей сварочной ванны и без оплавления контактирующих поверхностей. Качество (прочность) сварного соединения при КПП, как и при любом виде сварки в твердой фазе, определяется степенью пластической деформации, происходящей в стыке соединяемых поверхностей [4]. Известно [5, 6 и др.], что при максимально достижимой осевой деформации $\varepsilon_y = 0{,}45 \ldots 0{,}47$ присадочной проволоки прочность соединения равна пределу прочности на разрыв основного металла детали.

Поэтому исследование деформации присадочного металла при КПП имеет первостепенное значение. Цель работы – определить параметры пластической деформации при одновременной контактной приварке двух электродных проволок одним роликом-электродом.

Технологические схемы процесса КПП

Из большого числа технологических схем восстановления изношенных валов контактной приваркой проволок производственное применение нашли лишь схемы *а*, *б* на рис. 1.

Основная технологическая схема, показанная на рис. 1, *а* с токоотводом через патрон наплавочной установки, наиболее универсальна и удобна. Но она наименее производительна, так как приваривается одна проволока. Еще один недостаток этой схемы – меняющиеся параметры вторичного контура сварочного трансформатора. При наплавке длинных валов режим приходится корректировать.

Этого недостатка не имеет двухроликовая схема с токоотводом через второй ролик-электрод. Такая технологическая схема позволяет приваривать одновременно две присадочные проволоки, т.е. процесс достаточно производителен. Но при этой схеме КПП вторую присадочную проволоку подводят к зоне приварки или снизу, или же сзади наплавочной установки, в зависимости от расположения роликов-электродов. Зона работы оператора-наплавщика расположена не только спереди, но и за наплавочной установкой. Кроме того, практически невозможно выдержать необходимое перекрытие по ширине формируемых сварных валиков.

На наш взгляд, более удобна, технологична и производительна показанная на рис. 1, *в* схема одновременной приварки двух присадочных проволок с одной стороны вала. Токоотвод может осуществляться как через патрон установки, так и через второй ролик. Структура формируемого по этой схеме металлопокрытия получается более однородной, так как обе проволоки разогреваются одним импульсом тока и осаживаются совместно.

Формирование металлопокрытия при КПП

Пластическая деформация присадочной проволоки при восстановлении по технологическим схемам на рис. 1, *а*, *б* исследовалась в ряде работ [5–7 и др.]. Было показано, что контактные площадки присадочного металла с цилиндрическими поверхностями вала и инструмента ограничиваются контурами полуэллипсов.

На рис. 2 показана схема формирования металлопокрытия при КПП двух проволок с одной стороны вала.

К валу *1* радиуса R_1 наплавляющим роликом-электродом *2* радиуса R_2 с силой F прижимаются две ка-

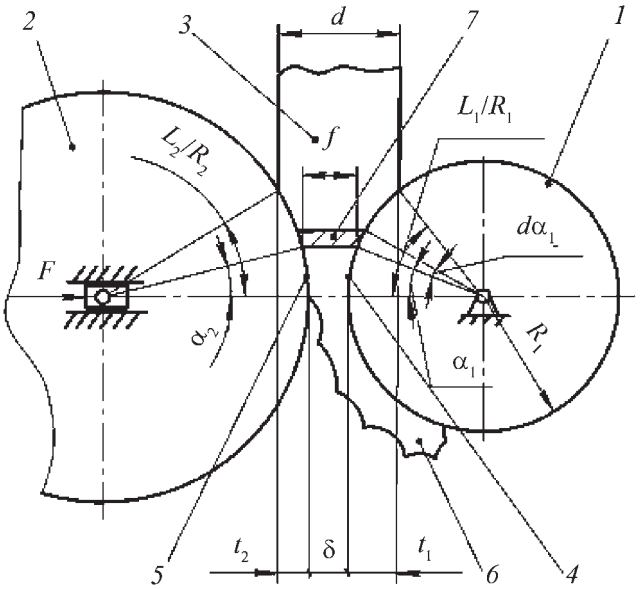


Рис. 2. Формирование металлопокрытия при контактной приварке двух проволок с одной стороны вала:
1 – вал; *2* – направляющий ролик-электрод; *3* – присадочные проволоки; *4* – контактная площадка со стороны вала; *5* – контактная площадка со стороны ролика-электрода; *6* – металлопокрытие; *7* – элементарная призма

сающиеся друг друга присадочные проволоки *3* диаметром *d*. При прохождении импульса тока присадочный металл разогревается и осаживается, образуя контактные площадки *4* и *5* длинами L_1 и L_2 соответственно с поверхностями вала и инструмента. Осадка проволок со стороны вала t_1 больше осадки t_2 со стороны ролика-электрода, так как $R_2 >> R_1$. Валик *6* металлопокрытия имеет толщину δ. В присадочном металле выделена элементарная призма *7* шириной *f*, положение которой определяется углами α_1 и α_2.

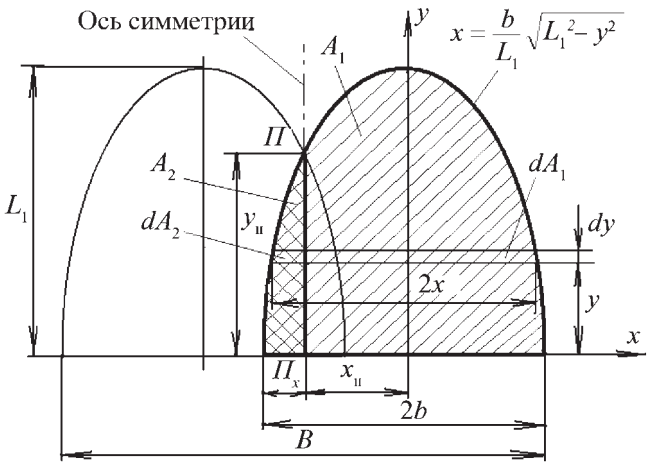


Рис. 3. Развертка контактной площадки между валом и присадочным металлом

Геометрические параметры единичной площадки на рис. 2 связаны соотношениями

$$t_1 + t_2 + \delta = d; \quad \cos\alpha_{1,2} = (R_{1,2} - t_{1,2}) / R_{1,2};$$
$$R_1 \sin\left(\frac{L_1}{R_1}\right) = R_2 \sin\left(\frac{L_2}{R_2}\right). \qquad (1)$$

На рис. 3 показана развертка контактной площадки между присадочным металлом и цилиндрической поверхностью вала. При приварке двух проволок развертка площадки контакта представляет собой симметричную фигуру, контур которой ограничен перекрывающимися по ширине на величину $2\Pi_x$ половинами эллипсов.

Определение поперечной деформации присадочной проволоки

В работах [7, 8] исследуется форма поперечного сечения сварного валика при приварке одной присадочной проволоки по технологическим схемам на рис. 1, *а*, *б*. Расчетные зависимости, полученные с большим количеством допущений и упрощений, экспериментами не подтверждаются. Форма поперечного сечения сдвоенного сварного валика не исследована. Поэтому целесообразно ширину сдвоенного сварного валика *B* каждый раз замерять после приварки проволок на конкретном исследуемом режиме.

Можно также для определения поперечной деформации воспользоваться результатами экспериментов, приведенных на рис. 4.

На валы различного диаметра по винтовой линии производили приварку одной или одновременно двух присадочных проволок диаметрами *d* = 1,6; 1,8; 2,2 мм. Режимы приварки каждый раз устанавлива-

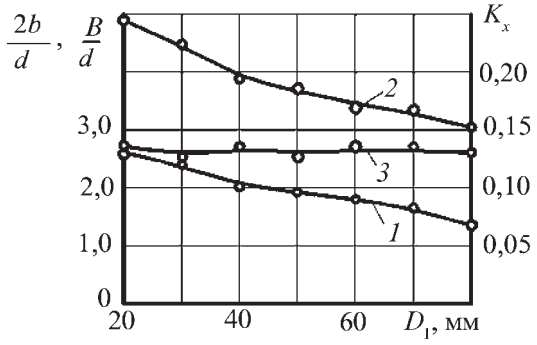


Рис. 4. Экспериментальные значения показателей поперечной деформации присадочной проволоки при КПП валов различных диаметров (при ε_y = 0,45 … 0,47 и D_2 = 300 мм):
1 – относительная ширина одиночного сварного валика $2b/d$; *2* – относительная ширина сдвоенного валика B/d; *3* – коэффициент перекрытия сдвоенного валика K_x

лись оптимальными, обеспечивающими максимально возможную прочность сварного соединения и соответствующими предельному значению относительной осевой присадочных проволок $\varepsilon_y = 0{,}45 \ldots 0{,}47$.

После наварки замеряли ширину валика $2b$ при приварке одной проволоки или же ширину сдвоенного валика B и определяли коэффициент перекрытия сдвоенного валика:

$$K_x = \frac{2\Pi_x}{2b} = \frac{4b - B}{2b} = 2 - \frac{B}{2b}. \qquad (2)$$

При наплавке при оптимальных по критерию "прочность сварного соединения" режимах безразмерные относительные значения ширины валиков уменьшаются с увеличением диаметра вала D_1 и могут быть определены по эмпирическим зависимостям

$$\frac{2b}{d} = -0{,}723\ \ln(D_1) + 4{,}79\ ;\ \frac{B}{d} = -1{,}34\ \ln(D_1) + 8{,}92\ , \qquad (3)$$

где D_1 – диаметр вала, мм.

Установлено также, что коэффициент перекрытия K_x меняется в пределах 0,12...0,14.

Структура формируемого металлопокрытия получается наиболее однородной, если шаг S одновременной приварки двух проволок по винтовой линии выбирается из условия обеспечения перекрытия сдвоенных сварных валиков, равного $2\Pi_x$.

Геометрия контакта при приварке двух проволок

В результате каждого термомеханического цикла на поверхность вала наваривается порция металла, которую принято называть единичной площадкой металлопокрытия. Процесс формирования единичной площадки металлопокрытия иллюстрируется схемами на рис. 2 и 3. Высота такой площадки δ (толщина металлопокрытия) зависит от диаметра проволоки d, шага наплавки по винтовой линии S и относительной осевой деформации присадочной проволоки ε_y и может быть определена без непосредственного измерения по зависимости [5]

$$\delta = \frac{\pi d^2}{4S\,(1 + \varepsilon_y)}. \qquad (4)$$

Определим площадь одной половины A симметричной фигуры, как разницу площади A_1 под эллипсом и площади A_2 криволинейного треугольника на рис. 3:

$$A = A_1 - A_2\ . \qquad (5)$$

Элементарная площадка первой фигуры имеет площадь

$$\begin{aligned} dA_1 &= 2x\ dy = 2\frac{b}{L_1}\sqrt{L_1^2 - y^2}\ dy = \\ &= 2\frac{b\,R_1}{L_1}\sqrt{L_1^2 - (R_1\ \alpha_1)^2}\ d\alpha_1\ , \end{aligned} \qquad (6)$$

а полная площадь этой фигуры равна

$$A_1 = \int_0^{L_1} dA_1 = 2\frac{b\,R_1}{L_1}\int_0^{L_1/R_1}\sqrt{L_1^2 - (R_1\ \alpha_1)^2}\ d\alpha_1\ . \qquad (7)$$

Координаты точки Π – точки эллипса на оси симметрии развертки равны

$$x_\Pi = \Pi_y - b\ ;\quad y_\Pi = \frac{L_1}{b}\sqrt{b^2 - x_\Pi^2}\ . \qquad (8)$$

Ширина элементарной площадки криволинейного треугольника равна $x - (b - \Pi_x)$, площадь выделенного элемента $dA_2 = (x - b + \Pi_x)\,dy$. Полная площадь отсеченной части контактной площадки равна

$$A_2 = R_1\int_0^{y_\text{п}/R_1}\left(\frac{b}{L_1}\sqrt{L_1^2 - (R_1\ \alpha_1)^2} - b + \Pi_x\right)d\alpha_1\ . \qquad (9)$$

Таким образом, площадь всей контактной площадки на рис. 3 равна

$$\begin{aligned} 2A &= 4\frac{b\,R_1^2}{L_1}\int_0^{L_1/R_1}\sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2}\ d\alpha_1 - \\ &- 2R_1\int_0^{y_\text{п}/R_1}\left(\frac{b\,R_1}{L_1}\sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2} - b + \Pi_x\right)d\alpha_1\ . \end{aligned} \qquad (10)$$

Аналогично определим объем пластически деформируемого за один термомеханический цикл присадочного металла, заключенного между валом и роликом-электродом. Из объема V_1 присадочного металла, заключенного между контурами полуэллипсов на цилиндрических поверхностях детали и инструмента, вычтем объем присадочного металла V_2 между криволинейными треугольниками:

$$V = V_1 - V_2\ . \qquad (11)$$

Для определения объема V_1 определим геометрические размеры элементарной призмы *7* на рис. 2.

Длина элементарной призмы

$$f = R_1 + R_2 + \delta - R_1\ \cos\alpha_1 - \sqrt{R_2^2 - R_1^2\ \sin^2\alpha_1}\ . \qquad (12)$$

Ширину призмы определяем по рис. 3 как

$$2x = 2b\sqrt{1 - \frac{y^2}{L_1^2}} = \frac{2b\ R_1}{L_1}\sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2}\ . \qquad (13)$$

Высота элементарной призмы

$$dh_1 = R_1\ d\alpha_1\ \cos\alpha_1\ . \qquad (14)$$

Объем выделенной элементарной призмы равен

$$dV_1 = f\ 2x\ dh_1\ . \qquad (15)$$

Полный объем первой фигуры равен

$$V_1 = \frac{2b\ R_1^2}{L_1} \int_0^{L_1/R_1} \sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2} \times$$
$$\times (R_1 + R_2 + \delta - R_1\ \cos\alpha_1 - \sqrt{R_2^2 - R_1^2\ \sin^2\alpha_1}\ ) \times \qquad (16)$$
$$\times \cos\alpha_1\ d\alpha_1\ .$$

Ширина элементарной призмы в объеме отсеченной части равна $x - (b - \Pi_y)$, оставшиеся два ее размера не отличаются от размеров f и dh_1 первой элементарной призмы. Таким образом,

$$dV_2 = \left(\frac{b\ R_1}{L_1} \sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2} + \Pi_x - b \right) \times$$
$$\times (R_1 + R_2 + \delta - R_1\ \cos\alpha_1 - \sqrt{R_2^2 - R_1^2 \sin^2\alpha_1}\ ) \times \qquad (17)$$
$$\times\ R_1 \cos\alpha_1\ d\alpha_1\ .$$

Полный объем V_2 присадочного металла между криволинейными треугольниками равен

$$V_2 = R_1 \int_0^{y_1/R_1} \left(\frac{b\ R_1}{L_1} \sqrt{(L_1/R_1)^2 - \alpha_1^2} + \Pi_x - b \right) \times$$
$$\times (R_1 + R_2 + \delta - R_1\ \cos\alpha_1 - \sqrt{R_2^2 - R_1^2\ \sin^2\alpha_1}\ ) \times \qquad (18)$$
$$\times \cos\alpha_1\ d\alpha_1\ .$$

Тепловой баланс при формировании единичной площадки металлопокрытия

В общем виде уравнение теплового баланса при формировании единичной площадки можно записать как

$$Q = Q_{св} + Q_1 + Q_2\ , \qquad (19)$$

где $Q_{св}$ – количество тепла, необходимое для нагрева до пластического состояния порции металла между деталью и роликом-электродом [9]; Q_1 и Q_2 – тепло, отводимое за время $t_и$ одного импульса тока от сварной точки соответственно в деталь и ролик-электрод.

Из-за малой толщины металлопокрытия δ, измеряемой десятыми долями миллиметра, отвод тепла в ранее наплавленную площадку и смежный валик металлопокрытия незначительный.

Составляющие в уравнении (17) равны

$$Q_{св} = c_{пр}\ \rho_{пр}\ V_1\ T\ ; \qquad (20)$$

$$Q_1 = A_1\ \sqrt{\alpha_1\ t_и}\ c_1\ \rho_1\ T\ ; \qquad (21)$$

$$Q_2 = A_2\ \sqrt{\alpha_2\ t_и}\ c_2 \rho_2\ T\ . \qquad (22)$$

Обозначения в формулах (20)–(22): $c_{пр}$, c_1, c_2 – средние удельные теплоемкости соответственно металла проволоки, детали и ролика-электрода в температурном интервале от 0 до температуры T нагрева стали; $\rho_{пр}$, ρ_1, ρ_2 – соответствующие плотности металлов; $\alpha_{пр}$, α_1, α_2 – коэффициенты температуропроводности металлов проволоки, детали и ролика-электрода.

Выводы

1. Предложен метод восстановления валов, основанный на одновременной односторонней контактной приварке двух стальных проволок по винтовой линии, который имеет ряд преимуществ по сравнению с традиционно применяемыми процессами КПП, а именно: обладает высокой производительностью, легко внедряется в производство, отличается удобством обслуживания установки, благоприятными и безопасными условиями работы оператора-наплавщика.

2. Технологические параметры режима КПП предлагаемым методом могут быть определены на основе деформационных и тепловых расчетов, выполненных с учетом специфики процесса.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Амелин Д.В., Рыморов Е.В.** Новые способы восстановления и упрочнения деталей машин электроконтактной наваркой. М.: Транспорт, 1995. 303 с.

2. **Логинов Г.П., Дубровский В.А.** Электроконтактная наплавка проволокой – эффективный способ восстановления изношенных деталей машин // Автоматизация и современные технологии. 1998. № 7. С. 10–12.

3. **Нафиков М.З., Загиров И.И., Игнатьев А.Г.** Остаточные напряжения в металлопокрытии, нанесенном электроконтактной наплавкой // Технология металлов. 2008. № 9. С. 29–33.

4. **Кочергин К.А.** Контактная сварка. Л.: Машиностроение, 1987. 240 с.

5. **Нафиков М.З.** Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 9. С. 24–29.

6. **Нафиков М.З., Загиров И.И.** Математическая модель формирования соединения при электроконтактной наплавке (наварке) проволоки // Технология машиностроения. 2008. № 6. С. 62–66.

7. **Дубровский В.А., Булычев В.В., Пономарев А.И.** Предотвращение выплесков при электроконтактной наварке проволокой из стали 40Х13 // Сварочное производство. 2003. № 6. С. 12–15.

8. **Соколов Л.Н., Катренко В.Т., Пресняков В.А. и др.** Расчет геометрических размеров контакта между присадочной проволокой и электродом при электроконтактной наплавке // Сварочное производство. 1987. № 10. С. 43–44.

9. **Нафиков М.З.** Методика определения сопротивления пластической деформации присадочной проволоки при электроконтактной наплавке // Сварочное производство. 2008. № 3. С. 19–22.

УДК 621.891

В.А. Погонышев, В.В. Логунов
(Брянская государственная сельскохозяйственная академия)
E-mail:Pog@BGSHA.com

Повышение износостойкости шеек коленчатого вала путем нанесения пленок пластичных металлов

Рассмотрено взаимодействие медной пленки, нанесенной на поверхности трения, и жидкостной пленки. Исследованы смазочные свойства масла на поверхности шеек коленчатого вала. Получена в ходе эксперимента формула, выражающая зависимость величины износа от соотношения толщины медной пленки и смазки.
Ключевые слова: *износ, трение, смазка, пленка.*

This study deals with interaction between a copper film, applied to a surface of friction, and a liquid film. Oil lubricant properties on the surface of the crankshaft necks have been investigated. In the course of the experiment the authors developed a formula which expresses dependence of a degree of wear on a copper film thickness and lubrication.
Keywords: *wear, friction, lubrication, film.*

Цель работы – исследование влияния толщин пленки и смазочного слоя на демпфирующие свойства узла трения. Как известно, медная пленка, полученная методом ФАБО (*финишная антифрикционная безабразивная обработка*), и смазка способствуют улучшению условий приработки, снижению коэффициента трения и износа поверхностей скольжения деталей машин. В процессе работы двигателя масло изменяет свои свойства в зависимости от условий и состояния двигателя. По состоянию масла можно судить об износе двигателя и ресурсе масла. Для этого были проведены опыты, которые состояли в следующем [1]. Ресурс масла устанавливается по цвету растекания масла на пористой бумаге. Чем темнее и больше центральная часть масляного круга на бумаге, тем меньше его остаточный ресурс.

Износ двигателя определяли по температуре вспышки масла. Сравнивали масло до и после эксплуатации (отработку). Подвергали образцы масла нагреванию до его воспламенения. При этом фиксировалась температура во время возгорания масла термометрами с рабочей шкалой до 350 °С. Было замечено, что температура воспламенения отработанного масла всегда ниже температуры исходного. Это объясняется тем, что в отработанное масло проникают пары бензина. Так, например, температура возгорания исходного масла Shell (10W-40) равна 250 °С, а отработанного – 220 °С, Shell (SAE 20W-50) исходного – 270 °С, отработанного – 230 °С. Надо отметить, что импортные масла Shell, по данным наших экспериментов, имеют температуру возгорания выше (250...270 °С), чем отечественные М8Г$_1$, М8В, М6$_3$/12Г$_1$ (220...260 °С).

В ходе эксперимента были исследованы образцы из стали 45 с медной пленкой и без пленки (рисунок). Особая роль отводилась усталостному износу, который обусловлен дискретным характером фрикционного контакта. Это означает, что в процессе внешнего трения происходит многократное деформирование поверхностей шеек коленчатого вала в отдельных пятнах фактического контакта, которое приводит к разрушению и последующему отделению материала. Степень и частота деформирования зависят как от температуры, скорости скольжения и давления, так и от геометрии и состояния поверхностного слоя.

Интенсивность изнашивания рассчитывается по формуле

$$I = C\,(p_{\text{а}}\, f\,/\,E)^{\gamma L-1}\,\Delta^{f(1-\gamma)/2}\,, \qquad (1)$$

где C – константа; $L = H\,/\,h$ – отношение толщины медной пленки к толщине слоя масла; f – коэффициент трения скольжения; E – модуль Юнга; Δ – макси-

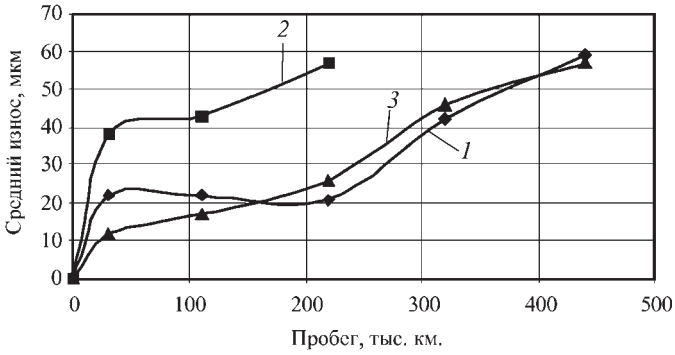


Рис. Износ антифрикционных сплавов:
1 – с медной пленкой; *2* – без пленки; *3* – медно-оловянная пленка

мальное отклонение формы; p_a – номинальное давление;

$$\gamma = 1/(2\,\omega + 1)\,, \qquad (2)$$

где ω – частота вращения детали.

Из экспериментальной формулы видно, что если отношение меньше единицы, то износ стремится к минимальному значению. Предельное значение равно 1. Данная формула позволяет прогнозировать величину износа и ведет к выбору оптимальной толщины медной пленки.

Предварительные натурные испытания многослойных пленок пластичных металлов, полученных методом ФАБО, восстановленных поверхностей трения, производились в лаборатории трения Брянской сельскохозяйственной академии. На поверхность шеек коленчатого вала была нанесена методом фрикционного натирания двухслойная медно-оловянная пленка. Испытания полученных покрытий производили на машинах "трения 2070 СМТ-1" в соответствии с работой [1].

Приведенные в работе [1] данные о кинетике коэффициента трения могут быть использованы для прогнозирования работы узлов, функционирующих некоторое время без смазки в режиме циклических перемещений. Сделан вывод о том, что для повышения долговечности трибосопряжений необходимо наносить на поверхность трения мягкие металлические покрытия.

Важна оценка контактных деформаций при повторном нагружении контактирующих шероховатых поверхностей в связи с задачей определения оптимального режима нанесения пленки. В случае контактирования при первом нагружении осуществлялось пластическое смятие вершин микровыступов.

При внедрении сферического индентора в упругопластический материал в нем образуется пластический отпечаток. Аналогично подбору физико-механических характеристик контактирующих пар, микрогеометрии их поверхностей, методу, использованному в работе [2], контакт при повторном нагружении рассматривается как упругий контакт сферы радиусом кривизны R_1. То, что радиус кривизны восстановленного отпечатка существенно больше радиуса кривизны индентора, отмечалось в ряде работ, в частности [2, 3]. При этом упругое восстановление радиуса проекции отпечатка r_n незначительно.

Выводы

1. Формула (1) позволяет прогнозировать величину износа и ведет к выбору оптимальной толщины медной пленки.

2. Упругая и пластическая деформации существуют совместно, возрастая с ростом нагрузки, которая приводит к изменению относительного вклада упругих и пластических деформаций, что выражается в упрочнении материала среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Погонышев В.А., Романеев Н.А., Панов М.В.** Триботехника в сельском хозяйстве. Монография. Брянск: Из-во Брянской ГСХА. 2010. 480 с.

2. **Суслов А.Г.** Качество поверхностного слоя деталей машин. М.: Машиностроение, 2000. 320 с.

3. **Погонышев В.А.** Физика фреттинг-изнашивания. Брянск: Изд-во Брянского ГСХА, 1999. 159 с.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.
Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Подживодов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.*
Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 01.04.13 г. Подписано в печать 16.05.13 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер ", 115407, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4