

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 16
2020
№ 3 (183)
март

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета

д.т.н., проф., заслуженный
деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф. В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф. А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф. О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.

В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.

А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.

В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.

Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, д.т.н., проф.

В.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.

В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО

Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.

Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.

В.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.

А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.

В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.

М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.
Ян СУХАНЭК

Мариан СЧЕРЕК
Войтек ХОМИК

Редакция:

О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индекс по каталогу "Пресса России" 39269) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Роскомнадзоре.
Свидетельство о регистрации ПИ № ФС 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Зайдес С.А., Машуков А.Н., Дружинина Т.Я. Повышение качества контактных поверхностей затворного узла арматуры высокого давления алмазным выглаживанием 99



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Иванов В.И. Этапы развития и перспективы метода электроискрового легирования в России 105



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Стрельников И.А., Пестряев Д.А., Садетдинов Ш.В. Коррозионные характеристики углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств 112



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Эдигаров В.Р. Технологическое обеспечение закономерно изменяющихся параметров качества обрабатываемого поверхностного слоя детали 116



УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Копылов В.И., Пашенко В.Н., Свиточ И.О. Активация формирования структуры и управление свойствами хромоникелевых плазменных покрытий с наноставляющими 123



МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ НАНОСТРУКТУР

Кортаев Д.Н., Полещенко К.Н., Еремин Е.Н., Тарасов Е.Е. Влияние кластерно-градиентной архитектуры наноструктурных топокомпозитов на особенности трибовзаимодействия с гетерофазным материалом 130

Шмермбекк Ю., Мигас Д.Б., Гутковский А.И., Гречихин Л.И. Эмиссионный портрет поверхности упрочняющего конструкционного материала 136

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 по группам научных специальностей: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 16
2020
№ 3 (183)
March

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 Assistant

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

V.P. BALKOV

V.M. BASHKOV

A.I. BELIKOV

A.I. BOLDYREV

S.N. GRIGORIEV

V.E. GROMOV

S.A. KLIMENKO

Yu.R. KOPYLOV

N.K. KRIONI

V.P. KUZNETSOV

V.A. LEBEDEV

V.V. LYUBIMOV

E.D. MAKARENKO

B.Ya. MOKRITSKY

F.I. PANTELEENKO

H.M. RAKHIMYANOV

B.P. SAUSHKIN

V.V. SLEPTSOV

V.P. SMOLENTSEV

A.M. SMYSLOV

G.A. SUKHOICHEV

V.P. TABAKOV

V.A. SHULOV

M.L. KHEIFETS

Jan SUCHANEK

Marian SZCZEREK

Wojciech HOMIK

Edition:

O.S. LUKASHENKO

A.V. ORLOVA

E.A. SERIKOVA

CONTENTS



MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Zaydes S.A., Mashukov A.N., Druzhinina T.Ya. Improving of quality of gate assembly contact surfaces of high-pressure fittings by diamond burnishing 99



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Ivanov V.I. Stages of development and prospects of electrospark doping method in Russia 105



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Strel'nikov I.A., Pestryaev D.A., Sadetdinov Sh.V. Corrosion characteristics of carbon steel in solutions of synthetic detergents 112



PROCESSING BY COMBINED METHODS

Edigarov V.R. Technological support of regularly changing quality parameters of processed superficial layer of part 116



STRENGTHENING NANOTECHNOLOGY

Kopylov V.I., Pashchenko V.N., Svitoch I.O. Activation of structure formation and control of properties of chromium-nickel-plasma coatings with nanocomponents 123



MATERIAL SCIENCE OF NANOSTRUCTURES

Korotaev D.N., Poleshchenko K.N., Eremin E.N., Tarasov E.E. Effect of cluster-gradient architecture of nanostructured topocomposites on features of tribointeraction with heterophased material 130

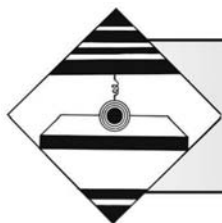
Shmermbekk Yu., Migas D.B., Gutkovsky A.I., Grechikhin L.I. Emission portrait of surface of reinforcing structural material 136

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 according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" 39269) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Roskomnadzor. The certificate of registration ПИ № ФС 77-63956. 09.12.2015



С.А. Зайдес, А.Н. Машуков, Т.Я. Дружинина
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)
E-mail: zsa@istu.edu

Повышение качества контактных поверхностей затворного узла арматуры высокого давления алмазным выглаживанием

Контактный пояс затворного узла является главной частью арматуры высокого давления. От герметичности и качества сопрягаемых поверхностей зависит работоспособность арматурного узла в целом. Технология алмазного выглаживания позволяет повысить сопряжения узлов путем снижения шероховатости поверхности уплотнения металл по металлу. Показан реальный опыт улучшения контактного пояса арматуры за счет применения алмазного выглаживания седел патрубков и конусной поверхности штоков.

Ключевые слова: алмазное выглаживание, гладилка, шток высокого давления, седло патрубка, контактный пояс арматуры, герметичность.

The contact belt of the gate assembly is the main part of high pressure fittings. The serviceability of the fittings assembly as whole depends on the air-tightness and quality of the mating surfaces. The technology of diamond burnishing allows to increase the interface of the nodes by reducing the surface roughness of the metal-to-metal seal. The real experience for improving of the fittings contact belt due to the use of diamond burnishing of the nozzles seats and the conical surface of the rods.

Keywords: diamond burnishing, sleeker, high pressure rod, nozzle seat, fittings contact belt, air-tightness.

Введение

Клапаны высокого давления предназначены для снижения давления в трубопроводных системах высокого давления при его повышении сверхнормативных параметров, тем самым обеспечивая безопасный и безаварийный режим эксплуатации химических и нефтехимических предприятий. Клапаны высокого давления, являясь сложными высокотехнологичными изделиями химического машиностроения, работают при воздействии химически и механически агрессивных сред в температурном диапазоне 20...600 °С при рабочем давлении от 32 МПа и выше [1, 2].

Самые важные и ответственные элементы затворной и регулирующей арматуры высокого давления — поверхность седла патрубка и контактирующая с ней поверхность конуса штока. Истирание, увеличение шероховатости, деформации микрогеометрии, наличие высоких растягиваю-

щих напряжений на данных поверхностях заставляет производителей арматуры либо увеличивать контактные давления, либо применять методы, способные улучшить качество поверхности арматурных узлов. В противном случае арматура может потерять герметичность, что в свою очередь может привести к авариям на нефтехимических производствах. Производители арматуры также применяют методы, позволяющие формировать высокий уровень сжимающих остаточных напряжений на поверхности (обкатка шариками, роликами, дробеструйная обработка, наплавка и др.) [3—7].

Существующие технологии упрочнения поверхности патрубков высокого давления, одной из которых является наплавление износостойких материалов на поверхность контактного слоя, имеет ряд недостатков, которые проявляются в виде термических деформаций и разнообразных дефектов [1].

В технологии машиностроения известны разнообразные методы финишной обработки, среди

которых практическое применение получили такие способы, как точение, шлифование, полирование, финишная доводка, притирка [3–7]. Недостатки данных методов — локальный перегрев материала (прижоги), отсутствие сжимающих напряжений. Финишные методы притирки и полировки не убирают максимумы выступов микронеровностей.

Также очень важным параметром, влияющим на сопряжение затворных узлов арматуры, является волнистость поверхности. Экспериментальными исследованиями [8] установлено, что при таких видах упрочнения, как обкатка роликами, имеет место волнообразование (увеличение волнистости): на ранее гладкой поверхности появляются равномерно чередующиеся неровности — вершины и впадины. В условиях контактного нагружения (каковыми и являются закрытие и открытие затворных узлов) волнообразование приводит к быстрым поверхностным разрушениям, отрыву поверхностного слоя или его скалыванию, выходу на поверхность подповерхностных трещин [8].

Для отделочной обработки деталей повышенной точности из прочных конструкционных ма-

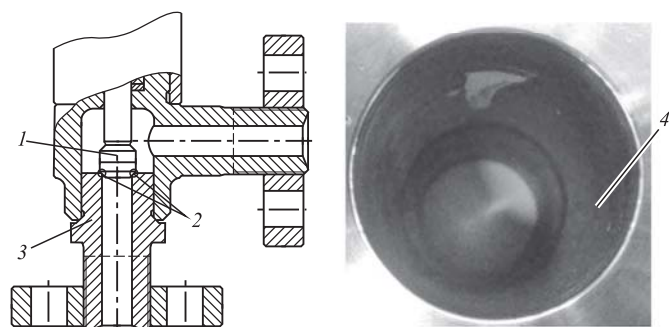


Рис. 1. Контактующий участок затворного узла арматуры высокого давления:

1 — шток арматуры высокого давления; 2 — контактный пояс патрубка и штока; 3 — патрубок арматуры высокого давления; 4 — контактный пояс седла



Рис. 2. Оборудование для экспериментальных исследований:

а — токарный обрабатывающий центр DMG NEF 400; б — измерительный комплекс Taylor Hobson Form Talysurf i200

териалов применяют алмазное выглаживание [9–11]. В работе [12] доказана эффективность алмазного выглаживания при обработке стали 20X13, которая склонна к технологической наследственности и сохранению микротвердости. Данная сталь, на которой выполнены эксперименты, применяется для изготовления затворных узлов арматуры высокого давления.

Основная проблема при проведении алмазного выглаживания контактного пояса штока и седла — малая ширина контактной поверхности седла (рис. 1).

Цель работы — выявить влияние способа алмазного выглаживания на улучшение микрогеометрии контактного пояса запорного клапана высокого давления, патрубка и штока.

Методика исследования

Алмазное выглаживание проводили на токарном обрабатывающем центре (рис. 2, а) DMG NEF400.

Учитывая угол скоса поверхности седла, изготовили державку с соответствующим наклоном под рабочий инструмент (рис. 3). Часть конуса рабочего инструмента, куда впаян алмаз, сточили на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 в связи с тем, что коническая часть инструмента при выглаживании будет задевать за верхнюю плоскость седла патрубка, препятствуя внедрению алмаза во внутреннюю часть контактного пояса. Схема контактирующих частей арматуры высокого давления приведена на рис. 1.

Поверхность седла патрубка перед выглаживанием была предварительно обработана на токарном обрабатывающем центре DMG NEF400 при подаче $S = 0,1$ мм/об, частота вращения заготовки 1000 мин^{-1} , глубина резания $t = 0,01$ мм. Обработка проведена для имитации поверхности с грубой обработкой и выявления влияния алмазного выглаживания на улучшение качества грубой исходной поверхности. Шток перед выглаживанием уже имел подготовленную полированием поверхность, так как шток и патрубок арматуры были выбраны случайно из серии подготовленных к использованию в арматуре высокого давления затворных узлов.

Измерения шероховатости поверхности осуществляли на профилометре Taylor Hobson Form Talysurf i200 (рис. 2, б). Прибор применяют для одновременного измерения размеров, формы и текстуры поверхностей деталей машин, включая радиусы и отверстия. Прибор дает возможность измерять параметры шероховатости в трудно-

доступных местах, что позволяет проводить измерения микрогеометрии поверхности контактного пояса седла патрубка арматуры высокого давления.

Выглаживание седла осуществляли на контактном поясе без применения финишных методов обработки в связи с тем, что в исследовании поставлена задача выявить влияние алмазного выглаживания не только на улучшение поверхности после применения финишных методов обработки, но и на повышение качества обработанной поверхности малой протяженности.

Поверхности штока и патрубка были выбраны из серии и в исходном состоянии отполированы, так как производитель арматуры считает, что полировка поверхности улучшит сопряжение затворных узлов и продлит ее срок службы.

Выглаживание проводили на контактном поясе седла патрубка DN40, имеющем угол скоса 45° , и контактной поверхности штока. Материал патрубков и штоков — сталь 20Х13. Для задания необходимой силы прижатия выглаживателя внедряли рабочий инструмент в материал заготовки, регистрируя полученные значения силы с помощью динамометрического комплекса Kistler Type 9129AA — 3-компонентный динамометрический комплекс для токарных станков в комплекте со штатным программным обеспечением (см. рис. 3).

Алмазное выглаживание выполняли при следующих режимах: частота вращения заготовки — 80 мин^{-1} , оптимальная сила прижатия, установленная по результатам работ [11, 13] — $F = 150 \text{ Н}$, подача — $0,01 \text{ мм/об}$. Для проведения выглаживания использована наклонная державка, позволяющая фиксировать угол установки инструмента. Для на-

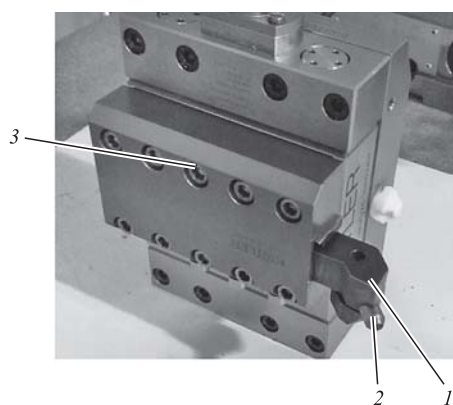


Рис. 3. Подготовленный к выглаживанию инструмент, установленный в динамометрический комплекс Kistler Type 9129AA:

1 — державка для выглаживателя с регулируемым углом; 2 — часть рабочего инструмента, срезанная для получения необходимого угла установки; 3 — динамометрический комплекс Kistler Type 9129AA

значения силы прижатия державка закреплена в динамометрическом комплексе Kistler Type 9129AA.

Для осуществления процесса выглаживания использовали алмаз, имеющий форму полусферы с профильным радиусом $0,5 \text{ мм}$. Ширина контактного пояса на седле составила 2 мм . Выглаживание контактного пояса и седла патрубка и штока проводили в один проход.

Твердость измеряли портативным твердомером Mitutoyo Hardmatic HH-411. Твердомер ударного действия Mitutoyo Hardmatic HH-411 предназначен для определения твердости по принципу отскока, стандартизирован согласно ASTM A956, имеет устройство автоматической компенсации погрешности измерения под углом, позволяет проводить измерения твердости металла, отображая полученные значения по шкалам Виккерса, Бриннеля, Роквелла, Шора, а также определять прочность на разрыв. Измерения твердости проведены по шкале Виккерса.

Результаты исследования и их обсуждение

По результатам проведенных исследований выполнили фотографии исходных и упрочненных поверхностей контактных узлов. Фото микрогеометрии контактного пояса патрубка и штока до и после выглаживания приведены на рис. 4 (см. обложку). Большое количество максимальных вершин микронеровностей штока было сглажено, микронеровности стремятся к нулевой линии высот, что показано зеленым цветом фона. На седле патрубка (рис. 4, з) выглаживатель уменьшил лишь небольшую часть контактной зоны, что видно по изменению края пояса до зеленого цвета, верхняя часть осталась слабо выглаженной, в этой зоне остались микронеровности, полученные грубой обработкой резцом.

Результаты измерения параметров шероховатости приведены в табл. 1. В связи с тем, что измерения шероховатости поверхности проводили бесконтактным оптическим методом, погрешность на контактном пояске была довольно высокой. Также необходимо учесть, что при подготовке контактного пояса к выглаживанию была сточена грань, в связи с чем шероховатость поверхности была довольно грубой после обработки резцом. Без применения финишных методов обработки параметр Ra превысил 10 мкм . Исследования контактного участка штока показали более точные результаты в связи с отсутствием сколов граней с высокой шероховатостью (шток был отполирован перед выглаживанием и не подвергался воздействию резца).

Изменение параметров шероховатости и волнистости поверхности контактных узлов арматуры высокого давления седла патрубка и штока

Наименование детали	Параметры шероховатости и волнистости поверхности, мкм									
	R_p	R_q	R_v	R_t	R_c	R_a	R_z	W_z	W_t	W_s
Шток до выглаживания	3,431	2,566	-13,839	17,27	1,539	1,328	2,412	0,208	12,29	6,7
Шток после выглаживания	0,6958	0,199	-0,5627	1,916	0,758	0,1585	1,367	0,16	3,66	5,5
Седло патрубка до выглаживания	11,109	12,07	-19,101	50,21	3,226	10,32	25,583	—	—	—
Седло патрубка после выглаживания	3,44	1,808	-7,124	10,564	0,970	1,642	11,21	—	—	—

Таким образом, установлено, что по результатам выглаживания основные параметры шероховатости для штока уменьшились: R_a с 1,328 до 0,1585 мкм, а R_z — с 2,412 до 1,367 мкм. Как видно из табл. 1, после алмазного выглаживания произошло снижение других параметров шероховатости. Снижение параметра R_v показывает уменьшение глубин впадин (борозд) шероховатости поверхности. Процесс выглаживания также благотворно повлиял на снижение параметров R_c — средней высоты элементов профиля и R_t — общей высоты профиля поверхности. На штоке также хорошо видно, как изменилось, увеличившись, расстояние между вершинами R_p (максимальная длина профиля), R_q (среднеквадратичное отклонение оцениваемого профиля) также снизилось — вершины микрогеометрии стали более пологими и низкими.

Также на протяженной поверхности конуса штока до и после выглаживания провели измерения параметров волнистости поверхности (см. табл. 1). Как показывают измерения, произошло снижение максимальной высоты волны W_t в 4 раза, на 20 % снизилось среднее арифметическое значение высоты волнистости W_z , полученное по результатам пяти измерений (измерения параметров волнистости контактного пояса седла патрубка не проводили в связи с его малыми размерами, недостаточными для проведения измерений). Измерения также показали небольшое (на 10 %) уменьшение шага волнистости поверхности W_s (см. табл. 1).

Профилограммы поверхностей приведены на рис. 5, где L — длина участка поверхности затворного узла арматуры, на которой измерены параметры шероховатости. Как видно из профилограмм,

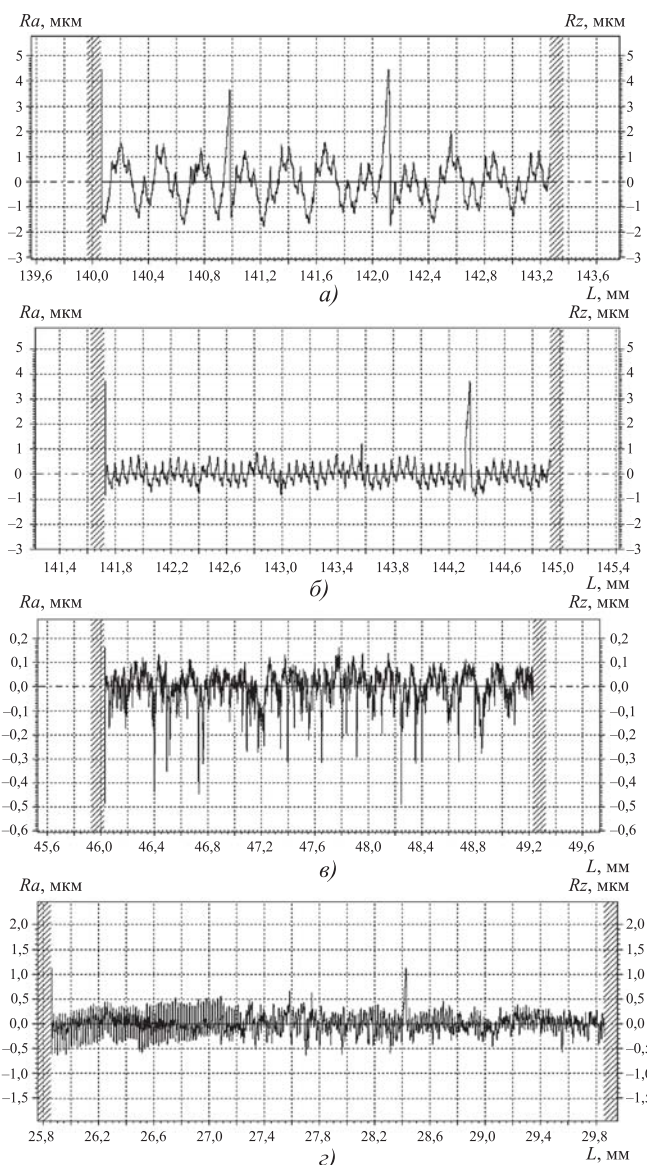


Рис. 5. Профилограммы поверхностей арматурных узлов:
 а — контактного пояса седла патрубка до выглаживания; б — контактного пояса штока до выглаживания; в — контактного пояса седла патрубка после выглаживания; з — контактного пояса штока после выглаживания

в результате алмазного выглаживания произошло значительное изменение микрогеометрии поверхности штока. На поверхности контактного пояса патрубка высокого давления улучшение поверхности не настолько значительное, в связи с тем, что исходная шероховатость была достаточно высокой, учитывая то, что закругление грани седла удалили резцом (см. рис. 1).

Топографии исходной и выглаженной поверхности приведены на рис. 6 (см. обложку). Из топографии поверхности видно, что при выглаживании контактного пояса штока наиболее глубокие борозды устранены, большая часть протяженных микронеровностей удалена, вместо борозд остались более редкие выступы вершин микрогеометрии. Рельеф контактной поверхности более упорядоченный, острые вершины представлены в единичных местах, протяженных высоких вершин стало заметно меньше, что является благоприятным для более плотного контакта двух поверхностей, что поможет уменьшить контактное давление в местах соприкосновений и улучшить герметичность соединения.

После проведения исследований контактного пояса седла патрубка и штока проведены измерения твердости в четырех сечениях равномерно по окружности контактного пояса и конической части штока.

Измерения твердости контактной поверхности патрубка и контактной поверхности штока показали равномерное повышение. Твердость патрубка и штока равномерно увеличилась на 10 HV (табл. 2).

По требованиям нормативных документов [14] разность твердости между седлом патрубка высокого давления и коническим штоком должна составлять не менее 8 HV. Патрубок принимается более твердым, шток — более мягким.

Равномерное повышение твердости на поверхностях как седла патрубка, так и штока после ал-

мазного выглаживания является достоинством метода и позволяет избежать проблем, свойственных упрочнению наплавляемыми материалами, также не требует проведения дополнительной термообработки для выдержки диапазона твердости в 8 HV (как это необходимо при выполнении наплавки седла).

Проведенные исследования показывают преимущества используемой технологии алмазного выглаживания перед другими технологиями, применяемыми для упрочнения и улучшения контактных поверхностей арматурных узлов такими, как хонингование, шлифование, полирование, финишная притирка и др.

Заключение

Алмазное выглаживание опробовано при выглаживании поверхностей с большой и малой шероховатостью. При грубо обработанной исходной поверхности параметр шероховатости *Ra* снижается на 83 %, при обработке поверхности с малым исходным параметром шероховатости *Ra* снижается на 90 %. Аналогичные закономерности получены и для других параметров шероховатости поверхности.

Необходимое соотношение твердости седла патрубка высокого давления и штока сохраняется и после проведения алмазного выглаживания, что позволяет не проводить обычно необходимую для подбора разницы в твердости арматурных узлов термообработку.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Nikolaeva E., Mashukov A.** Evaluation of residual stresses in lock valve elements of petrochemical productions // Matec web of conferences 129. International Conference on Modern Trends in Manufacturing Technologies and Equipment, ICMTMTE 2017, 06006 (2017).
2. **Погодин В.К.** Запорные клапаны на высокие параметры эксплуатации. Исследования и проектирование. Братск: Изд-во Братского государственного университета, 2016. 363 с.
3. **Снижение** теплового фактора при плоском абразивном шлифовании / В.М. Тонконогий и др. // Технические науки и технологии. 2017. № 4 (10). С. 16–26.
4. **Material** modifications caused by thermal and mechanical load during / S. Jermolajeva, J. Eppb, C. Heinzela, E. Brinksmeiera // 3rd CIRP Conference on Surface Integrity (CIRP CSI) / Procedia CIRP. 2016. Vol. 45. P. 43–46.
5. **Вулых Н.В., Гайсин С.Н.** Сравнение эффективности использования многодисковых шлифовальных головок при формировании уплотнительной поверхности затворного узла трубопроводной арматуры //

Таблица 2

Результаты измерения твердости поверхностей затворных узлов

Наименование детали	Твердость HV в сечении			
	1	2	3	4
Патрубок до выглаживания	370	368	370	370
Патрубок после выглаживания	379	377	379	378
Шток до выглаживания	378	378	376	378
Шток после выглаживания	388	389	387	389

Вестник Иркутского государственного технического университета. 2019. № 23 (1). С. 8—15.

6. **Gao S., Yang C., Xu J. et al.** Optimization for internal traverse grinding of valves based on wheel deflection // The international Journal of advanced manufacturing technology. 2017. Vol. 38. No. 1—4. P. 1105—1112.

7. **Скрябин В.А.** Этапы обработки при восстановлении запорных деталей трубопроводной арматуры // Саранск. 2016. Т. 26. № 2. С. 228—245.

8. **Эрлих Л.Б., Кособудский В.А., Вершинин Л.И.** Волнообразование на обкатываемых поверхностях. М.: Наука, 1973. 50 с.

9. **Пешков П.А., Лунин В.В., Букатый А.С.** Применение алмазного выглаживания с целью обеспечения герметичности хромового покрытия поршней гидроцилиндров // Международная молодежная научная конференция "XIV Королёвские чтения", посвященная 110-летию со дня рождения академика С.П. Королева, 75-летию КуАИ-СГАУ-СамГУ Самарского университета и 60-летию со дня запуска первого искусственного спутника Земли: сб. тр. В 2 т. Самара, 2017. С. 154—155.

10. **Машуков А.Н., Зайдес С.А.** Алмазное выглаживание как перспективный метод упрочнения затворных

узлов трубопроводной арматуры высоких параметров // Школа аспирантов: сб. статей Всероссийской научной конференции. Иркутск, 2017. С. 9—16.

11. **Зайдес С.А., Машуков А.Н.** Влияние скоростных режимов процесса алмазного выглаживания на улучшение качества поверхности затворных узлов арматуры высокого давления // Жизненный цикл конструктивных материалов (от получения до утилизации): материалы IX Всероссийской научно-технической конференции с международным участием, 24—26 апреля 2019 г. Иркутск: Изд-во ИРНТУ, 2019. С. 81—88.

12. **Кулинский А.Д., Бутенко В.И., Гусакова Л.В.** Определение склонности материала к технологической наследственности при отделочной-упрочняющей обработке поверхностей деталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 1 (145). С. 9—13.

13. **Зайдес С.А., Машуков А.Н.** Применение технологии алмазного выглаживания для улучшения микрогеометрии затворных узлов арматуры высокого давления // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2019. № 1. С. 5—13.

14. **Стандарт ЦКБА СТ ЦКБА 068-2008.** Арматура трубопроводная. Затворы запорных клапанов с уплотнением металл по металлу.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



СПРАВОЧНИК ТЕХНОЛОГА

Под общей редакцией А.Г. Сулова

Цена 9500 руб.

2019 г. 800 с.

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

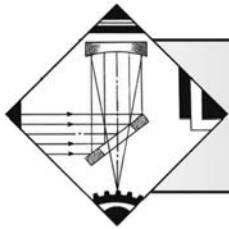
Приведена нормализованная технологическая документация для разработки технологических процессов. Впервые изложена методология технологической подготовки цифровых производств.

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

ПРИБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ

по e-mail: realiz@mashin.ru

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



В.И. Иванов

(Федеральный научный агроинженерный центр "ВИМ", г. Москва)

E-mail: tehnoinvest-vip@mail.ru

Этапы развития и перспективы метода электроискрового легирования в России

Дан анализ развития электроискрового метода нанесения покрытий на токопроводящие материалы — электроискрового легирования (ЭИЛ). Рассмотрены три этапа развития этого метода: первый (1943—1961 гг.) — создание и становление метода ЭИЛ, который связан с непосредственной деятельностью основоположников применения искрового разряда супругов Б.Р. и Н.И. Лазаренко; второй (1961—1991 гг.) — устойчивое развитие метода ЭИЛ; третий (1991 г. — по настоящее время) — неуправляемое и неустойчивое развитие метода ЭИЛ. В советское время метод ЭИЛ наиболее успешно развивался научно-исследовательскими центрами Молдавии и Украины. Возможность создания подобных центров ЭИЛ в России не рассматривалась, хотя существуют отдельные лаборатории и группы ученых, продолжающие работать в направлении исследования и применения метода ЭИЛ.

Ключевые слова: электроискровая обработка, электроискровое легирование, установка, электродный материал, технология, покрытие.

The analysis of the development of the electrospark method of applying coatings on conductive materials — electrospark doping (ESA) is presented. Three stages of the development of this method are considered: the first (1943—1961) — the creation and establishment of the ESA method, which is connected with the direct activity of the founders of the spark discharge of the spouses B.R. Lazarenko and N.I. Lazarenko; the second (1961—1991) — the sustainable development of the ESA method; the third (1991—to the present) — the uncontrolled and unsustainable development of the ESA method. In Soviet times, the ESA method was most successfully developed by research centers of Moldova and Ukraine. The possibility of creating such ESA centers in Russia was not considered, although there are some laboratories and scientific community, who continue to work towards the research and application of the ESA method.

Keywords: electrospark machining, electrospark doping, installation, electrode material, technology, coating.

Началом истории практического использования искрового разряда послужила задача, связанная с борьбой против электрической эрозии материалов и созданием безызносных электрических контактов. Эта задача была поставлена перед Б.Р. Лазаренко после окончания учебы в МГУ и поступления его на работу во Всесоюзный электротехнический институт. Решение этой задачи явилось началом новой эры обработки металлических материалов без механического воздействия. Оно нашло отражение в авторском свидетельстве "Способ обработки металлов и других токопроводящих материалов", полученным супругами Борисом Романовичем и Натальей Иоасафовной Лазаренко.

Это событие ознаменовало принципиально новую эпоху в тысячелетней истории технологии обработки металлических материалов, о чем писали в свое время академик П.Л. Капица, академик Л.И. Берг, профессор М. Шушка и другие ученые мирового уровня. Наряду с высказываниями многих известных ученых отметим также оценку этого события ныне здравствующим Борисом Ивановичем Ставицким, лауреатом Ленинской премии, одним из активных исследователей и первых разработчиков электроискрового оборудования: "Первые десятилетия развития электроискровых технологий практически все нынешние мировые лидеры только тем и занимались, что изучали советские достижения и пытались их ко-

пировать в своих установках. Основных причин ведущего положения СССР было, пожалуй, две: сама технология зародилась именно в этой стране и была применена для изготовления передовых систем вооружений" [1].

После опубликования в СССР результатов исследований советских ученых этого нового метода обработки металлических материалов и его практического применения в промышленности метод электроискровой обработки привлек внимание и стал интенсивно развиваться также в технически развитых зарубежных странах — Англии, Германии, Франции, Швейцарии, США, Японии и др. Появились работы зарубежных авторов, посвященные общим вопросам электроискровой обработки металлов, генераторам электрических импульсов, конструкции электроискровых установок, технологическим характеристикам процесса электроискровой обработки, обрабатываемым электродами, использованию электроискрового процесса для нанесения износостойких покрытий.

С началом использования электрической искры как технологического инструмента определились два основных направления: электроискровая обработка в жидкой среде (электроэрозионная обработка — ЭЭО; здесь деталь — анод, обрабатываемый электрод — катод) и электроискровая обработка в газовой среде (ЭИО или ЭИЛ — электроискровое легирование; деталь — катод, электрод — анод). К направлению ЭИО относится также обработка в вакууме.

Первое направление — ЭЭО — получило большее развитие по сравнению с методом ЭИЛ ввиду необходимости выполнения значительного объема работ, связанного с обработкой труднообрабатываемых металлов и сплавов, получением сложных профилей полостей в заготовках, недоступным другими методами обработки.

Вместе с тем метод ЭИЛ также нашел широкое применение на производстве, способствуя увеличению ресурса деталей и инструментов или восстановлению их размеров и свойств, утраченных в процессе эксплуатации. Это достигается приданием поверхностным слоям улучшенных физико-механических, химических и других свойств за счет импульсного концентрированного энергетического воздействия на эти слои и внесения в них легирующих элементов, формированием покрытий требуемой толщины. Наличие широкого круга задач, решаемых методом ЭИЛ, большой номенклатуры обрабатываемых объектов различных назначения, конструкции, размеров, обрабатываемых поверхностей, широкого диапазона управляемых технологических параметров процесса ЭИЛ определяет наукоемкость этого метода обработки металлических поверхностей, а также

наиболее высокую универсальность его по сравнению с известными методами поверхностной обработки токопроводящих материалов.

Анализ использования метода ЭИЛ и путей его развития, дальнейшей перспективы является объектом данной работы.

С начала применения метода ЭИЛ можно выделить три характерных периода.

Первый период (1943—1961 гг.) — создание и становление метода ЭИЛ. Он связан с непосредственной деятельностью основоположников ЭИО супругов Б.Р. и Н.И. Лазаренко. Были организованы лаборатория Всесоюзного электротехнического института, затем лаборатория НИИ-627 Минэлектротрома СССР, в последующем — Центральная научно-исследовательская лаборатория электрической обработки материалов (ЦНИЛ Электром) Минэлектротехпрома СССР, преобразованная в дальнейшем в ЦНИЛ Электром АН СССР.

В этот период исследуется физика искрового способа обработки металлов, изучается изменение исходных свойств металлических поверхностей под воздействием искрового разряда, зарождаются основы практического использования ЭИЛ для восстановления и увеличения износостойкости деталей машин и инструментов, создаются первые установки для нанесения покрытий электроискровым способом. Наибольшее распространение получили резистивно-емкостные (РС) генераторы установок, предложенные Б.Р. Лазаренко еще в 1943 году. Накапливается опыт создания и производства электроискрового оборудования: Ленинградский карбюраторный завод им. Куйбышева выпускает промышленные установки для ЭЭО; ЦНИЛ Электром — ручные установки ЭИЛ этого же названия. Ведутся первые работы применения ЭИЛ при ремонте сельскохозяйственных машин.

В это время и в последующие годы Б.Р. Лазаренко уделяет много внимания подготовке инженерных и научных кадров для нового направления. Он щедро делится со своими учениками идеями, смело привлекает их к решению задач в области нового перспективного способа металлообработки.

Второй период (1961—1991 гг.) — устойчивое развитие метода ЭИЛ.

Первая часть этого периода также связана с деятельностью Б.Р. Лазаренко. Он после трехлетней работы в Китае старшим советником по науке при Президиуме АН КНР был направлен в 1961 г. в Молдавию. Б.Р. Лазаренко избирается действительным членом Академии наук Молдавской ССР, становится директором Института энергетики и автоматики АН МССР, реорганизованного в 1964 г. в Институт прикладной физики (ИПФ). Здесь же в Кишиневе, с учетом эффектив-

ности электроискровых покрытий, накопленного к этому периоду определенного опыта создания и использования установок и потребностей производства, по инициативе Бориса Романовича в 1963 г. был создан Опытный завод Института прикладной физики (ОЗ ИПФ) АН МССР. Этот завод стал в СССР основным разработчиком и изготовителем установок ЭИЛ различного назначения, основой создания этого оборудования были установки "ЦНИЛ Электром". В Молдавии Б.Р. Лазаренко создал научную школу, известную далеко за пределами СССР, здесь одними из первых его учеников были М.К. Болога, А.Е. Гитлевич, А.Д. Верхотуров, А.В. Рыбалко и многие другие, в последующем известные ученые.

С этого времени начинается новый период по изысканию применения электричества в народном хозяйстве. Особое внимание в этот период Б.Р. Лазаренко уделяет развитию метода ЭИЛ, материаловедческих аспектов формирования поверхностных слоев на электродах после воздействия искровыми разрядами. Ранее начатые отдельные исследования по использованию электрических разрядов в газах для придания поверхностям необходимых физико-химических свойств систематизированы и получили дальнейшее развитие в ИПФ АН МССР и ряде научных центров Москвы (ВИАМ, где активно работала Н.И. Лазаренко; НИИ двигателей), Ленинграда, Новосибирска, Киева, Минска и др. В результате был успешно развит электроискровой способ легирования металлических поверхностей, позволивший существенно увеличить долговечность и надежность разнообразных машин и аппаратов. Это способствовало значительному сокращению расхода высоколегированных металлов и сплавов и переходу к изготовлению деталей из простых материалов с упрочнением их методом ЭИЛ.

В этот период начинается активная исследовательская работа А.Д. Верхотурова, сотрудника Института проблем материаловедения (ИПМ) Академии наук Украины, одного из ближайших сподвижников известного ученого-материаловеда мирового уровня Георгия Валентиновича Самсонова. Его работа, выполнявшаяся под руководством Б.Р. Лазаренко и Г.В. Самсонова, была направлена на создание новых электродных материалов для ЭИЛ, обеспечивающих получение качественных покрытий на металлах и сплавах и улучшение их эксплуатационных свойств. В последующем А.Д. Верхотуров стал широко известным ученым, давшим новое развитие методу электроискрового легирования и создавшим новое научное направление — электродное материаловедение.

Вторая часть периода устойчивого развития метода ЭИЛ прошла уже после смерти Б.Р. Ла-

заренко, еще при плановой экономике. Наряду с дальнейшими исследованиями, связанными с изучением воздействия искровых разрядов на различные металлы и сплавы, свойств измененных поверхностных слоев, новых электродных материалов, новых областей эффективного использования метода ЭИЛ, интенсивно шел процесс создания нового оборудования для реализации этого метода в производственной деятельности. Основной вклад в этот процесс внес ОЗ ИПФ АН МССР, который в содружестве с учеными ИПФ АН Молдавии разрабатывал конструкции установок ЭИЛ различного назначения и выпускал их для использования в народном хозяйстве. Производственники хорошо знали и высоко оценивали установки разных моделей типа ЭФИ и Элитрон. К завершению второго периода ежегодный выпуск установок составлял в среднем 1200 штук в год, в том числе около 100 установок 6—7-го типов были механизированными. На рис. 1 приведены фотографии ряда установок ЭИЛ производства ОЗ ИПФ АН МССР. Это установки типа "Элитрон" универсального применения, используемые в ручном (Элитрон-12, -22, -52) и механизированном (Элитрон-120А — упрочнение режущего инструмента осевой формы; Элитрон-181А — упрочнение ножей резки сахарной свеклы; Элитрон-240 — автоматизированное серебрение электрических контактов; Элитрон-347Б — обработка наружных и внутренних поверхностей деталей типа тел вращения; Элитрон-501 — упрочнение осесимметричных штампов горячей штамповки; Элитрон-502 — упрочнение фильер) режимах. Номенклатура продукции для ЭИЛ этого завода составляла значительно более широкий перечень установок и оснастки, чем приведена на рис. 1. Очевидно, создание механизированного оборудования для ЭИЛ обосновано высокой эффективностью этого метода в практической деятельности, а также спросом производства.

Вместе с тем отдельные предприятия оборонной промышленности и крупные предприятия народнохозяйственного комплекса также создавали и выпускали для собственных нужд установки ЭИЛ, работающие преимущественно в механизированном и автоматизированном режимах. Часто при этом применялись генераторы установок типовых моделей ЭФИ и "Элитрон". Однако количество такого оборудования составляло в общем объеме его выпуска небольшую часть.

Для скорейшего освоения установок ЭИЛ и эффективного их использования ОЗ ИПФ АН МССР с непосредственным участием автора, проработавшего на этом заводе около 40 лет, была организована работа по разработке прикладных технологий для различных деталей и инструмен-

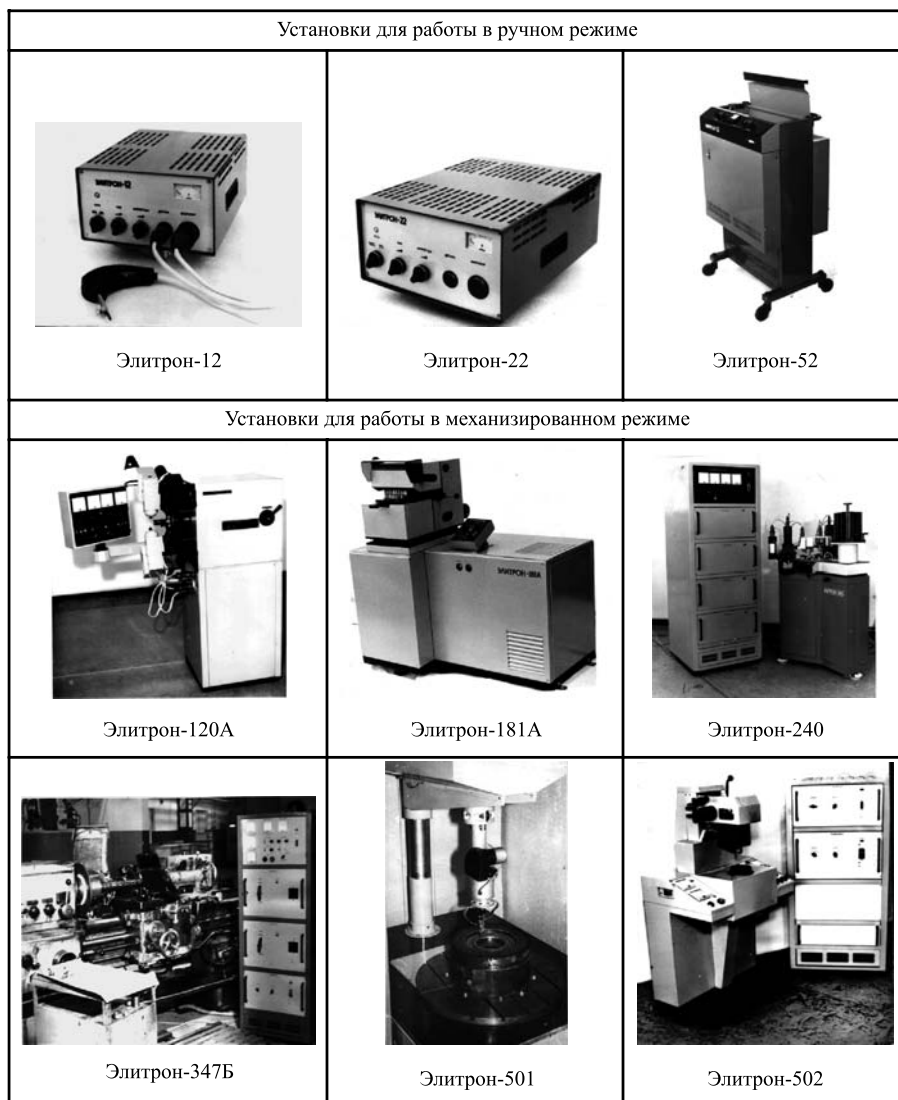


Рис. 1. Примеры установок ЭИЛ, выпущенных ОЗ ИПФ АН МССР

тов, обучению рабочего и инженерно-технического персонала заказчиков приемам работы на этих установках и методологии разработки технологий упрочнения и восстановления деталей, выполнению пусконаладочных работ.

Централизация процесса создания и производства установок ЭИЛ на ОЗ ИПФ АН МССР подготовленным персоналом обеспечила унификацию конструкций установок, стабильность их технологических параметров, высокую надежность и длительный ресурс. И сегодня можно увидеть на некоторых заводах работающую установку типа ЭФИ или "Элитрон" 1970–80-х гг. выпуска.

На предприятиях разных отраслей достигалась высокая эффективность применения процесса ЭИЛ при решении широкого ряда задач, связанных с увеличением ресурса деталей, инструментов, технологической оснастки, восстановлением

размеров изношенных деталей, нанесением покрытий со специальными свойствами. Это было основой высокой востребованности в установках ЭИЛ в плановый период развития экономики.

Третий период (1991 г. — по настоящее время) — неуправляемое и неустойчивое развитие метода ЭИЛ. После смерти Б.Р. Лазаренко значение научного центра в области ЭИЛ в г. Кишиневе постепенно уменьшилось, а после распада СССР он как мировой центр вообще перестал существовать. С разрушением плановой экономики и ее переходом к рыночной форме на постсоветском пространстве стало заметно сокращаться промышленное производство. Это отразилось на резком снижении спроса на оборудование для ЭИЛ. Выпуск установок на ОЗ ИПФ АН Молдовы прекратился, техническая документация для их производства утрачена. В России опыт практического применения ЭИЛ в основном сохранился лишь на предприятиях, продолжающих производственную деятельность и где такой опыт был ранее накоплен. Существовавшие прежде основные научные центры по исследованию процесса ЭИЛ, выпуску оборудования, электродных материалов оказались в основном

вне пределов России (ИПФ АНМ и Опытный завод ИПФ — в Молдове; Институт проблем материаловедения НАНУ, где создавались электродные материалы для ЭИЛ — в Украине).

Вместе с тем интерес исследователей к этому методу не утрачен. В России (в Москве — ФГБНУ ФНАЦ ВИМ (ранее — ГОСНИТИ), НИТУ МИСиС, ФГУП ВИАМ, ОАО ВТИ; в Санкт-Петербурге — ООО "Ультразвуковая техника ИНЛАБ"; в Екатеринбурге — ООО "МГМ-Групп"; в Томске — ИФПиМ СО РАН; в Хабаровске — ИМ ХНЦ ДВО РАН и др.) и за рубежом ведутся работы по совершенствованию электроискрового метода обработки поверхностей, оборудования, электродных материалов, прикладных технологий.

Для зарубежных, передовых в техническом отношении стран, опыт СССР послужил положительным примером применения метода ЭИЛ. На-

чиная с 50-х гг. прошлого века, этот метод стал предметом исследований и начал развиваться в США, Японии, Германии, Франции, Швейцарии, Китае и других странах. Известны современные установки зарубежного производства: ASAP, Electroarc, Mold Doctor (США); Depozitron, Tucadur 2000, Eroleg (Германия); SNPM1 (Франция); Cosmeca A.G., Carbidor, MSR-FC (Швейцария); Wocafix (Швеция); Duromatic (Венгрия); Depositron-720, -820, Spark-Depo mod.500, 300, 200, Micro-Depo mod. 100, 140 (Япония); Rocklizer mod. 500, 600, 1000 (Южная Корея); D9105A, D9110A, D9130A, SZ-08, XKS-350 (Китай); ARC1, ARC2, ARC3 (Индия); Impuls-01, ПЭЛ-23, Alier-31, -52, -53, -54, -55, -72, -101, РУЭИЛ-2006 (Молдова) [2]. Некоторые примеры современных установок ЭИЛ приведены на рис. 2.

Сравнение современных установок ЭИЛ и их параметров показывает, что это преимущественно ручные установки с потребляемой мощностью обычно не более 2 кВ·А, состоящие из генератора импульсов и инструмента (обрабатывающего устройства) с вибрирующим или вращающимся электродом. Они, в зависимости от технических параметров, обеспечивают нанесение покрытий толщиной от десятков микрометров до 1 мм (локально — до 3 мм), производительность обработки составляет 1,2...10 см²/мин. Основное принципиальное различие генераторов установок типа "Элитрон" прошлого века и генераторов современных установок заключается в использовании новых электрических элементов с улучшенными характеристиками. Более существенные изменения произошли с электродами-инструмен-

тами установок. Сегодня все чаще применяются инструменты с вращающимся электродом, а также инструменты с использованием ультразвука.

Следует отметить отсутствие единства управляемых параметров процесса ЭИЛ, что затрудняет объективное сравнение установок между собой. Это свидетельствует об отсутствии методологии назначения управляемых параметров процесса ЭИЛ при создании установок, что вызывает проблемы при использовании такого оборудования разных производителей и моделей для решения одинаковых задач, особенно в условиях недостатка необходимых специалистов и технологических рекомендаций.

В настоящее время, по сравнению с советским периодом развитого промышленного производства, заметно сокращены работы по созданию механизированного оборудования для ЭИЛ как универсального, так и специального назначения. Замена относительно несложного механизированного оборудования ЭИЛ на роботизированные комплексы, несмотря на высокую техническую эффективность последних, часто оказывается для многих предприятий экономически неоправданной из-за высокой стоимости этого оборудования, программного обеспечения и технического обслуживания.

Кратко характеризуя третий период применения ЭИЛ в России, выделим основные положения:

- значительное сокращение производства и связанное с этим снижение востребованности перспективных упрочняющих и восстанавливающих методов обработки, в том числе метода ЭИЛ;
- появление многочисленных малых предприятий, фермерских хозяйств, ведущих производ-

ственную деятельность и требующих применения современных методов увеличения ресурса своей техники;

- недостаток специалистов и отсутствие доступных рекомендаций по применению современных методов увеличения ресурса техники, в том числе ЭИЛ;

— отсутствие единой методологии создания новой техники ЭИЛ применительно к современным условиям;

- появление оборудования для ЭИЛ разных производителей с различными управляемыми параметрами;



Рис. 2. Примеры установок ЭИЛ современного производства

— малочисленность групп разработчиков новой техники ЭИЛ и отсутствие взаимодействия этих групп;

— отсутствие централизованного финансирования для создания новой техники ЭИЛ (оборудование, технологии, материалы) и ее освоения (специалисты).

Выделим из приведенного перечня положение один из важных элементов — финансирование. Расчет на то, что можно добиться финансирования работ перспективного направления на конкурсной основе и на этой базе обеспечить их выполнение и значительное развитие данного направления, как правило, несостоятелен из-за существующей системы оценки проектов.

Некоторые существующие проблемы из перечисленного частично решаются, но в целом положение кардинально не улучшается. Проблема развития современных энерго- и ресурсосберегающих наукоемких методов обработки, к которым относится ЭИО и, в частности, ЭИЛ, требует комплексного решения, включающего как проведение дальнейших исследований метода, его физико-химических основ, изучения закономерностей изменения состава, структуры и свойств поверхностных слоев металлических материалов, так и создание новой техники (технологий, оборудования), расходных материалов с улучшенными свойствами, а также подготовку специалистов разного уровня.

Рассмотрим основные тенденции следующего, предстоящего этапа развития ЭИЛ. Этот универсальный метод развивается в трех направлениях: оборудование, электродные материалы, технологии, — каждое из которых ориентировано на повышение его эффективности.

Оборудование. Анализ применяемого оборудования для ЭИЛ показывает, что современные установки отечественного и зарубежного производства предназначены и используются большей частью в ручном режиме. Механизация процесса обработки различных деталей, преимущественно наружных цилиндрических поверхностей вращения, осуществляется за счет применения в качестве технологической базы типового станочного оборудования. Перспективным и экономически целесообразным при выполнении ЭИЛ является расширение вида поверхностей (торцовые, сложной формы) и замена типового станочного оборудования на вращатели или унифицированные приводы. При выполнении большого объема работ по ЭИЛ однотипных или разных по конструкции деталей, требующих обработки разных поверхностей (наружных, внутренних, цилиндрических, торцовых, сложной формы) находят применение манипуляторы, робототехника.

При этом стабильность качественных показателей и эффективность обработки достигаются совершенствованием генераторов и обрабатывающих инструментов, а необходимая производительность — применением одновременно работающих нескольких таких инструментов. Очевидно, широкое поле деятельности составляет создание новых генераторов с управляемыми параметрами, позволяющими оптимизировать качественные показатели формируемых покрытий для разных объектов обработки. Требуется также разработка новых электродов-инструментов для обработки ЭИЛ как в ручном, так и механизированном режимах, при этом необходимы инвентаризация существующих технических решений и учет ранее накопленного опыта при разработке новых конструкций.

Требуется также оснащение оборудования для ЭИЛ устройствами последующей обработки нанесенных покрытий для улучшения качества поверхности и свойств поверхностного слоя, например, за счет обработки поверхностно-пластическим деформированием. Интересным может быть техническое решение, позволяющее использовать установку ЭИЛ и для выполнения электроискрового шлифования. Для малых предприятий целесообразно создание простых установочно-зажимных приспособлений и устройств.

Электродные материалы. Эксплуатационные свойства деталей зависят от микроструктуры, химического и фазового состава поверхностных слоев, которыми можно управлять в широких пределах обработкой ЭИЛ с применением того или иного электродного материала. Значительное улучшение эксплуатационных свойств, например износостойкости, достигается формированием наноструктурированных покрытий при использовании электродов с определенным содержанием легирующих элементов наноразмерного уровня.

Технологии. Наряду с применением традиционных электроискровых технологий при упрочняющей обработке многих деталей и инструментов и восстановлении размеров изношенных деталей, сегодня развивается ЭИЛ также в следующих направлениях: применение новых электродных материалов; нанесение многослойных покрытий с использованием нескольких, отличных по составу и свойствам электродных материалов; нанесение толстослойных (более 1 мм при опорной поверхности более 80 %) покрытий; формирование покрытий комбинированной обработкой несколькими методами (например, ЭИЛ + лазерная обработка); использование ЭИЛ применительно к деталям, изготовленным методом порошковой металлургии, а также к высокоточным парам трения. Поисковым работам технологического про-

филя посвящены многие работы лаборатории электроискровых технологий ФНАЦ ВИМ.

В перспективе эффективное использование метода ЭИЛ на практике, а также дальнейшее развитие его технологии возможны только на базе исследования физико-химических процессов эрозии материала электродов и формирования легированного слоя в направлении придания необходимых функциональных свойств различным объектам (детали машин, инструменты и т.д.). Возможно получение покрытий с аномально высокими эксплуатационными свойствами при управляемом формировании поверхностных слоев особо мелкой структуры с использованием соединений из тугоплавких металлов.

Важное значение также имеет организационная составляющая комплекса мероприятий по развитию метода ЭИЛ. В первую очередь это касается совмещения подготовки специалистов с прикладными исследованиями для решения конкретных технических задач. Существует положительный опыт такого комплексного процесса в Мордовском государственном университете им. Н.П. Огарева (г. Саранск). Здесь на базе Института механики и энергетики (ИМЭ) создан более 15 лет назад и развивается Учебно-научно-производственный центр, работающий в тесном контакте с лабораторией электроискровых технологий ФНАЦ ВИМ. Центр располагает современными установками ЭИЛ, необходимым технологическим оборудованием и исследовательскими приборами, испытательными стендами. Тут совершенствуются ремонтные технологии, в основе которых лежит восстановление методом ЭИЛ изношенных деталей. Этот Центр хорошо известен своими достижениями в области ремонта, в первую очередь, гидравлических агрегатов, которые являются ресурсоопределяющими для различной техники АПК, транспорта и др. Через него прошли сотни студентов, получивших необходимые знания и практические навыки работы на установках ЭИЛ, более 10 выпускников ИМЭ подготовили и защитили кандидатские диссертации, а один из них — докторскую диссертацию.

Очевидно, создание таких центров может способствовать научно-техническому развитию регионов и подготовке для них специалистов, а также решению технических задач этих регионов.

Рассматривая прошедшие этапы развития метода ЭИЛ (именно этот термин — электроискровое легирование — был дан в свое время родоначальником использования искры Б.Р. Лазаренко и применяется многими специалистами),

можно высоко оценить его роль в ряду технологических методов обработки материалов. Это явилось результатом плодотворной работы нескольких поколений отечественных и зарубежных исследователей и специалистов.

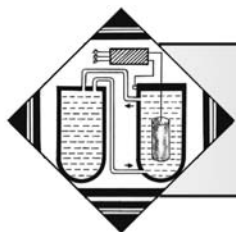
Сегодня основой успешного развития метода ЭИЛ в России являются научно-технические школы, созданные А.Д. Верхотуровым, Ф.Х. Бурумкуловым, Е.А. Левашовым и подготовившие многих активно и успешно работающих в этой области специалистов высшей квалификации. Этому способствует также плодотворное сотрудничество с научными центрами Белоруссии, Украины, Молдовы и других стран.

В заключение отметим очевидную необходимость восстановления нашего национального достояния в области науки и техники — метода ЭИЛ. Для начала требуется обозначить основные научные достижения, подвести итоги развития ЭИЛ и наметить пути его дальнейшего совершенствования. Назрела острая необходимость организации в России в системе РАН межотраслевого научно-производственного центра для дальнейшего исследования физико-химических процессов при воздействии электрических разрядов на вещество, закономерностей формирования измененных поверхностных слоев на токопроводящих материалах и их свойств, а также разработки современного оборудования, технологий и электродных материалов, координации этих работ для успешного взаимодействия с другими научными центрами страны. Несомненно, что эти исследования позволят создать принципиально новые эффективные технологии применительно к различным областям производства России.

Метод ЭИЛ — "русский метод", как неоднократно подчеркивал А.Д. Верхотуров и как его называет ряд зарубежных ученых и специалистов. Требуются изменения, служащие базой начала *четвертого периода* — периода устойчивого развития метода ЭИЛ и его полезного применения в различных отраслях промышленности России.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ставицкий Б.И.** Из истории электроискровой обработки материалов: почему СССР потерял лидерство в электроискровых технологиях // Металлообработка. 2007. № 4. С. 52—56.
2. **Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х.** Состояние и развитие электроискровых технологий и оборудования в России и за рубежом // Труды ГОСНИТИ. 2012. Т. 109. Ч. 2. С. 127—139.



И.А. Стрельников, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов
(Чувашский государственный университет имени И.Н. Ульянова, г. Чебоксары)
E-mail: strelnikov.15@mail.ru

Коррозионные характеристики углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств

Экспериментально получены данные скорости коррозии, вычислены значения коэффициента торможения, степени защиты стали 10 в 3%-ных водных растворах моющих средств МЛ-52, МС-8 и "Лабомид-203". Установлено, что при введении в состав синтетических моющих средств диэтилентетраборатаммония (ДЭТА) состава $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ концентрации 0,5 % мас., скорость коррозии углеродистой стали значительно уменьшается, а значения коэффициента торможения и степени защиты увеличиваются и достигают практически значимых величин. Методом снятия потенциодинамических поляризационных кривых показано, что в присутствии ДЭТА потенциалы растворения стали 10 смещены в положительную сторону относительно потенциала в фоновых растворах и преимущественно замедляется анодный процесс. Коррозионно-усталостные испытания свидетельствуют об увеличении коэффициента запаса циклической прочности углеродистой стали в водных растворах синтетических моющих средств при добавлении ДЭТА. Результаты исследования позволяют рекомендовать соединение диэтилентетраборатаммония в качестве эффективной противокоррозионной присадки к синтетическим моющим средствам, применяемым для очистки деталей от технологических загрязнений в процессе ремонта машин металлургических заводов.

Ключевые слова: синтетические моющие средства, диэтилентетраборатаммоний, скорость коррозии, коэффициент торможения, степень защиты, анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали, коррозионно-усталостные испытания, очистка деталей от технологических загрязнений, ремонт машин металлургических заводов.

Data of corrosion rate are obtained experimentally, values of braking coefficient, protection degree of steel 10 in 3 % aqueous solutions of detergents ML-52, MS-8 and Labomid-203 are calculated. It is found that when the composition of synthetic detergents diethylene tetraborate ammonium (DETA) composition $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ concentration of 0.5 % wt., the corrosion rate of carbon steel is significantly reduced, and the values of the braking coefficient and the protection degree increase and reach almost significant values. By removing the potentiodynamic polarization curves, it is shown that in the presence of DETA, the dissolution potentials of steel 10 are shifted to the positive side relative to the potential in the background solutions and the anode process is predominantly slowed down. Corrosion-fatigue tests indicate increase in the coefficient of cyclic strength reserve of carbon steel in aqueous solutions of synthetic detergents with the addition of DETA. The results allow us to recommend the compound diethylene tetraborate ammonium as effective anticorrosive additive to synthetic detergents used to clean parts from technological contaminants in the repair of process metallurgical plants machines.

Keywords: synthetic detergents, diethylene tetraborate ammonium, corrosion rate, braking coefficient, protection degree, anode and cathode potentiodynamic polarization curves of steel, corrosion-fatigue tests, cleaning of parts from technological contamination, repair of metallurgical plants machines.

В процессе эксплуатации и ремонта машин металлургических заводов на наружных и внутренних поверхностях узлов и деталей откладываются различные технологические загрязнения [1, 2]. Из известных способов очистки деталей наибольшее распространение получил способ химической

очистки с применением синтетических моющих средств (СМС). Интерес к СМС повысился в связи с возросшими экологическими требованиями и необходимостью замены нефтепродуктов, применяемых для удаления загрязнений с деталей при ремонте агрегатов [3, 4].

К моющим средствам относятся препараты "Тракторин", МЛ-51, МЛ-52, "Лабомид-101", "Лабомид-202", "Лабомид-203", "Лабомид-204", АМ-15, "Аэрол", МС-6, МС-8, "Темп", которые выпускаются в виде сыпучего белого или светло-желтого порошка, хорошо растворимого в воде. Используются СМС в виде 3%-ного водного раствора, который нетоксичен и пожаробезопасен. Основным недостатком водных растворов синтетических моющих средств является коррозия в этих средах деталей из углеродистой стали. Повышение противокоррозионных характеристик углеродистой стали в растворах СМС — актуальная проблема, а научные исследования в этой области представляют как научный, так и практический интерес. Из литературных источников известно, что различные неорганические и органические вещества, введенные в коррозионные среды, влияют на коррозионные характеристики углеродистой стали [5—8]. На практике широкое распространение для повышения противокоррозионных свойств металлических изделий из углеродистой стали в водных растворах СМС получили ингибиторы коррозии металлов. Защита металлов от коррозии с помощью ингибиторов не является универсальной, и поэтому возникает необходимость в разработке новых ингибиторов коррозии металлов и расширении их ассортимента [9—11].

Для определения возможности использования соединения диэтилентетраборатаммония (ДЭТА) в качестве ингибитора коррозии углеродистой стали исследовано влияние этого вещества на коррозионные характеристики стали 10 в 3%-ных водных растворах моющих средств МЛ-52, МС-8 и "Лабомид-203", которые наиболее широко применяются в машиностроении. Синтез опытного препарата ДЭТА состава $(\text{NH}_4)_2\text{B}_4\text{O}_7 \cdot 2\text{C}_2\text{H}_8\text{N}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ проводили способом, описанным в патенте [12]. Данный препарат представляет собой мелкокристаллическое вещество, которое растворяется в воде инконгруэнтно. Показатель преломления кристаллов — 1,638; плотность — 1,645 г/см³; молекулярный объем — 240,73 см³/моль; удельный объем — 0,61 см³/г. Растворимость в воде 51,0 г/100 г (при 25 °С).

Коррозионные характеристики углеродистой стали определяли в 3%-ных водных растворах МЛ-52, МС-8 и "Лабомид-203" в отдельности, а также в присутствии ДЭТА различной концентрации. Исследование проводили гравиметрическим методом с последующим вычислением скорости коррозии K , коэффициента торможения γ и степени защиты Z [13]. Полученные данные по скорости коррозии, коэффициенту торможения и

степени защиты стали 10 в испытуемых растворах по истечении 10 суток приведены в таблице.

Изучение коррозионных характеристик стали 10 в 3%-ных водных растворах МЛ-52, МС-8 и "Лабомид-203" показало, что скорость коррозии стали уменьшается в ряду синтетических моющих средств МЛ-52 > "Лабомид-203" > МС-8. Согласно данным таблицы средняя скорость коррозии стали через 10 суток испытания составляла, г/(м²·ч): 0,0221 в растворе МЛ-52; 0,0190 в растворе "Лабомид-203" и 0,0168 в растворе МС-8. Введение в растворы СМС соединения ДЭТА понижает скорость коррозии стали, о чем свидетельствуют сравнительные данные по коррозионным характеристикам стали в растворах синтетических моющих средств без добавки ДЭТА и в присутствии испытуемого препарата. Наибольшие противокоррозионные характеристики стали проявляются при содержании в растворах СМС диэтилентетраборатаммония концентрации 0,5...0,7 % мас., в расчете

Средняя скорость коррозии K , коэффициент торможения γ и степень защиты Z стали 10 в растворах МЛ-52, МС-8 и "Лабомид-203" за 10 суток

Состав СМС	Концентрация ДЭТА, % мас.	K , г/(м ² ·ч)	γ	Z , %	pH
3%-ный раствор МЛ-52	—	0,0221	1,00	0	7,2
3%-ный раствор МЛ-52 + ДЭТА	0,1	0,0144	1,54	35,14	7,3
	0,3	0,0096	2,34	56,82	7,4
	0,5	0,0014	15,59	93,59	7,5
	0,7	0,0013	17,03	94,12	7,6
3%-ный раствор "Лабомид-203"	—	0,0190	1,00	0	7,3
3%-ный раствор "Лабомид-203" + ДЭТА	0,1	0,0114	1,68	40,36	7,4
	0,3	0,0064	2,97	66,37	7,5
	0,5	0,0009	20,24	95,06	7,6
	0,7	0,0008	21,87	95,43	7,7
3%-ный раствор МС-8	—	0,0168	1,00	0	7,3
3%-ный раствор МС-8 + ДЭТА	0,1	0,0091	1,86	46,26	7,4
	0,3	0,0056	3,01	66,75	7,6
	0,5	0,0007	24,76	95,96	7,7
	0,7	0,0006	29,03	96,56	7,8

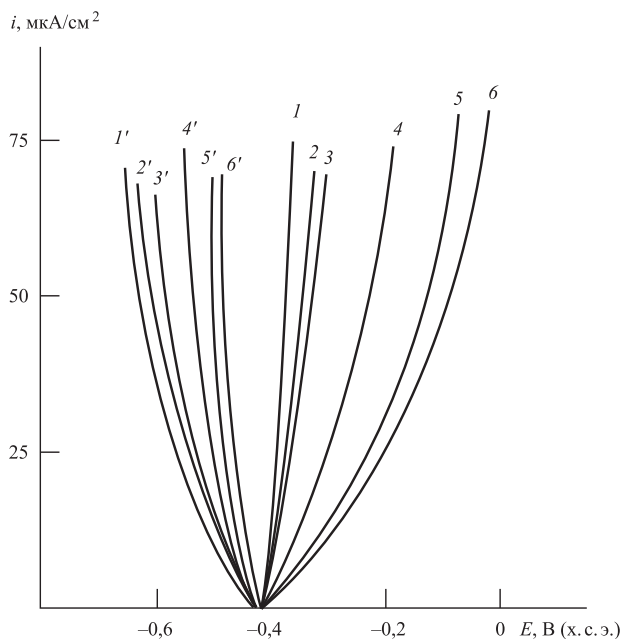


Рис. 1. Анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали 10:

1—1' — в 3%-ном растворе МЛ-52; 2—2' — в 3%-ном растворе "Лабомид-203"; 3—3' — в 3%-ном растворе МС-8; 4—4' — в 3 %-ном растворе МЛ-52 + ДЭТА; 5—5' — в 3%-ном растворе "Лабомид-203" + ДЭТА; 6—6' — в 3%-ном растворе МС-8 + ДЭТА

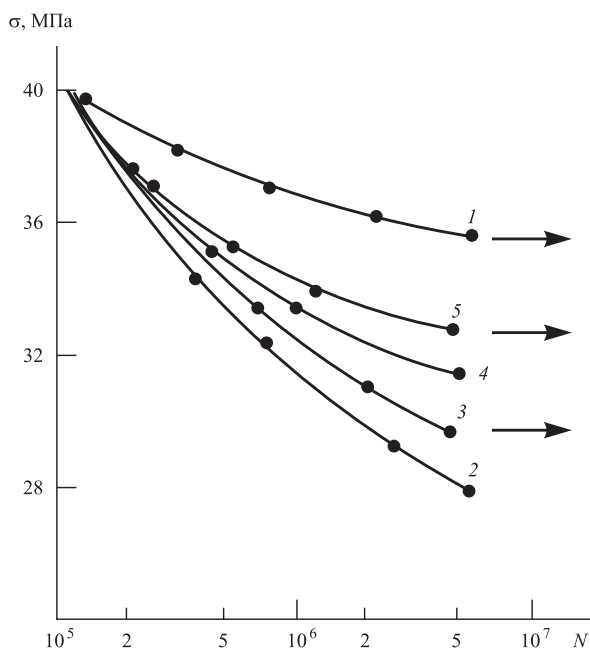


Рис. 2. Кривые усталости и коррозионной усталости стали 10:

1 — на воздухе; 2 — в 3%-ном растворе МС-8; 3 — на воздухе после предварительной выдержки в 3%-ном растворе МС-8; 4 — в 3%-ном растворе МС-8 + ДЭТА концентрации 5 % мас.; 5 — на воздухе после предварительной выдержки в 3%-ном растворе МС-8 + ДЭТА концентрации 5 % мас.

на безводную соль. Оптимальной концентрацией следует считать 0,5 % мас., так как дальнейшее повышение содержания ДЭТА не дает существенного увеличения противокоррозионных характеристик стали при значительных расходах диэтилентетраборатаммония. Измерение значений рН испытуемых растворов показало, что среда слабощелочная (рН от 7,2 до 7,8). Повышение противокоррозионных свойств стали в растворах СМС, содержащих ДЭТА, можно объяснить образованием на поверхности металла более плотной феррогидроксоаминоборатной защитной пленки, образование которой возможно за счет донорно-акцепторной связи атомов железа с неподеленными парами электронов атомов азота, ОН-групп и хемосорбции борат-ионов.

Электрохимическое поведение углеродистой стали в испытуемых растворах СМС изучено методом снятия потенциодинамических поляризационных кривых [14]. На рис. 1 приведены анодные и катодные потенциодинамические поляризационные кривые стали 10 в 3%-ном растворе МЛ-52, "Лабомид-203", МС-8 и в этих же растворах с добавкой ДЭТА концентрации 5 % мас.

Результаты электрохимических исследований показывают, что в присутствии ДЭТА потенциалы растворения металла смещены в положительную сторону относительно потенциала в фоновых растворах и хорошо коррелируют с данными гравиметрических исследований. Добавка ДЭТА преимущественно замедляет анодный процесс.

На рис. 2 представлены результаты усталостных и коррозионно-усталостных исследований стали на воздухе и в растворах МС-8, полученные методами, описанными в работе [15].

Приведенные данные указывают на то, что суммарная потеря циклической прочности стали 10 в 3%-ном растворе МС-8 на базе испытания $N = 2 \cdot 10^6$ циклов составляет 6,2 МПа (кривые 1 и 2). Из них 4,8 МПа приходится на чисто коррозионные поражения и 1,4 МПа на коррозионно-механические (кривые 1, 2 и 3). Добавка ДЭТА в 3%-ный раствор МС-8 увеличивает циклическую прочность стали (сравнить кривые 2 и 4). Данный эффект обусловлен снижением действия разрушающих факторов в уменьшении циклической прочности металла (кривые 1, 4 и 5). На данной базе испытания ДЭТА в большей мере уменьшает разрушающее действие коррозионных поражений, которое составляет 2,7 МПа, и в меньшей мере уменьшает коррозионно-механическое поражение, составляющее 1,2 МПа.

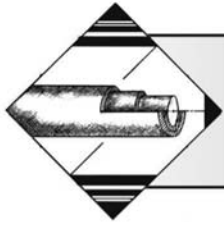
Результаты коррозионно-усталостных испытаний позволяют утверждать, что введение ДЭТА

в СМС уменьшает действия разрушающих факторов и, таким образом, увеличивает коэффициент запаса циклической прочности углеродистой стали в водных растворах СМС. Согласно литературным данным [10, 16] такое действие ДЭТА объясняется его влиянием на кинетику электродных процессов специфических пар Эванса, с работой которых связывают чисто коррозионные и коррозионно-механические разрушения.

На основе приведенных в данной статье исследований коррозионных характеристик углеродистой стали в растворах синтетических моющих средств можно рекомендовать вещество диэтилентетраборатаммония в качестве эффективной противокоррозионной присадки к СМС, применяемым для очистки деталей от технологических загрязнений в процессе ремонта машин металлургических заводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Разработка** боратфосфатных моющих средств для очистки деталей металлургических машин в ремонтном производстве / И.Е. Илларионов, Д.А. Пестряев, Ш.В. Садетдинов, И.А. Стрельников // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1 (12). С. 71—75.
2. **Повышение** эффективности мойки деталей при ремонте автомобилей / В.В. Быков, Б.П. Загородских, Ш.В. Садетдинов, В.М. Юдин // Известия Нижневолжского агроуниверситетского комплекса: наука и высшее профессиональное образование. 2019. № 1 (53). С. 358—363.
3. **Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В.** Моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств для узлов и деталей в присутствии некоторых боратов // Грузовик. 2017. № 1. С. 17—20.
4. **Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В.** Противокоррозионный раствор для повышения долговечности автотранспортных средств // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2018. № 1 (52). С. 29—36.
5. **Илларионов И.Е., Садетдинов Ш.В.** Коррозия черных металлов в средах, имитирующих условия эксплуатации автомобилей // Черные металлы. 2019. № 4. С. 67—72.
6. **Влияние** фосфатборатных соединений на противокоррозионную устойчивость углеродистой стали в нейтральных водных средах / И.Е. Илларионов, Ш.В. Садетдинов, И.А. Стрельников, В.А. Гартфельдер // Черные металлы. 2018. № 5. С. 47—53.
7. **Кузнецов Ю.И.** Прогресс в науке об ингибиторах коррозии // Коррозия: металлы, защита. 2015. № 3. С. 12—14.
8. **Ashassi-Sorkhabi H., Shaabani B., Seifzadeh D.** Corrosion inhibition of mild steel by some schiff base compounds in hydrochloric acid // Applied Surface Science. 2005. No. 239. P. 154—164.
9. **Фадеев И.В., Александрова Г.А., Садетдинов Ш.А.** Повышение противокоррозионных свойств технологических сред в машиностроении // Наука, производство, образование; состояние и направления развития: сборник научных трудов. 2019. С. 5—12.
10. **Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В., Половняк В.К.** Исследование растворимости и ингибиторного действия систем моно-, тетра-, пентаборат натрия — этилендиамин — вода при 25 °С // Научно-технический вестник Поволжья. 2014. № 5. С. 13—17.
11. **Козлов Д.Ю.** Антиккоррозионная защита. Екатеринбург: ООО "ИД "Оригами", 2013. 440 с.
12. **Пат. 2687860 РФ.** Водорастворимый ингибитор коррозии металлов / И.Е. Илларионов, Ш.В. Садетдинов. № 2018133363; заявл. 20.09.2018; опублик. 17.05.2019.
13. **Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В., Новоселов А.М.** Теоретические основы разработки новых ингибиторов коррозии для автотранспортного комплекса // Вестник МАДИ. 2014. № 4 (39). С. 15—17.
14. **Фадеев И.В., Ременцов А.Н., Садетдинов Ш.В.** Влияние моноэтаноламинтетраборатаммония в составе защитного покрытия на электрохимическое поведение стали 08кп // Грузовик. 2016. № 12. С. 15—20.
15. **Фадеев И.В., Новоселов А.М., Садетдинов Ш.В.** Влияние амидоборатного комплекса на коррозию и коррозионную усталость стали 10 // Приволжский научный журнал. 2014. № 3 (31). С. 31—35.
16. **Фадеев И.В., Садетдинов Ш.В.** Влияние моноборатов лития, натрия и калия на моющие и противокоррозионные свойства синтетических моющих средств // Приволжский научный журнал. 2015. № 2 (34). С. 86—90.



В.Р. Эдигаров

(Омский автобронетанковый инженерный институт)

E-mail: edigarovs@mail.ru

Технологическое обеспечение закономерно изменяющихся параметров качества обрабатываемого поверхностного слоя детали

Рассмотрен способ обработки деталей многоцелевых гусеничных машин с формированием поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами методами электромеханической обработки.

Ключевые слова: поверхностный слой, упрочнение, закономерно изменяющиеся параметры.

The method for treatment of multipurpose tracked vehicle parts with forming of superficial layer with regularly changing parameters by the electromechanics treatment methods is considered.

Keywords: superficial layer, hardening, regularly changing parameters.

В процессе эксплуатации многоцелевых гусеничных машин (МГМ) детали ходовой части образующих трибосопряжения подвержены значительному изнашиванию, что приводит к выходу их из строя, причем зачастую до достижения предельной наработки объекта МГМ [1]. Это связано с воздействием значительных знакопеременных динамических нагрузок, а также в результате износа деталей, образующих трибоузел [1].

Подвеска МГМ служит для соединения корпуса с опорными катками, смятения ударов и толчков, возникающих при движении МГМ по неровностям местности и дорог, а также для быстрого гашения колебаний корпуса. Неисправность даже одной из подвесок МГМ (рис. 1) приводит к увеличению нагрузки на исправные подвески, при этом подвижность и запас хода МГМ снижаются, хотя ходовая часть МГМ в целом продолжает выполнять свои

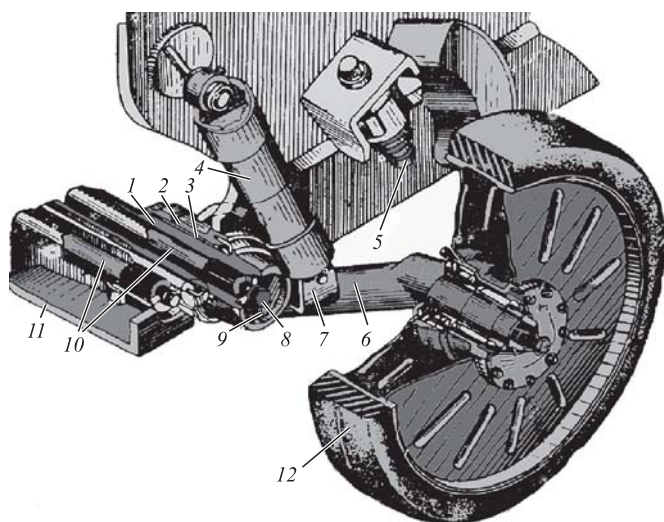
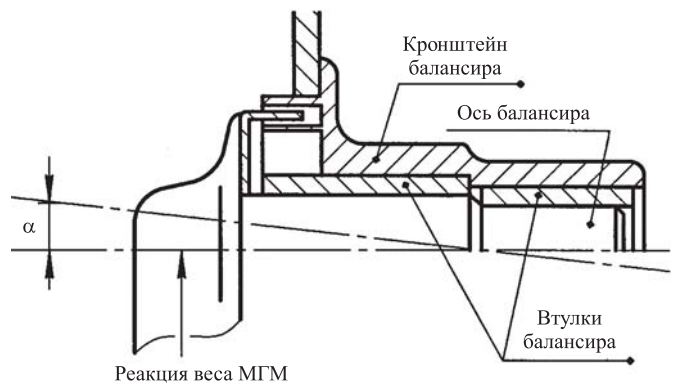


Рис. 1. Каток опорный с подвеской МГМ:

1 — ось балансира; 2 — кронштейн балансира; 3 — втулка балансира; 4 — амортизатор; 5 — отбойник; 6 — труба балансира; 7 — ухо; 8 — болт; 9 — крышка; 10 — торсион; 11 — днище МГМ; 12 — опорный каток



функции. Величина износа втулок балансира 3 и оси балансира 1 (см. рис. 1), образующих подшипники скольжения, оказывает существенное влияние на техническое состояние подвески, по мере увеличения износа этих деталей увеличивается угол между осью опорного катка и корпусом МГМ (угол α на рис. 1), что косвенно влияет на техническое состояние вваренных в корпус МГМ кронштейнов 2, резиновых шин опорных катков, бандажа поддерживающих катков, венца ведущего колеса, направляющего колеса, гребней и резиновых подушек траков, а также других сопрягаемых деталей ходовой части МГМ [1–3].

Анализ эксплуатации деталей ходовой части МГМ показал, что основной причиной выхода их из строя является износ, причем больше половины износов вызвано абразивными частицами. Основным резервом повышения износостойкости деталей являются: уменьшение абразивной составляющей износа, в основном путем защиты трибосопряжений от пылевых частиц, совершенствованием конструкции уплотнений, обеспечение смазки, повышение контактной твердости поверхностных слоев деталей и др. Однако с уменьшением абразивного изнашивания деталей при общем значительном снижении износа будут возрастать относительные величины других видов изнашивания.

Кроме того, опыт эксплуатации трибосопряжений МГМ показывает, что износ поверхностей (например, оси балансира и втулок, подшипников скольжения, чашек дифференциалов, кулачков распределительных валов, гильз цилиндров, направляющих и др.), происходит не равномерно и зависит от распределения нагрузок по площади контакта деталей, образующих трибосопряжение (см. рис. 1) [1, 4–7].

Проведенные исследования работы деталей ходовой части МГМ показали, что в подшипниковом узле балансира износ, например, оси балансира, происходит в основном в плоскости, близкой

к вертикальной $y-y$ (рис. 2) с максимумом в верхней ее части, в результате чего происходит перекося оси балансира на некоторый угол α (см. рис. 1), завал опорного катка, что приводит к повышенному износу поверхностей других деталей ходовой части и последующему выходу их из строя. В близкой к горизонтальной плоскости $x-x$ (см. рис. 2) износ рабочей упрочненной поверхности оси балансира не выходит за рамки допустимых пределов на установленный пробег МГМ и примерно одинаков по величине на всей длине детали. При этом в существующем технологическом процессе изготовления оси балансира упрочнение ее поверхностей производится с созданием упрочненного слоя с определенными параметрами (например, глубина упрочненного слоя, шероховатость и т.д.) примерно одного значения по всему диаметру и длине детали. Значительная часть энергии в процессе упрочнения, затрачиваемая на создание упрочненного поверхностного слоя оси балансира, расходуется нерационально, так как упрочненный поверхностный слой, например, в плоскости $y-y$ в нижней ее части (см. рис. 2), имеет минимальный износ в процессе эксплуатации, т.е. большая часть этого упрочненного слоя не задействована в процессе эксплуатации МГМ. Упрочненный поверхностный слой в плоскости $x-x$ изнашивается за период эксплуатации трибоузла менее чем на 50 %, т.е. оставшаяся часть упрочненного поверхностного слоя также не задействована в процессе эксплуатации. Упрочненный поверхностный слой в плоскости $y-y$ в верхней ее части (см. рис. 2) имеет максимально допустимый износ в процессе эксплуатации, а зачастую и превышает его [2, 5, 8].

С практической точки зрения более рациональным можно считать создание упрочненного поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами для определенных участков поверхностей деталей, образующих трибоузел

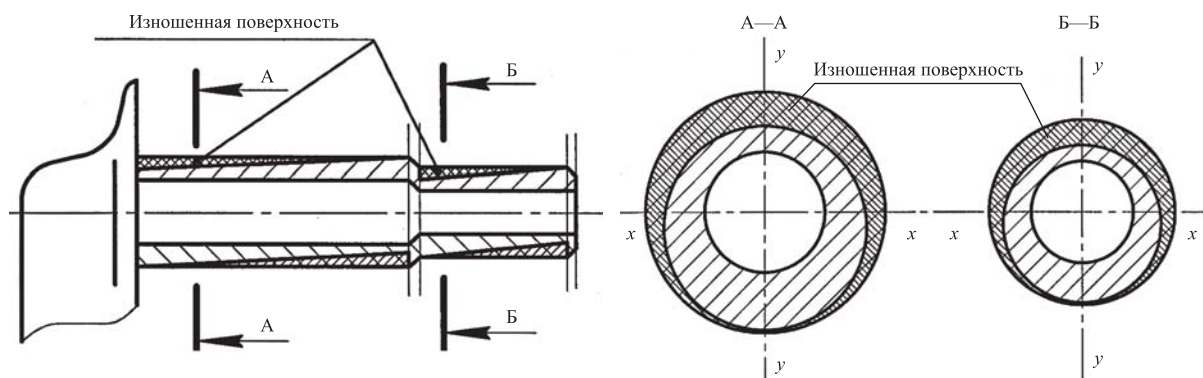


Рис. 2. Износ рабочих поверхностей оси балансира МГМ

(например, с закономерно изменяющимися глубиной, твердостью, параметрами шероховатости, структурой, фазовым составом, наклепом, остаточными напряжениями в поверхностном слое и т.д.), а также в зависимости от соответствующих износов и контактных напряжений, характерных для эксплуатации данных деталей [2].

Формирование упрочненного поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами позволяет повысить эффективность обработки, снизить расходы на упрочнение, повысить долговечность детали и создавать закономерно изменяющийся упрочненный поверхностный слой деталей МГМ.

Одним из технологических методов обработки, который позволяет получить поверхностный слой с характерными для определенных режимов обработки параметрами, является электромеханическая обработка (ЭМО). ЭМО позволяет варьировать получаемые значения глубины упрочненного слоя, твердости, параметров шероховатости и т. д. даже в рамках одного технологического перехода [2, 3, 5, 9].

Упрочненный поверхностный слой с закономерно изменяющимися параметрами получают твердосплавным инструментом с одновременным пропусканием через зону обработки переменного электрического тока (сила тока 200...2000 А, напряжение 3...5 В), при этом процесс обработки производится по управляющей программе с автоматическим регулированием значений технологических факторов обработки (сила тока, скорость обработки, сила прижатия инструмента к обрабатываемой поверхности и т.д.). Управляющая программа осуществляет условную "разбивку" обрабатываемой поверхности по линии движения ин-

струмента на элементарные участки определенной длины. Каждому элементарному участку соответствуют определенные значения технологических факторов процесса упрочнения, изменение которых позволяет создавать участки с различными параметрами в зависимости от условий последующей эксплуатации каждого элементарного участка поверхности детали в трибоузле (износ поверхности элементарного участка, контактные напряжения на поверхности элементарного участка и т.д.), определяемых из опыта эксплуатации данного (подобного) трибоузла или расчетными методами. То есть в местах минимального износа поверхностей деталей создается упрочненный слой минимально допустимой глубины и твердости, и наоборот, в местах воздействия значительных нагрузок и повышенных износов поверхности создается упрочненный поверхностный слой с максимально возможной глубиной и твердостью. Тем самым в результате обработки создается упрочненный поверхностный слой с закономерно изменяющимися параметрами.

Для реализации разработанной технологии создания упрочненного поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами осуществляли подконтрольную эксплуатацию МГМ, по результатам которой определяли места на поверхности деталей, входящих в трибосопряжение, наиболее подверженные линейному износу и, соответственно, контактными напряжениями. Эти данные закладывали в управляющую программу, которая устанавливает траекторию движения инструмента по обрабатываемой поверхности, делит ее на элементарные участки 1, 2, 3, ..., n - 1, n (рис. 3, 4). Далее управляющая программа присваивает каждому элементарному участку соот-

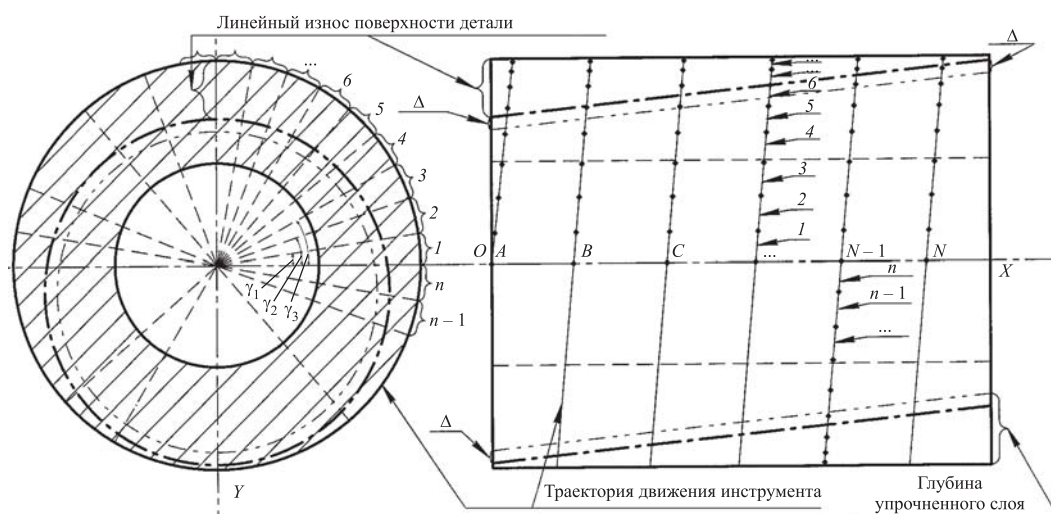


Рис. 3. Схема создания поверхностного слоя детали с закономерно изменяющимися параметрами

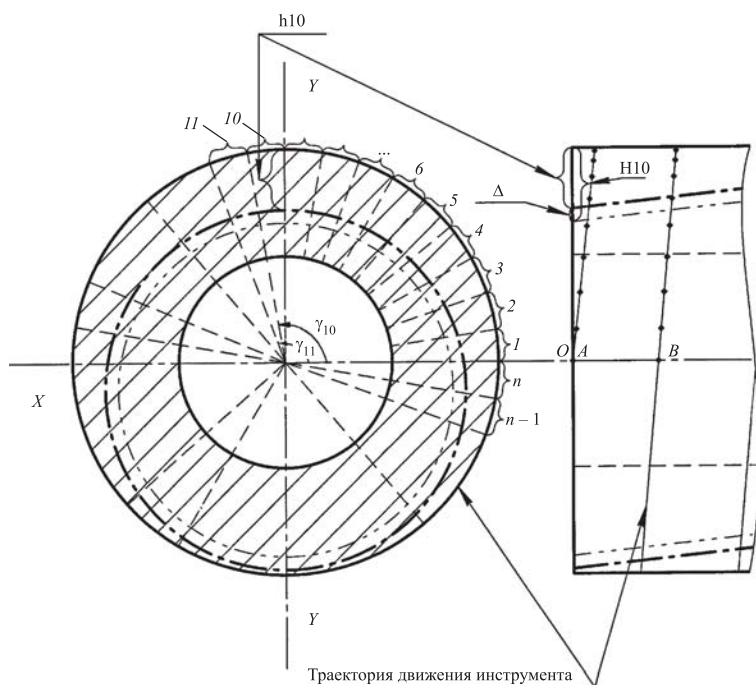


Рис. 4. Схема разбивки линии траектории движения рабочего инструмента по обрабатываемой поверхности на элементарные участки

ветствующие координаты — угол поворота обрабатываемой детали в шпинделе станка — $\gamma_1, \gamma_2, \gamma_3, \dots, \gamma_{n-1}, \gamma_n$ и номер витка $A, B, C, \dots, N-1, N$.

Используя математические зависимости, управляющая программа производит расчет технологических режимов обработки для каждого элементарного участка, исходя из требования обеспечить необходимые параметры поверхностного слоя для каждого конкретного элементарного участка. Так, например, для участка номер 10 (с координатами: участок № 10, угол — γ_{10} , виток A) характерен в процессе эксплуатации максимальный износ его поверхности, равный h_{10} , управля-

ющая программа устанавливает для этого участка соответствующие режимы обработки, позволяющие получить упрочненный поверхностный слой глубиной H_{10} , где $H_{10} = h_{10} + \Delta$, где Δ — некий запас упрочнения по глубине упрочненного слоя. Для участка 11 (с координатами: участок № 11, угол — γ_{11} , виток A) характерен несколько меньший линейный износ поверхности в процессе эксплуатации, чем участку 10, соответственно, управляющая программа для этого участка устанавливает несколько меньшую силу тока или несколько большую скорость обработки данного участка или варьирует эти и (или) другие технологические факторы. Таким образом, для каждого элементарного участка с определенными координатами (номер участка, угол γ и наименование витка) управляющей программой устанавливаются определенные режимы обработки, позволяющие получить упрочненный слой глубиной, несколько большей (на величину Δ), чем износ этого элементарного участка в процессе эксплуатации.

Определение координат (номера участка, угла γ и наименования витка) для каждого элементарного участка поверхностного слоя детали может осуществляться с помощью датчиков положения, сигналы от которых преобразуются в сигналы управления в зависимости от заданного закона изменения силы тока и далее подаются на установку ЭМО (рис. 5).

Автоматизированная система создания поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами может быть жесткой и гибкой. В жесткой системе в качестве задающего устройства может быть использован копир (рис. 6), в гибкой

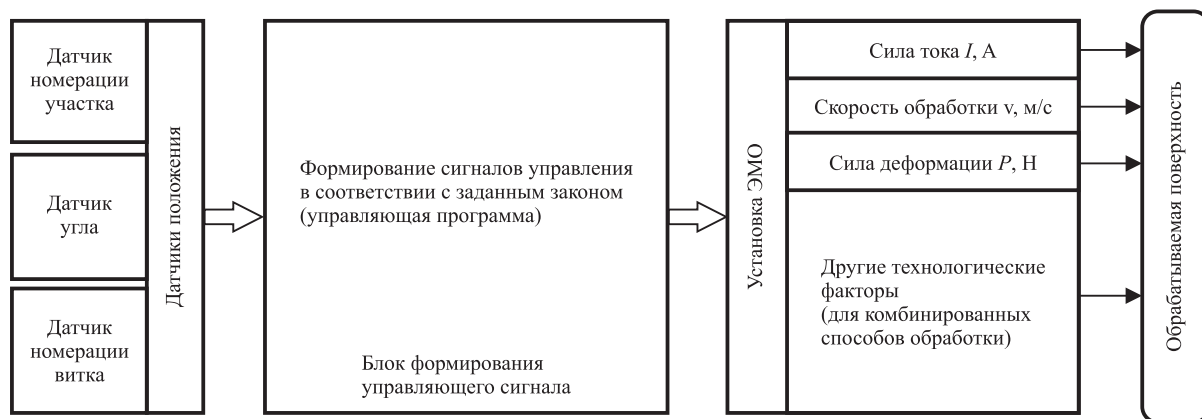


Рис. 5. Гибкая автоматизированная система создания поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами

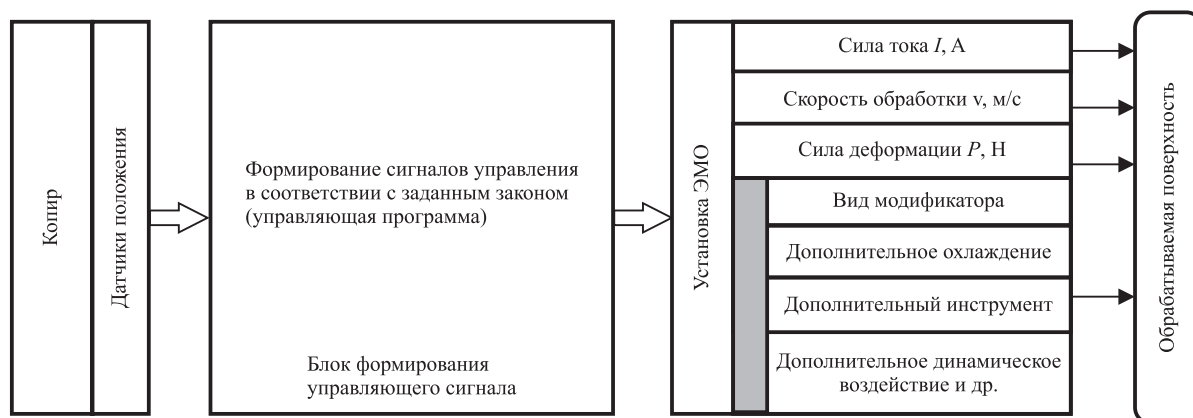


Рис. 6. Жесткая автоматизированная система создания поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами на примере комбинированной ЭМО (ФЭМ)

системе могут использоваться датчики положения (см. рис. 5).

На ЭВМ разрабатываются управляющая программа на конкретную деталь или группу деталей, имеющих одинаковый профиль, и закон изменения качества поверхностного слоя по результатам подконтрольной эксплуатации МГМ. Эта программа записывается в блок формирования управляющего сигнала, который хранит в себе закон изменения технологических факторов в зависимости от перемещения инструмента по обрабатываемой поверхности.

В процессе обработки сигналы от датчиков движения инструмента поступают в блок формирования управляющего сигнала, где управляющей программой выдается из памяти заложенное значение технологического фактора, например силы тока, соответствующее данному положению рабочего инструмента относительно обрабатываемой поверхности. Это значение с помощью микроконтроллера преобразуется в управляющий сигнал на установку ЭМО.

В управляющую программу закладываются данные по обрабатываемым поверхностям всей номенклатуры деталей, при этом периодически вносятся коррективы, исходя из практики эксплуатации МГМ.

Использование копира может оказаться эффективным в крупносерийном и массовом производствах. При использовании копира датчики движения в зависимости от его положения вырабатывают сигнал, по которому микроконтроллер подает сигнал, поступающий в блок формирования управляющего сигнала и далее на установку ЭМО.

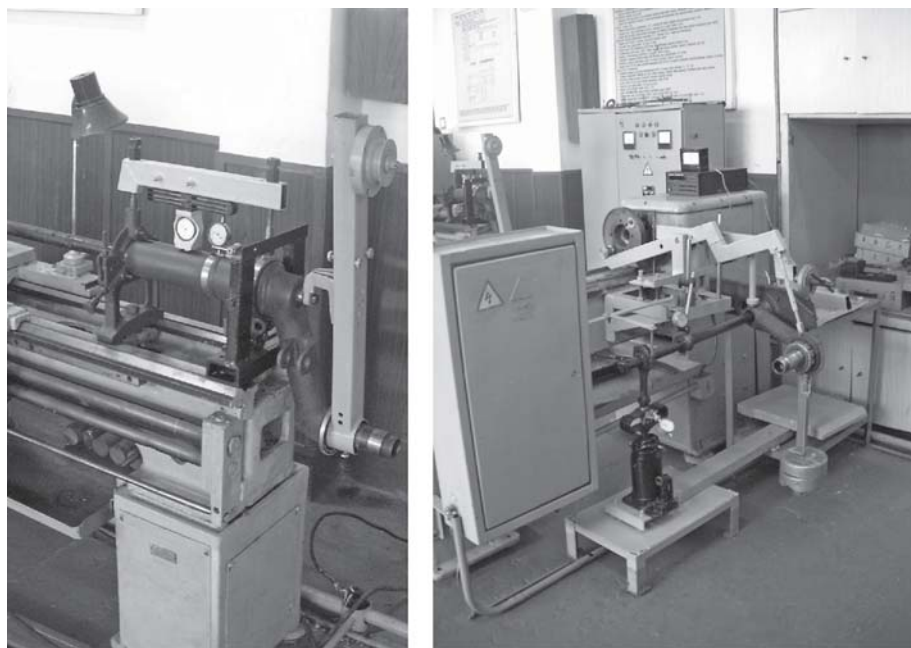
Датчик положения представляет собой набор контрольных датчиков, позволяющих формировать сигнал положения инструмента относительно обрабатываемой поверхности детали.

Это могут быть датчики линейного перемещения обрабатываемого инструмента, начальной точки обработки, запуска ЭМО, частоты вращения шпинделя, угла поворота шпинделя и др.

В разработанной автоматизированной системе создания поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами датчики положения могут отсутствовать. Тогда положение инструмента относительно обрабатываемой поверхности будет определяться первоначальным его положением, подачей и временем. В этом случае сигнал управления является функцией времени.

Аналого-цифровой преобразователь, входящий в состав блока формирования управляющего сигнала, принимает сигналы от датчиков положения, преобразовывает их в цифровую форму и передает в ЭВМ блока. ЭВМ обрабатывает цифровые сигналы и, в соответствии с программой, определяет значения технологических факторов, например силу тока, которые в цифровом виде подаются на цифроаналоговый преобразователь. Последний преобразует цифровой сигнал в сигнал управления установкой ЭМО, т.е. выдает управляющие сигналы непосредственно на исполнительные механизмы установки.

Установка ЭМО обеспечивает величину технологического фактора, например рабочую силу тока, необходимую для данного участка обрабатываемой поверхности детали. Закон изменения значений технологических факторов в зависимости от участков обрабатываемой поверхности детали заранее вычисляется по соответствующей заданной программе и хранится в ЭВМ блока формирования управляющего сигнала. В ЭВМ вводится информация об обрабатываемой детали, для которой в соответствии с программой устанавливается зависимость технологических факто-



а)

б)

Рис. 7. Лабораторные установки [11]:

а — установка ускоренных испытаний; б — стенд-имитатор

ров от местоположения инструмента относительно обрабатываемой поверхности детали.

Данная система является универсальной, быстроперенастраиваемой и с успехом может использоваться в мелкосерийном и серийном производстве, позволяет повысить долговечность деталей МГМ благодаря автоматизированному технологическому обеспечению закономерно изменяющегося качества обрабатываемой поверхности детали.

Оценивали эффективность разработанного способа по результатам лабораторных (на

испытательных стендах, рис. 7) и натурных испытаний (в составе МГМ) трибоузлов с деталями, обработанными по серийной технологии (ось балансира — закалка ТВЧ, втулки без обработки) и обработанными по новой технологии (ось балансира обработана фрикционно-электрическим модифицированием (ФЭМ) [10], разновидность ЭМО, с созданием поверхностного слоя с закономерно изменяющимися параметрами, втулка без обработки).

Экспериментальная зависимость суммарной скорости изнашивания деталей узла балансира, полученная на лабораторной установке (установке ускоренных испытаний, рис. 7, а), показывает, что суммарная скорость изнашивания серийного узла больше примерно в 1,6 раза

в сравнении с узлом, балансир которого модифицирован ФЭМ с поверхностным слоем с закономерно изменяющимися параметрами.

Испытания на стенде-имитаторе (рис. 7, б) показали, что суммарная скорость изнашивания деталей серийного узла балансира выше примерно в 1,3 раза, чем суммарная скорость изнашивания деталей, изготовленных по предлагаемой технологии.

Проведенные натурные испытания узла с деталями, обработанными по новой технологии в составе МГМ в реальных условиях, позволили установить (рис. 8) эффективность предлагаемого способа обработки. На первичном этапе испытаний при пробеге МГМ до 1000 км суммарная скорость изнашивания деталей узла балансира, изготовленных по серийной технологии, примерно в 1,5...2,5 раза больше суммарной скорости изнашивания деталей, обработанных по новой технологии. В дальнейшем суммарная скорость изнашивания деталей узла балансира, обработанного по новой технологии, оставалась ниже примерно на 15 %. Испытания до наступления предельного состояния подтвердили эффективность обработки и позволили увеличить ресурс узла на 10...15 %. Выход из строя деталей трибоузлов ходовой части МГМ, обработанных по предлагаемой технологии, до достижения наработки, установленной нормативно-технической документацией для планового ремонта, не установлен.

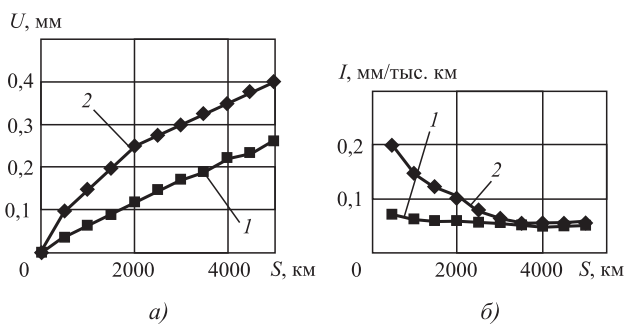


Рис. 8. Зависимость средних значений суммарного износа U (а) и суммарной скорости изнашивания I (б) деталей узла балансир от пробега МГМ S :

1 — узел с деталями, обработанными по новой технологии; 2 — узел с деталями, обработанными по серийной технологии

Выводы

В результате проведенных исследований подтверждена эффективность разработанного способа обработки, при этом обеспечено снижение суммарного износа деталей узла балансир примерно на 30 % при пробеге МГМ 5000 км, а также общее увеличение ресурса работы узла на 10...15 % при предельной наработке.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Эдигаров В.Р., Костин К.В.** Исследование износа ходовой части объектов бронетанковой техники // Многоцелевые гусеничные и колесные машины: разработка, производство, боевая эффективность, наука и образование: материалы 2-й Межрегиональной научно-технической конференции (Броня-2004), Омск, 5—6 октября 2004 г. Омск: Курьер, 2004. 284 с.
2. **Эдигаров В.Р., Малый В.В.** Повышение износостойкости деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин комбинированными методами электромеханической обработки // Вестник СибАДИ. 2014. № 4 (38). С. 57—64.
3. **Эдигаров В.Р., Литая Е.В.** Восстановление и упрочнение деталей ходовой части многоцелевых гусеничных машин методами электромеханической обработки // Вестник Академии военных наук. 2014. № 4 (49). С. 125—131.

4. **Инженерия** поверхности деталей / А.Г. Суслов, В.Ф. Безъязычный, Ю.В. Панфилов и др. / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

5. **Эдигаров В.Р., Дегтярь В.В., Килунин И.Ю.** Формирование поверхностных слоев деталей с закономерно изменяющимися параметрами электромеханической обработкой // Вестник Академии военных наук. 2012. № 3 (40). С. 182—186.

6. **Федоров В.П., Нагоркина В.В., Ковалева Е.В.** Управление качеством обработки поверхностей трибоэлементов в комбинированных системах повышенной технологической гибкости // Вестник БГТУ. 2006. № 2. С. 30—41.

7. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 207 с.

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


9. **Суслов А.Г., Горленко А.О., Сухарев С.О.** Электромеханическая обработка деталей машин // Справочник. Инженерный журнал. 1998. № 1 (10). С. 15—18.

10. **Эдигаров В.Р., Машков Ю.К., Овчар З.Н.** Повышение износостойкости трибосопряжения фрикционно-электрическим модифицированием поверхностей трения поверхностно-активными модификаторами // Омский научный вестник. 2006. № 2 (35). С. 73—75.

11. **Эдигаров В.Р.** Повышение эксплуатационных свойств и качества поверхностного слоя деталей машин технологическими методами. Омск: ОФ ВА МТО, 2013. 196 с.

12. **Шнейдер Ю.Г.** Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб.: Политехника, 1998. 414 с.





ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

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

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

**107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2,
тел.: (495) 785-6069,
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru**



В.И. Копылов, В.Н. Пащенко, И.О. Свиточ

(Национальный технический университет Украины "Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского")

E-mail: kopviacheslav@gmail.com

Активация формирования структуры и управление свойствами хромоникелевых плазменных покрытий с наносоставляющими

Рассмотрены вопросы активации плазменного напыления и управления формированием структуры покрытия с повышенными функциональными характеристиками путем наложения внешнего магнитного поля в области дугового разряда, а также модифицирования напыляемой смеси нанодисперсными составляющими. Показаны возможности управления пространственным распределением и энергетическими характеристиками гетерогенного плазменного потока в условиях воздействия внешнего магнитного поля. Исследованы износостойкость и физико-механические свойства плазменных покрытий из порошковых смесей макро- и микрочастиц при наличии оптимального количества нанофаз в формируемом покрытии.

Ключевые слова: плазменные покрытия, наносоставляющие, активация, внешнее магнитное поле, модификация, износостойкость.

The issues of plasma spraying activating and controlling the formation of coating structure with enhanced functional characteristics by imposition external magnetic field in the field of the arc discharge, as well as modifying the sprayed mixture by nanodispersed components, are considered. The possibilities of controlling the spatial distribution and energy characteristics of heterogeneous plasma stream under the influence of external magnetic field are shown. The wear resistance and physico-mechanical properties of plasma coatings made from powder mixtures of macro- and microparticles in the presence of the optimal amount of nanophases in the formed coating are studied.

Keywords: plasma coatings, nanocomponents, activation, external magnetic field, modification, wear resistance.

Введение

Формированию плазменных покрытий определенного состава и структуры способствует степень завершенности физико-химических процессов в объеме самого покрытия и в межфазной зоне системы основа—покрытие. Известным подходом для активизации таких процессов, а следовательно, управления структурой и физико-механическими свойствами плазменных покрытий, прежде всего такими, как прочность, износостойкость, является использование специфических порошковых материалов, в том числе на основе нанодисперсных составляющих [1, 2].

Перспективным направлением повышения эффективности технологий плазменного напыления может быть активация композиционной порош-

ковой смеси введением в ее состав отдельных нанопорошков, а также модифицированных каким-либо способом частиц порошка (диффузионное легирование, вакуумное осаждение и т.п.) для получения на их поверхности нанофаз [3, 4].

Структура сформированного плазменного покрытия априори определяется параметрами потоков низкотемпературной плазмы. Управление пространственным распределением и, следовательно, управление энергетическими параметрами в гетерогенном плазменном потоке может быть обеспечено путем наложения внешнего магнитного поля [5].

Цель работы — рассмотрение приемов активации плазменного напыления и управления формированием структуры покрытия с повышенными функциональными характеристиками

путем модифицирования напыляемой смеси нанодисперсными составляющими, а также путем наложения внешнего магнитного поля в области дугового разряда.

Материалы и методика исследований

Плазменные покрытия наносили на поверхность образцов на модернизированной установке УПНС-304 с плазмотроном, который обеспечивал ламинарное истечение плазменного потока аргона. Параллельно для напыления покрытий использовали установку "Киев-7", работающую на плазмообразующем воздухе.

Микротвердость полученных покрытий измеряли на микротвердометре ПМТ-3. Прочность сцепления покрытия с основой определяли с помощью испытаний на отрыв в соответствии со стандартом ASTM C 633.

Для исследований в качестве основы использовали малоуглеродистую сталь с плазменными покрытиями из порошковых материалов — NiCrBSi (ПГ-10Н-01, ПГ-19М-01), Al_2O_3 , фракции 63...100 мкм и композиций из смесей, включающих наноставляющие в виде оксидов SiO_2 (аэросил) [1–3].

Также для плазменного напыления применяли модифицированный порошок оксида алюминия. В качестве модификатора использовали Al, Ti, а также нанопорошки Al_2O_3 и TiO_2 с размером частиц 40...50 нм, которые вводили в количестве 0,5...5,0 % об. Гомогенную порошковую смесь из макро- и наночастиц готовили в планетарной шаровой мельнице XQM-2, где в процессе механохимической обработки происходит формирование модифицированного порошка с необходимым гранулометрическим составом.

Кинетику износа плазменных покрытий изучали в условиях сухого трения на машине СМЦ-2 по стандартной методике. Параллельно проводили исследования на абразивный износ покрытий на установке ЛКИ-3.

Для повышения рабочих характеристик покрытий исследовали влияние внешнего магнитного поля и способов управления его параметрами [5]. Управляющая магнитная система представляет собой электромагнит в виде соленоида, размещенного таким образом, чтобы была возможность влиять магнитным полем на часть столба электрической дуги плазмотрона.

Результаты исследований и их обсуждение

Воздействие внешнего магнитного поля на электрическую дугу (на примере плазмообразующего

воздуха). Управление пространственным распределением фаз гетерогенного плазменного потока во время нанесения покрытий из дисперсных материалов осуществляли наложением внешнего поперечного магнитного поля (ВПМП), направление индукции которого перпендикулярно к направлению тока в основной части дуги. Направление потока и значения магнитной индукции задавались направлением и силой тока в катушке, и могли изменяться по соответствующему закону с помощью системы управления электромагнитом. Изменяя с помощью магнитного поля положение электрической дуги в пределах дугового канала плазмотрона и место привязки дуги, можно переформировать в пространстве энергетические характеристики струи (изменить общий уровень и распределение локальных значений энтальпии, температуры, скорости, химического состава активной газовой среды, в котором проводится процесс).

Истечение плазменного потока в окружающее пространство в условиях действия ВПМП сопровождается его отклонением относительно продольной оси сопловой части дугового канала генератора плазмы. Направление отклонения струи зависит от направления индукции магнитного поля. Значения угла отклонения струи воздушной плазмы β в зависимости от индукции внешнего магнитного поля B и давления плазмообразующего газа $p_{п.г}$ при разных значениях тока дуги I_d после проведения регрессионного анализа с помощью пакета программ MathCad 2001 Professional представлены на рис. 1 (см. обложку).

Индукция магнитного поля изменялась в диапазоне $(18...55) \cdot 10^{-3}$ Тл, а ток дуги плазмотрона I_d в диапазоне 130...200 А. В общем случае повышение тока дуги ведет к росту угла отклонения плазменного потока.

Особенности влияния магнитного поля на диамагнитные и ферромагнитные порошковые материалы. Воздействие внешнего магнитного поля проявляется по-разному в зависимости от материала напыляемого порошка — ферромагнитного, в одном случае, и диамагнитного, в другом случае. Приложенное ВПМП воздействует на все компоненты гетерогенного потока — на частицы газовой плазмы и частицы порошка либо опосредствованно (диамагнитный материал), либо напрямую (ферромагнитный материал). На рис. 2 представлена структура плазменного покрытия на примере диамагнитного материала ПГ-19М-01, а в таблице приведены значения его микротвердости. Металлографический анализ покрытий свидетельствует об отличии структуры покрытий, которые были получены при магнитном управле-

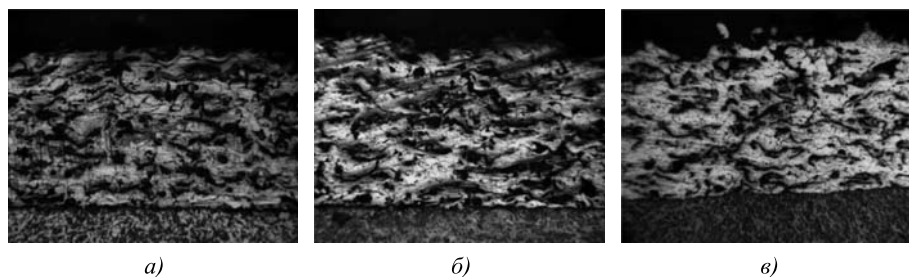


Рис. 2. Микроструктура воздушно-плазменных покрытий, сформированных на основе порошка ПГ-19М-01 ($\times 200$):

a — без магнитного поля; *б* — ВПМП знакопеременное, 50 Гц; *в* — ВПМП постоянное

Значения микротвердости диамагнитных и ферромагнитных плазменных покрытий в условиях воздействия внешнего поперечного магнитного поля (плазменное воздушно-напыление, 15 мм от центра пятна напыления)

Марка порошка	Микротвердость, МПа			Нагрузка на инденторе, Н
	в отсутствии ВПМП	ВПМП знакопеременное, 50 Гц	ВПМП постоянное	
ПГ-19М-01	439...1100	772...1220	630...1160	0,981
ПГ-10Н-04	2320...5930	2440...5090	2320...4730	1,962

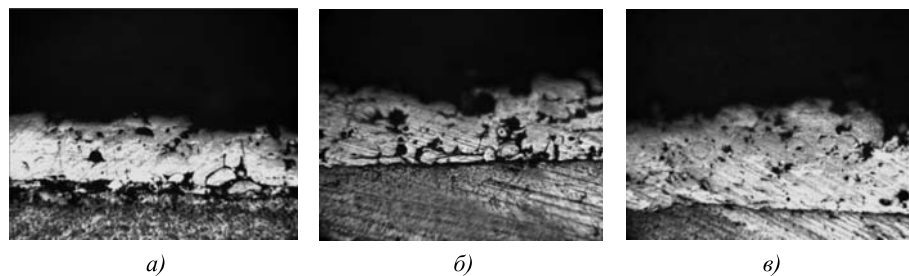


Рис. 3. Микроструктура плазменного покрытия, сформированного из ферромагнитного материала ПГ-10Н-04 ($\times 200$):

a — без внешнего магнитного поля; *б* — ВПМП знакопеременное, 50 Гц; *в* — ВПМП постоянное

нии двухфазным потоком в сравнении с покрытиями, которые были получены обычным способом. Улучшение структуры покрытия отмечается при применении ВПМП постоянного направления, что сопровождается повышенными значениями адгезионной и когезионной прочности.

Согласно данным таблицы, при напылении покрытия в отсутствие магнитного поля имеет место наибольший градиент микротвердости в покрытии. При приложении ВПМП постоянного направления наблюдается наименьший градиент этого показателя, а при знакопеременном ВПМП — среднее значение градиента микротвердости в покрытии (в сравнении с двумя предыдущими вариантами). Эти факторы объясняются выравниванием условий нагревания и ускорения для большего объема частиц напыляемого порошка.

Таким образом, при использовании ВПМП происходит более равномерное и более интенсивное нагревание и ускорение частиц порошка, что способствует формированию определенной структуры покрытия, оптимальной по распределению компонентов, микротвердости и пористости.

В случае ферромагнитных материалов, как известно, действие магнитного поля возможно при условии нахождения этих материалов в температурном диапазоне ниже точки Кюри. Превышение упомянутого предела переводит материал из категории "ферромагнитный" в категорию "парамагнитный". Для никеля, который является основой порошка ПГ-10Н-04, точка Кюри составляет 627,4 К.

Для такого процесса напыления, характерно, что магнитное поле воздействует как на плазму, так и на порошок. Локализация места введения порошка вместе с "холодным" транспортирующим газом способствует замедлению процесса нагревания материала, который несколько растягивается в пространстве и во времени. В итоге в течение определенного времени частицы ферромагнетика находятся в плазменной

струе между полюсами действующего магнита, имея температуру ниже точки Кюри. При этих условиях возникает дополнительная сила, нарушается существующий баланс сил, частицы материала несколько изменяют свою траекторию движения. В реальных условиях плазменного нанесения покрытия изменение траектории движения частиц будет проявляться через перераспределение плотности частиц порошка в пределах двухфазного потока и, как следствие, изменение общего характера распределения твердой фазы в пределах сформированного газопорошкового потока.

На рис. 3 показана структура полученного покрытия на основе ферромагнитного материала ПГ-10Н-04, а значения микротвердости приведены в таблице.

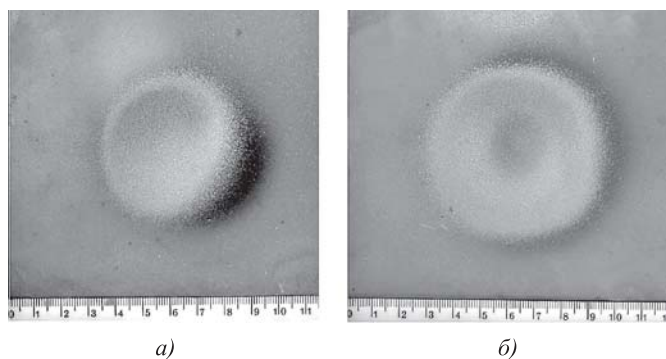


Рис. 4. Пятна напыления ферромагнитного материала ПГ-10Н-04:

a — без магнитного поля; *б* — ВМПП постоянное

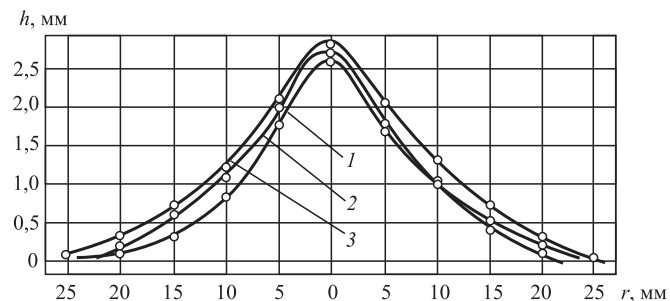


Рис. 5. Поперечные сечения h пятна напыления порошка ПГ-10Н-04, напыление в течение 30 с:

1 — без магнитного поля; *2* — ВМПП знакопеременное, 50 Гц; *3* — ВМПП постоянное

Влияние магнитного поля на процесс плазменного напыления покрытия наблюдается на примере формирования одиночного "пятна" (радиусом r) напыленного ферромагнитного материала ПГ-10Н-04 (рис. 4), а также на основе измерений характерных размеров "металлизационной фигуры" в условиях действия магнитного поля и без него (рис. 5).

Согласование пространственного положения твердой и газовой фаз двухфазного потока при наложении ВМПП, а также рассредоточение частиц порошка в объеме высокотемпературного газового потока существенно улучшают условия нагревания и ускорения частиц порошка, увеличивают коэффициент использования материала.

При условии применения поля постоянно-го направления это проявляется в значительном (в некоторых случаях до 1,5...1,7 раза) увеличении общего объема напыленного материала и существенного увеличения толщины слоя (поперечного сечения) покрытия h , особенно в центральной части пятна напыления (см. рис. 5). Одновременно форма пятна напыления становится более симметричной и, в отличие от случая напыления диамагнитного материала, заметно увеличивается его площадь в плане (см. рис. 4).

Упомянутые процессы вследствие воздействия ВМПП происходят на начальном этапе введения и пребывания частиц в высокотемпературном газовом потоке, что способствует равномерному размещению дисперсной фазы в пределах активной зоны (при условии ее пребывания в тепловом состоянии ниже температуры Кюри). Наблюдается снижение пористости и ее более равномерное распределение по сечению пятна напыления (рис. 6, *a*), а также наблюдается увеличение прочности сцепления (рис. 6, *б*).

Уменьшение пористости материала покрытия прямо связано с изменением структуры покрытия, при этом прочность сцепления покрытия с основой растет как в центре пятна, так и на периферии, с одновременным выравниванием значений по сечению пятна напыления.

Покрытия, полученные при напылении с применением ВМПП, характеризуются также повы-

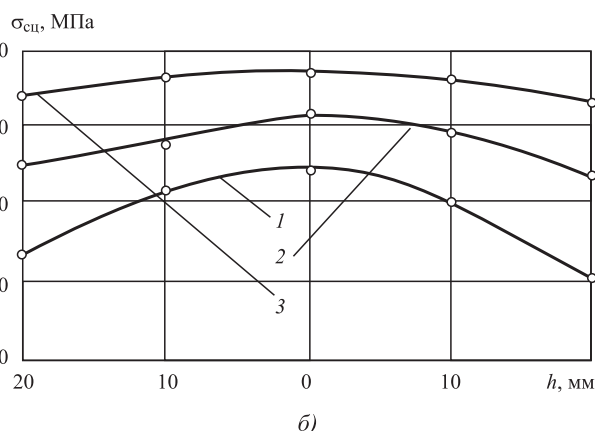
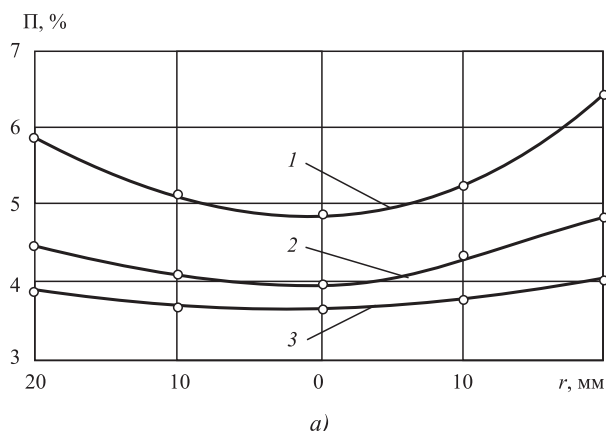


Рис. 6. Распределение пористости (*a*) и локальных значений прочности сцепления покрытия (*б*) из порошка ПГ-10Н-04 с основой в поперечном сечении пятна напыления:

1 — без магнитного поля; *2* — ВМПП знакопеременное; *3* — ВМПП постоянное

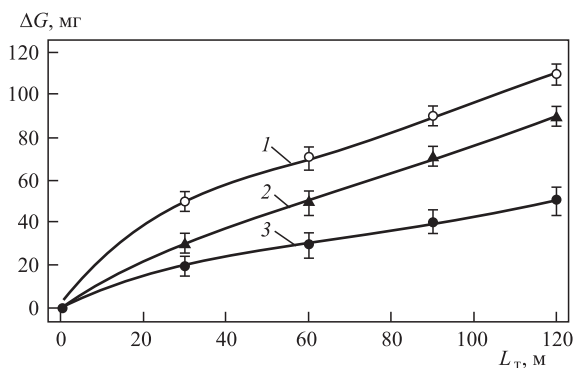


Рис. 7. Зависимость абразивного износа покрытия ΔG от пути трения L_t :

1 — без магнитного поля; 2 — ВПМП знакопеременное, 50 Гц; 3 — ВПМП постоянное

шенной стойкостью в условиях износа. На покрытиях, полученных в условиях воздействия ВПМП, при трении наблюдается меньшее количество борозд — следов действия абразивного материала и меньшая их глубина, визуально не наблюдается отслаивания частей покрытия, что свидетельствует об уменьшении интенсивности износа. На рис. 7 представлена зависимость износа покрытия от пути трения.

Согласно экспериментальным данным износостойкость покрытий, полученных напылением с применением ВПМП, повышается в 1,4...1,9 раза по сравнению с покрытиями, полученными обычным способом. При этом в большей степени износостойкость повышается при применении управляющего магнитного поля постоянного направления.

Активация процесса напыления с использованием наномодифицированных порошков

Особые условия возникают при напылении ультра- и нанодисперсных порошков в смеси с макрочастицами в силу влияния ряда факторов. К числу таких причин можно отнести интенсивное перемешивание плазменной струи с окружающей атмосферой, пульсации в результате шунтирования дуги, а также значительные градиенты скорости и температуры в поперечном сечении двухфазного плазменного потока. Это приводит к фракционированию гетерогенной порошковой смеси по скоростям и температурам, что особенно отражается при осаждении одновременно макро- и нанодисперсных частиц. Поэтому желательно использовать для напыления плазмотроны с генерацией ламинарной плазменной струи, когда наблюдается сохранение заданного состава плазмы.

В данном случае использовали плазмотрон с выносным анодом, работающий на аргоне, который обеспечивает возможность введения порошка в область дугового промежутка перед анодным пятном. Конструкция и параметры работы плазмотрона обеспечивают формирование протяженной ламинарной плазменной струи с малым углом раскрытия 2...6°, в результате чего уменьшается подмешивание холодного газа в высокотемпературную струю и увеличивается проплавление керамических частиц порошка. Дополнительно для стабилизации процесса генерации плазменного потока в конструкции плазмотрона с частично вынесенной дугой предусмотрена управляющая магнитная система. С помощью аналогового импульсного тесламетра измеряли уровень индукции магнитного поля в радиальном и аксиальном направлениях.

Для оптимизации процесса напыления с использованием внешнего магнитного поля, способов управления его параметров был проведен статистический анализ и получено уравнение регрессии. В качестве критерия оптимизации процесса плазменного напыления (функции отклика) была принята сила сцепления покрытия, значения которой получили, используя метод нормального отрыва в соответствии со стандартом ASTM C 633. В качестве покрытий для отработки оптимального режима использовали чистый керамический порошок оксида алюминия (Al_2O_3), который имеет низкие показатели прочности сцепления. Анализ математической модели позволяет оптимизировать процесс напыления с точки зрения прочности сцепления покрытия с основой, при этом определяющими факторами являются токи соленоида и плазменной дуги.

Для оптимальных режимов напыления с использованием ВПМП и наносоставляющих получены покрытия, отличающиеся повышенными эксплуатационными показателями, в частности, такими, как коэффициент использования материала (КИМ) и износостойкость (рис. 8, 9).

На рис. 8, а представлены значения КИМ для модифицированного наночастицами оксида алюминия в зависимости от дистанции напыления. Анализ полученных данных показывает, что при напылении керамического модифицированного порошка оксида алюминия максимальное значение КИМ достигается при дистанции напыления ≈ 100 мм и составляет 75...80 %, при этом количество расплавленных частиц максимально. При увеличении дистанции напыления частицы, которые двигаются по периферии плазменной струи, могут затвердеть еще до взаимодействия

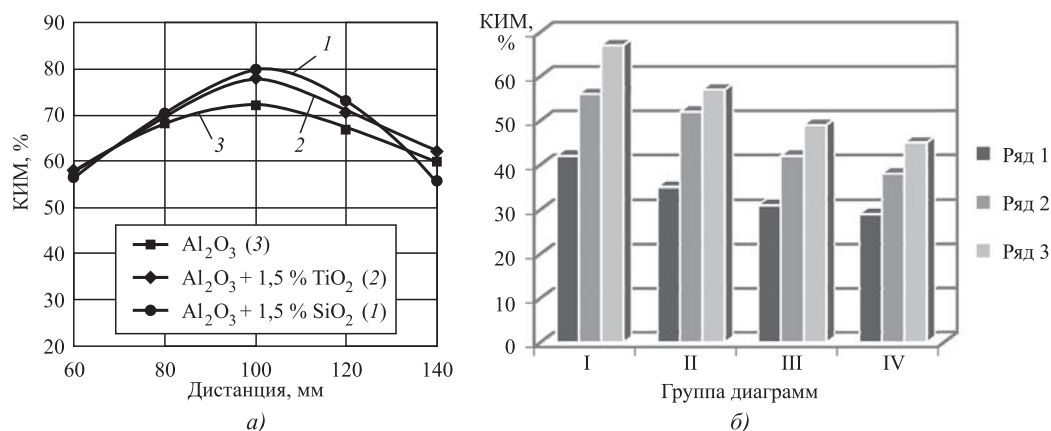


Рис. 8. Зависимость КИМ от условий плазменного напыления:

a — модифицированного порошка Al₂O₃ от дистанции напыления; *б* — ферромагнитного порошка ПГ-10Н-04; ряд 1 — без магнитного поля; ряд 2 — ВПМП знакопеременное; ряд 3 — ВПМП постоянное; I — фракция порошка 63...100 мкм, расход материала 2,0 кг/ч; II — 63...100 мкм, 4,0 кг/ч; III — 100...160 мкм, 2,0 кг/ч; IV — 100...160 мкм, 4,0 кг/ч

с основной или вообще не достигнуть ее. Значительное уменьшение дистанции напыления приводит к перегреву частиц и их разбрызгиванию при попадании на основу. Уменьшение же КИМ при напылении чистого оксида алюминия (72 %) объясняется большей трудностью плавления керамического ядра по сравнению с модифицированными частицами, где TiO₂ и SiO₂ способствуют более полному его проплавлению.

На рис. 8, б приведены группы диаграмм (I–IV), описывающие результаты положительного влияния ВПМП обеих конфигураций на КИМ для разного расхода и фракционного состава материала. При этом постоянное магнитное поле более

эффективно влияет на уровень коэффициента использования материала, чем знакопеременное. Гармонизация взаимного положения фаз гетерогенного потока и рассредоточения частиц ферромагнитного материала в объеме струи под действием магнитного поля создает благоприятные условия для равномерного нагревания и ускорения всей совокупности частиц твердой фазы: частицы большего размера, как более инерционные, занимают центральную часть высокотемпературного газового потока, а более мелкие — частично перемещаются на периферийные участки струи.

Результаты активации процесса формирования плазменных покрытий с использованием нанопорошков на примере износостойкости этих покрытий приведены на рис. 9. На рис. 9, а представлена кинетика изнашивания покрытий на основе модифицированного титаном и алюминием порошка оксида алюминия (Al₂O₃/Ti/Al), а также смеси порошков из макрочастиц (ПГ-19М-01) и наночастиц (SiO₂) (рис. 9, б). Полученные данные подтверждают эффективность использования порошковой смеси с наносоставляющими. Износ покрытий на основе немодифицированного Al₂O₃ в 7...8 раз больший (см. рис. 9, а, кривая 1). Износостойкость покрытия с аэросилом на 5...10 % выше, чем у покрытия на основе чистого ПГ-19М-01 (см. рис. 9, б, кривая 2).

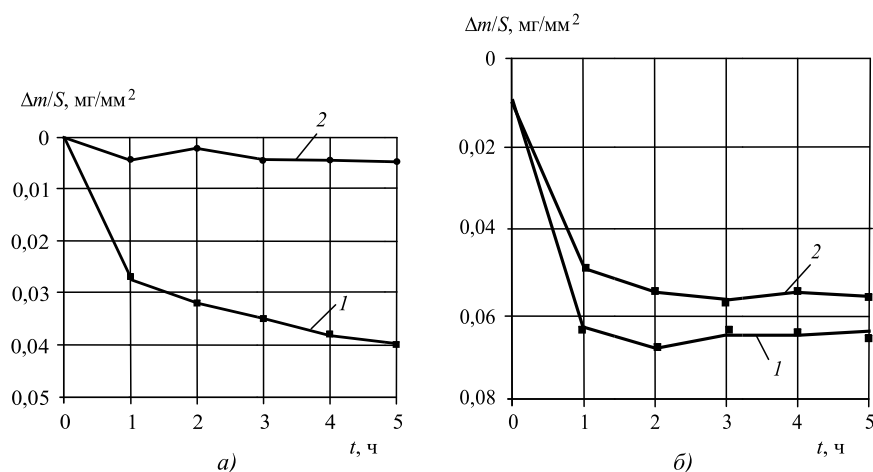


Рис. 9. Кинетика изнашивания газотермических покрытий:

a — чистого Al₂O₃ (1) и модифицированного титаном и алюминием Al₂O₃/Ti/Al (2); *б* — на основе порошков ПГ-19М-01 (1) и смеси ПГ-19М-01 + аэросил (2)

Выводы

При управлении гетерогенным потоком ВПМП обоих типов (постоянного направления и знакопеременного) происходит более равномерное и более интенсивное нагревание и ускорение частиц порошка, что способствует формированию определенной структуры покрытия. При этом установлено существенное снижение пористости покрытия и ее более равномерное распределение по пятну напыления, а также наблюдается уменьшение градиента микротвердости в покрытии.

Прочность сцепления покрытия с основой при наложении ВПМП увеличивается как в центре пятна на 23...25 %, так и на ее периферии на 44...52 %, с одновременным выравниванием значений по сечению пятна напыления.

Внешнее поперечное магнитное поле, которое действует в области введения дисперсного материала в высокотемпературный газовый поток, позволяет повысить коэффициент использования материала в процессе нанесения покрытия (в конкретных случаях в 1,3...1,5 раза). Этот показатель изменяется в зависимости от материала, расхода и грануляции напыляемого порошка.

Доказано, что при плазменном порошковом напылении с применением внешнего увеличения магнитного поля как постоянного направления, так и знакопеременного, происходит увеличение стойкости полученного покрытия к абразивному износу (в конкретных случаях в 1,4...1,9 раза). На примере модифицированного оксида алюминия, а также смеси макрочастиц порошка ПГ-19М-01 с нанопорошком аэросила установлена эффективность использования порошковой смеси с

наносоставляющими для уменьшения износа покрытий.

В общем случае постоянное магнитное поле более эффективно по сравнению с знакопеременным влияет на структуру, свойства, в частности, на износостойкость, а также на такой показатель, как коэффициент использования материала.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Копылов В.И., Смирнов И.В., Рыбаков С.В.** Влияние состава и микроструктуры керамических оксидных покрытий на физико-механические свойства композиционных материалов // Проблемы техники. 2005. № 2. С. 37—43.
2. **Kopylov V.I.** Effect of multiphase structure of plasma coatings on their elastic and strength properties // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2016. 5/5 (83). P. 49—57.
3. **Копылов В.И., Смирнов И.В., Селіверстов І.А.** Процеси іонно-плазмового плакування порошків для газотермічних покриттів // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". 2009. № 3 (65). С. 11—20.
4. **Исследование** триботехнических свойств плазменных керамических покрытий на основе диффузионно-легированного оксида алюминия / О.Г. Девойно, М.А. Кардаполова, О.К. Яцкевич, В.Л. Николаенко // Вестник Гродзенского университета имени Янки Купалы. Серия 6. Техника. 2013. № 1 (145). С. 18—23.
5. **Пащенко В.М.** Генерування потоків плазми та керування їх енергетично просторовими параметрами. Київ: Гнозіс, 2014. 283 с.





^{1, 2}Д.Н. Коротаяев, ¹К.Н. Полещенко, ²Е.Н. Еремин, ³Е.Е. Тарасов
(¹Сибирский государственный автомобильно-дорожный университет, Омск,
²Омский государственный технический университет,
³ФГУП "ФНПЦ "Прогресс", Омск)
E-mail: weld_techn@mail.ru

Влияние кластерно-градиентной архитектуры наноструктурных топокомполитов на особенности трибовзаимодействия с гетерофазным материалом*

Проведены исследования износостойкости и особенностей изнашивания наноструктурных топокомполитов с кластерно-градиентной архитектурой (КГА). Рассмотрена специфика трибоконтатного взаимодействия в условиях микрорезания. Изучены причины сохранения высокой износостойкости данного класса наноструктурных топокомполитов. Проанализированы механизмы диссипации энергии из зоны трибоконтатта, обусловленные наногометрией и структурно-фазовым строением топокомполитов с КГА. Показана роль трибоактивированных деформационных и диффузионных процессов в обеспечении повышенной износостойкости топокомполитов на твердосплавной основе. Проведена их апробация в условиях лезвийной обработки жаропрочного титанового сплава.

Ключевые слова: наноструктурные топокомполиты, ионно-плазменная обработка, кластерно-градиентная архитектура, трибовзаимодействие, микрорезание, нанокластерная морфология, гетерофазный материал.

The wear resistance and wear characteristics of cluster-gradient architecture (CGA) nanostructured topocomposites are studied. The specifics of tribocontact interaction under microcutting conditions is considered. The reasons for retention of high wear resistance of this class of nanostructured topocomposites are studied. The mechanisms of energy dissipation from the tribocontact zone, due to the nanogeometry and the structural-phase structure of CGA topocomposites are analyzed. The role of triboactivated deformation and diffusion processes in providing increased wear resistance of carbide-based topocomposites is shown. They are tested under the conditions of blade processing of heat-resistant titanium alloy.

Keywords: nanostructured topocomposites, ion-plasma treatment, cluster-gradient architecture, tribointeraction, microcutting, nanocluster morphology, heterophased material.

Введение

Развитие инструментального производства в настоящее время связано с использованием ионно-плазменных покрытий на основе соединений переходных металлов, а также керамики, обладающих высокой твердостью и износостойкостью. В промышленных масштабах ведущими инструментальными фирмами-производителями (Sandvik

Coromant, Balzers, Cemicon, Metaplas, Leybold, Platit и др.) освоен выпуск многослойных композиционных покрытий толщиной до нескольких микрометров. Наиболее широкое распространение получил метод физического осаждения — PVD (Physical Vapor Deposition) покрытий в вакууме на инструмент и режущие сменные пластины. Метод PVD обладает широкими возможностями получения покрытий с требуемыми характеристиками по толщине, структуре и составу. Кроме того, метод PVD достаточно технологичен. Вместе с тем использование режущего инструмента с PVD-покрытием позволяет осуществлять обработку сталей и сплавов практически без смазочно-охлаждающих

* Работа выполнена при финансовой поддержке Мин-обнауки РФ в рамках государственного задания, проект № 11.11760.2018/11.12.

жидкостей. Развитие метода PVD получило в реализации технологий вакуумно-дугового синтеза MEVVA (Metal Vapor Vacuum Arc), позволяющих формировать покрытия различного функционального назначения, в том числе комбинированных покрытий с чередующимися метастабильными и многокомпонентными слоями.

Несмотря на создание покрытий многослойно-композиционного типа, характеризующихся наличием барьерных слоев, проблема получения надежных интерфейсов в области границ раздела поверхностных композиций остается нерешенной. В частности, при обработке резанием особопрочных жаростойких сплавов в условиях элементного стружкообразования эффективность применения покрытий снижается в связи с низкой циклической трещиностойкостью последних [1–3]. Перспективным направлением совершенствования покрытий является разработка новых вариантов архитектуры одно-, многослойных и мультислойных наноразмерных покрытий [4–9]. В рамках данного подхода появляется возможность получения комбинированных покрытий, включающих чередующиеся метастабильные и многокомпонентные структуры, сочетающие различные свойства отдельных слоев в одном покрытии. Следует отметить актуальность разработки сверхтвердых и ультратвердых покрытий с наноконструктивной архитектурой, в которых уровень значений твердости может достигать 40...60 ГПа и 100 ГПа соответственно [3]. Строение таких покрытий, как правило, двухфазное. Кристаллические зерна нитридов, карбидов, боридов и оксидов примерно размером 3...10 нм окружены аморфной матрицей, состоящей, например, из металлов или алмазоподобного углерода. Размеры между кристаллами составляют 1...3 нм.

В последнее время авторами разрабатывается концепция наноструктурных топокомпозиционных покрытий или наноструктурных топокомпозиционных (НСТК) [10–14], являющихся структурно-зависимыми от геометрии подложки, толщины покрытия и его морфологии. Оценка работоспособности изделий с такими покрытиями подтверждена проведенными исследованиями и производственными испытаниями. Однако эффективность их применения в области технологии обработки материалов резанием находится на стадии апробации.

Постановка задачи

Несмотря на то что в рамках технологии MEVVA удастся синтезировать широкую гамму многокомпонентных, многослойных покрытий

различного функционального назначения, задача получения покрытий с высокой циклической трещиностойкостью остается нерешенной. Устранить негативную роль выраженных границ раздела, являющихся протяженными зонами концентраторов напряжений, принципиально не удастся. Внутренние напряжения на границах раздела покрытия—подложка в условиях циклического трибонагружения инициируют образование и развитие трещин, что может привести к выкрашиванию и отслаиванию покрытий на контактных поверхностях режущего инструмента уже на начальной стадии его эксплуатации. Характер развития хрупкого разрушения двухслойных покрытий в условиях циклического трибомеханического нагружения под действием нормальных и касательных напряжений можно представить в виде двух основных стадий, показанных на рис. 1: образование трещин (рис. 1, а) и "раскрытие" трещины в области внутренней границы (рис. 1, б).

Повышение циклической трещиностойкости покрытий может быть обеспечено за счет реализации авторской концепции кластерно-градиентной архитектуры (КГА) наноструктурных топокомпозиционных [10–14]. Указанная концепция основывается на совместной реализации двух идей обеспечения повышенной циклической трещиностойкости покрытий: идеи ограничения формирования дислокаций и их перемещений, положенной в основу создания сверхтвердых и ультратвердых наноконструктивных покрытий, и идеи создания локально-диссипативных структурных элементов — нанокластеров. В частности, в условиях трибоконтakta НСТК диссипация энергии трещин достигается за счет рассеяния энергии непосредственно на кластерах, "наноупругости" при их сдвиге и повороте, а также торможения трещин на внутренних границах раздела между двумя слоями путем создания барьеров в виде "волнообразных" переходных слоев (рис. 2).

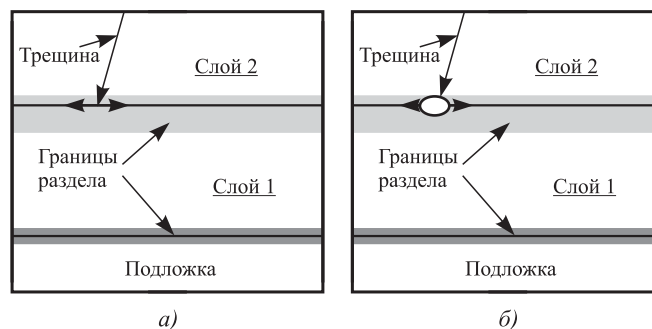


Рис. 1. Схема механизма хрупкого разрушения покрытий с двухслойной архитектурой

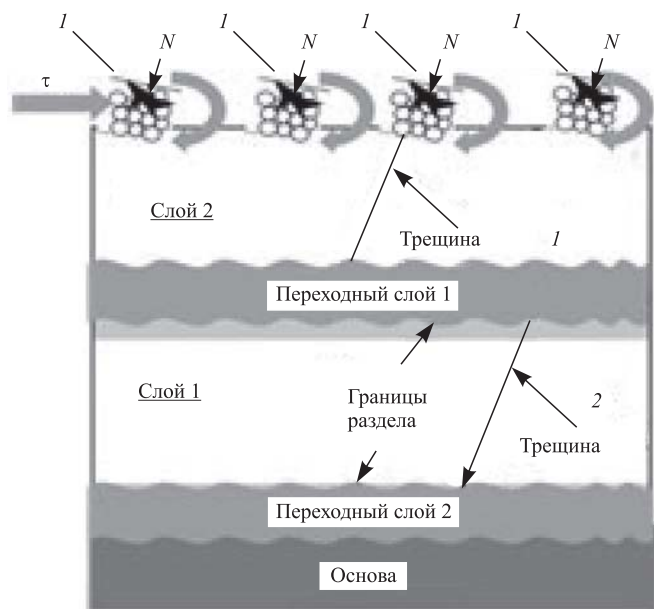


Рис. 2. Схема кластерно-градиентной архитектуры наноструктурных топокомпозитов:

I — нанокластеры; *N* и τ — нормальные и тангенциальные напряжения соответственно (стрелками обозначены направления сдвига и поворота нанокластеров)

Кроме того, при определенных условиях трибо механического нагружения НСТК возможны и другие механизмы проявления их структурно-диссипативных свойств.

Цель работы — исследование влияния кластерно-градиентной архитектуры наноструктурных топокомпозитов на их трибологические свойства и износостойкость в условиях микрорезания.

Методы и материалы исследования

Исследование износостойкости НСТК с кластерно-градиентной архитектурой (таблица) осуществлялось в условиях микрорезания. Для

Кластерно-градиентная архитектура НСТК

Обозначение слоя (см. рис. 2)	Элементы слоя	Толщина слоя, нм
Основа	Твердый сплав ВК8	$5 \cdot 10^{-3}$
Переходный слой 2	Ti, Co, W, C, N, O	≤ 10
Слой покрытия 1	TiN	30 ± 1
Переходный слой 2	Ti, Al, C, N, O с нанокластерной морфологией	≤ 5
Слой покрытия	(Ti, Al)N	30 ± 1

этого проводили сравнительную оценку изменения значений коэффициента трения и износостойкости образцов: ВК8 с покрытием TiN ($h = 4$ мкм), ВК8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N ($h = 60$ нм).

Синтез наноструктурных топокомпозитов КГА осуществлялся посредством ионно-плазменной обработки на модернизированной установке ННВ-6.6 с использованием трехкатодной системы при наличии отражателя и шаблона в несколько этапов [11, 12]. На первом этапе очищали образцы в тлеющем разряде, на втором этапе проводили распыление поверхности. Третий этап состоял в нанесении пленки из TiN толщиной порядка 30 нм и формирования переходного слоя на границе с материалом основы. На четвертом этапе наносили пленку таких же размеров состава (Ti, Al)N. Третий и четвертый этапы осуществляли в условиях каскадного перекрестного эффекта [14]. Для этого на подложку из сплава ВК8 подавали высоковольтные импульсы напряжения с амплитудой 20 кВ, длительностью 10...20 мкс и частотой 10...15 кГц при напряжении смещения 1000 В.

Процесс микрорезания моделировали на специальной установке для испытания тонких модифицированных слоев, в которой реализована схема испытаний: неподвижный индентор — вращающийся диск. Для этого использовали алмазный индентор с радиусом закругления $R = 230$ мкм. Частота вращения образцов составляла 200 мин^{-1} . Нагрузка на индентор была равной $N = 1$ Н.

Исследовали эффект трибоупрочнения посредством просвечивающей электронной микроскопии и масс-спектрометрии вторичных ионов. Изучение структурного состояния приповерхностного слоя после изнашивания проводили на микроскопе марки ЭМВ-100Л методом просвечивающей электронной дифракционной микроскопии тонких фольг. Фольгу получали из вырезанных параллельно обработанной поверхности пластинок твердого сплава, которые затем истончали посредством электролитической обработки. Для определения химического состава дорожек износа получали концентрационные зависимости распределения элементов методом масс-спектрометрии вторичных ионов на масс-спектрометре SAJW-0.5 SIMS.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 3 показаны результаты исследования износостойкости и, соответственно, изменения коэффициентов трения различных вариантов твердых сплавов с покрытиями. Видно, что введенные зависимости коррелируют между собой.

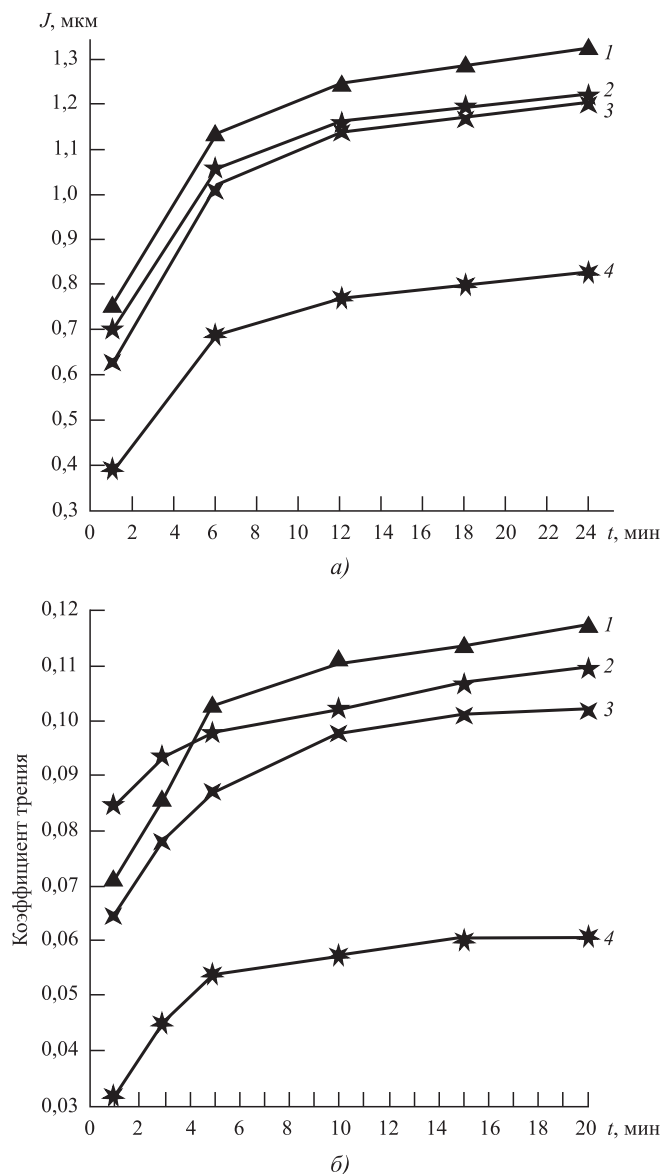


Рис. 3. Зависимость глубины канавки износа J (а) и коэффициента трения (б) твердых сплавов от времени испытания t :

1 — ВК8; 2 — ВК8 с покрытием TiN ($h = 4$ мкм); 3 — ВК8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N ($h = 60$ нм); 4 — ВК8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N (КГА) ($h = 60$ нм)

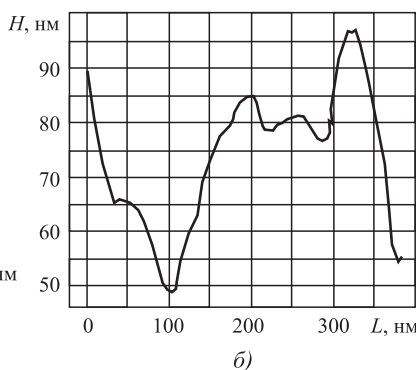
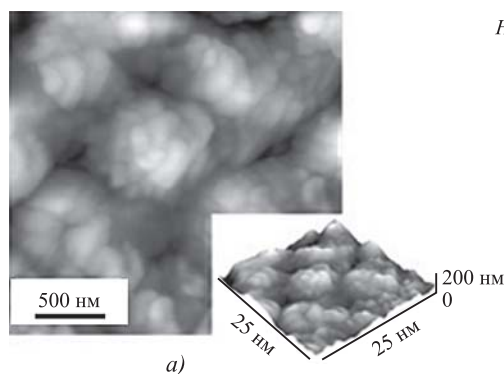


Рис. 4. Типичное изображение поверхности наноструктурных топокомпозитов с нанокластерной морфологией:

а — окружностями показаны области расположения нанокластеров; б — размеры кластеров

Участку начального изнашивания соответствуют меньшая интенсивность и меньший коэффициент трения.

Причину наблюдаемых закономерностей можно интерпретировать с позиций совокупного влияния двух групп факторов. Первая группа факторов связана с изменением протекания физико-механических процессов при трибомеханическом контакте индентора с поверхностью НСТК. Вторая — с трибоактивируемыми процессами структурно-фазовых изменений в приповерхностных слоях топокомпозита на твердосплавной основе.

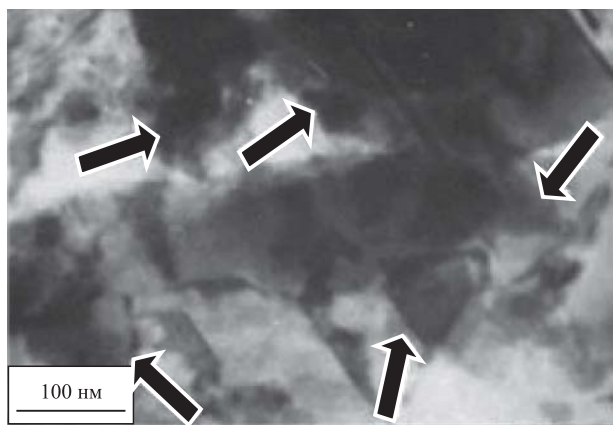
Первая стадия трибомеханического контакта — это соприкосновение индентора с явно выраженной структурной неоднородной поверхностью НСТК из-за наличия кластерных образований, протяженность которых достигает 300 нм и высота 100 нм (рис. 4). Вторая стадия — стадия взаимодействия индентора с нанокластером, в результате которого происходит упругопластическая деформация модифицированного слоя и диссипация энергии трибоконтакта как за счет рассеяния непосредственно на кластерах, так и путем реализации механизма деформации, развивающейся в соответствии с положениями физической мезамеханики, по схеме сдвиг + поворот [15].

Третья стадия — стадия контактного взаимодействия, при которой трение переходит в процесс микрорезания (срезания) модифицированных слоев наноструктурного топокомпозита, сопровождающегося циклическим характером нагружения. Четвертая стадия — стадия трибовзаимодействия алмазного индентора непосредственно с твердосплавной основой, динамика которого определяется особенностью ее гетерогенного строения. Специфика данной стадии состоит в том, что процесс микрорезания также отличается циклическим характером вследствие периодических соударений индентора с карбидами твердого сплава.

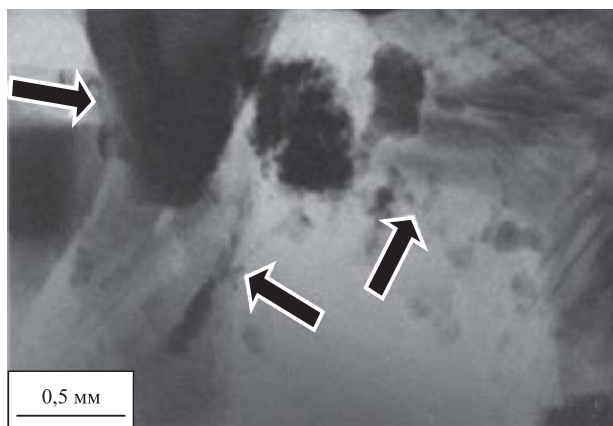
Несмотря на то что непосредственный трибоконтакт индентора с твердосплавной основой на-

чинается уже по истечении примерно 5 мин, наблюдается сохранение повышенной износостойкости твердосплавного материала (см. рис. 3, *a*). Полученные данные позволили предположить, что указанные эффекты обусловлены образованием вторичных структур [16]. Это подтверждается полученными результатами, приведенными на рис. 5. Видно, что даже по истечении 10 мин микрорезания в приповерхностном слое твердого сплава наблюдаются признаки его деформационного упрочнения, о чем свидетельствует образование наряду с блочной структурой кобальтовой связки деформационных микродвойников в карбидных зернах.

Кроме того, о формировании вторичных структур уже на начальной стадии микрорезания в результате трибоактивируемых процессов свидетельствуют результаты исследования химиче-



a)



б)

Рис. 5. Электронно-микроскопическое изображение структуры сплава в зоне контакта; время микрорезания 10 мин: *a* — микродвойники в карбиде вольфрама и блочная дислокационная субструктура в Со-фазе в области межфазной границы; *б* — деформационные микродвойники в карбиде вольфрама (указаны стрелками)

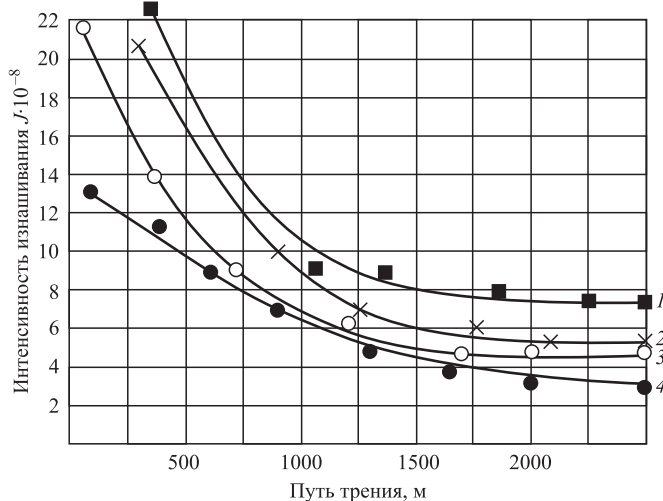


Рис. 7. Кинетические зависимости изнашивания твердых сплавов ВК8 при резании титанового сплава ОТ-4: 1 — ВК8; 2 — ВК8 с покрытием TiN ($h = 4$ мкм); 3 — ВК8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N ($h = 60$ нм); 4 — ВК8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N (КГА); условия резания: скорость $v = 80$ м/мин; подача $S = 0,07$ мм/об; глубина резания $t = 1$ мм

ского состава канавок по мере их изнашивания (рис. 6, см. обложку).

Как показывает анализ приведенных зависимостей, по мере изнашивания НСТК в области контактных поверхностей увеличивается содержание кислорода и азота, что свидетельствует об образовании метастабильных кислородо- и азото-содержащих соединений. Полученные данные хорошо согласуются с результатами предыдущих исследований [17], в которых обосновывается положительная роль образования энергоемких оксидных фаз, способствующих эффективной диссипации энергии фрикционного контакта. Кроме того, образование указанных соединений может способствовать защите контактных площадок от адгезионного схватывания. Это подтверждается результатами исследования НСТК в условиях лезвийной обработки титанового сплава, характеризующейся процессами циклических нагрузок вследствие элементного стружкообразования и интенсивным протеканием адгезионно-усталостных явлений (рис. 7), что проявляется в снижении интенсивности изнашивания как на участке начального износа, так и на участке установившегося изнашивания.

Заключение

Проведенные исследования показали целесообразность получения наноструктурных топо-

композитов с кластерно-градиентной архитектурой для технологических целей. Было изучено влияние их морфологии на специфику трибозаимодействия в условиях микрорезания и выявления специфики циклического нагружения. Анализ полученных результатов показал, что высокая износостойкость НСТК сохраняется и после изнашивания модифицированных слоев, что обусловлено формированием вторичных структур. Причем на начальном этапе основной вклад в обеспечение износостойкости вносят трибоактивированные диффузионно-окислительные процессы, а в последующем сохранение высоких эксплуатационных свойств обусловлено формированием упрочненных подслоев на значительных глубинах.

На основе проведенных исследований установлено, что создание наноструктурных топокомпозитов с кластерно-градиентной архитектурой позволяет не только повысить износостойкость поверхностных слоев материала в модельных условиях микрорезания, но и обеспечить повышение износостойкости твердосплавного режущего инструмента при лезвийной обработке жаропрочного титанового сплава. В частности, использование наноструктурного твердосплавного инструмента с кластерно-градиентной архитектурой (VK8 с покрытием TiN/(Ti, Al)N) приводит к снижению интенсивности его изнашивания по сравнению с исходным инструментом в период приработки в 2 раза, в период установившегося процесса изнашивания — в 1,5 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Табаков В.П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. **Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K.** Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating // *Key Eng. Materials*. 2012. Vol. 496. P. 67–76.
3. **Veprek S., Argon A.S.** Mechanical properties of super hard nanocomposites // *Surf. Coat. Technol.* 2001. Vol. 146–147. P. 175–182.
4. **Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings** / S.N. Grigoriev, A.A. Vereschaka, A.S. Vereschaka, A.A. Kutin // *Procedia CIRP*. 2012. No. 1. P. 318–323.
5. **Vereschaka A.S., Karpuschewski B., Dubner L.** Development of the method of obtaining nanostructured functional coatings // *Proceedings of the Intern. Scient. Conf. "Production. Technology"*. 2008. Vol. 1. P. 62.
6. **Smith I.J., Münz W.D., Donohue L.A. et al.** Improved $Ti_{1-x}Al_xN$ PVD coatings for dry high-speed cutting operations // *Surface Eng.* 1998. Vol. 14 (1). P. 37–41.
7. **Blinkov I.V., Volkhonskii A.O., Anikin V.N. et al.** Phase composition and properties of wear resistant Ti–Al–Cr–Zr–Nb–N coatings manufactured by the arc physical deposition method // *Inorganic Materials: Applied Research*. 2011. Vol. 2. No. 3. P. 285–291.
8. **High-performance wear-resistant ion-plasma coatings based on five-component nitrides for a hard-alloy cutting tool operating under constant loads** / A.O. Volkhonskii, I.V. Blinkov, A.V. Elyutin, O.B. Podstyzhonok // *Metallurgist*. 2010. Vol. 54. P. 374–377.
9. **Blinkov I.V., Volkhonsky A.O., Podstyzhonok O.B.** Structure and properties of multilayer coatings deposited with pvd-arc technology // *Surface engineering*. 2011. No. 2. P. 57–63.
10. **Разработка и получение наноструктурных топокомпозитов** / П.Б. Гринберг, Д.Н. Коротаев, К.Н. Полещенко, В.И. Суриков // *Вестник СибАДИ*. 2015. Вып. 3 (43). С. 39–45.
11. **Метод получения наноструктурированных топокомпозитов для повышения несущей способности конструктивных элементов энергооборудования** / П.Б. Гринберг, К.Н. Полещенко, В.Н. Горюнов, Е.Е. Тарасов // *Вестник Омского университета*. 2012. № 2. С. 253–258.
12. **Полещенко К.Н., Коротаев Д.Н., Тарасов Е.Е.** Структурно-морфологические особенности наноструктурных топокомпозитных покрытий триботехнического назначения // *Вестник СибАДИ*. 2016. Вып. 4 (50). С. 126–132.
13. **Korotaev D.N., Tarasov E.E., Poleschenko K.N. et al.** Formation of wear resistant nanostructural topocomposite coatings on metal materials by ionic-plasma processing // *Journal of Physics: Conference Series*. 2018. Vol. 1050 (1). P. 1–6.
14. **Grinberg P.B., Poleschenko K.N., Korotaev D.N. et al.** Receiving nanostructural topocomposite coatings in terms of the cascade cross effect // *IOP Conf. Series: Journal of Physics: Conf. Series*. 2019. Vol. 1210. P. 1–8.
15. **Панин В.Е., Сергеев В.П., Панин А.В.** Наноструктурирование поверхностных слоев и нанесение наноструктурных покрытий. Томск: Изд-во ТПУ, 2008. 285 с.
16. **Полещенко К.Н., Орлов П.В., Машков Ю.К. и др.** Трибостимулированные структурные превращения в приповерхностных слоях твердых сплавов // *Трение и износ*. 1998. Т. 19. № 4. С. 459–464.
17. **Agafonov A.L., Gering G.I., Moiseeva J.S. et al.** Tribostimulated Structural — Phase transformations and mass transfer in the modified hard alloys // *9th Nordic Symposium on Tribology — NORDTRIB*. VTT, Finland. 2000. Vol. 3. P. 809–818.

Ю. Шмербекк, Д.Б. Мигас
(Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, г. Минск),
А.И. Гутковский, Л.И. Гречихин
(ООО "БСВТ новые технологии", г. Минск)
E-mail: Gretchihin@yandex.ru

Эмиссионный портрет поверхности упрочняющего конструкционного материала

Атомы на поверхности твердых тел находятся в виде отрицательных ионов. Для анализа эмиссионного портрета исследуемой поверхности твердого тела сканирующим туннельным микроскопом с зондом из вольфрама следует подавать напряжение не более 2 В. Исследуемая автоэлектронная эмиссия электронов реализуется с одного эмиссионного центра. В сканирующем туннельном микроскопе ponderomotorные силы существенно искажают структуру поверхности твердого тела. Автоэлектронная эмиссия с поверхности твердого тела осуществляется совместно с отрицательных ионов и уровня Ферми.

Ключевые слова: отрицательные ионы, поверхность, автоэлектронная эмиссия, туннельный микроскоп, уровень Ферми.

Atoms on the surface of solids are in the form of negative ions. To analyze the emission portrait of the crystal surface with scanning tunnel microscope with tungsten probe, voltage of not more than 2 V should be applied. Studied autoelectronic emission in scanning tunnel microscope is realized from one emission center. In scanning tunnel microscope, ponderomotor forces significantly distort of the surface structure of solid. Autoelectronic emission from the surface of solid is performed together with negative ions and Fermi level.

Keywords: negative ions, surface, autoelectronic emission, tunnel microscope, Fermi level.

Введение

В процессе упрочнения конструкционных материалов на их поверхность наносится тонкий слой упрочняющего материала. При этом осуществляется контроль состояния поверхности до и после нанесения покрытия. Для этого применяются разного рода микроскопы. В последнее время широко используются сканирующие туннельные микроскопы с разрешением 1 Å. При этом получают эмиссионный портрет исследуемой поверхности, используя автоэлектронную эмиссию, а не туннельный эффект [1]. Физическое описание явления автоэлектронной эмиссии разработано не достаточно. Например, квантовая механика автоэлектронную эмиссию трактует как результат прохождения свободных электронов сквозь потенциальный барьер. В этом случае плотность эмиссионного электрического тока определяется следующим образом [2]:

$$J_e = bE_3^2 \exp\left(-\frac{a}{E_3}\right), \quad (1)$$

где E_3 — напряженность электрического поля. Константа a зависит от работы выхода, а постоянная константа b подбирается так, чтобы по-

лучать в точности экспериментальные значения плотности тока автоэлектронной эмиссии.

При выводе формулы (1) эмиссия свободных электронов с поверхности конденсированного состояния рассматривается как просачивание сквозь потенциальный барьер, определяемый работой выхода. Для количественного описания было предложено пользоваться функциями Фаулера—Нордгейма, которые связаны со значением понижения работы выхода в теории Шоттки [2]. Физическое обоснование функциям Фаулера—Нордгейма не дается. Следовательно, предложенную теорию автоэлектронной эмиссии следует рассматривать как чисто эмпирическую.

Более полное обоснование автоэлектронной эмиссии предложено в работе [3]. В этой теории учтено увеличение работы выхода, обусловленное действием ponderomotorных сил на микровыступах по мере наложения внешнего электрического поля, и уменьшение работы выхода в соответствии с теорией Шоттки при большом количестве эмиссионных центров. В результате происходит увеличение радиуса плоского пятна на вершине выступа, с которого эмитируют электроны, и при этом возрастает количество эмиссионных центров. В соответствии с теорией Шоттки уменьшение работы выхода пропорционально корню квадратному из напряженности электрического поля.

Если рассматривать потенциальную яму, в которой пребывают валентные электроны на уровне Ферми, то эмиссионный ток возникает за пределами чувствительности измерительной аппаратуры. Аналогичная ситуация имеет место при рассмотрении электропроводности и p – n -перехода в полупроводниках [4, 5]. Оказалось, что атомы на поверхности кристалла, которые обладают сродством к электрону, пребывают в виде отрицательных ионов. Поэтому не уровень Ферми и, соответственно, не работа выхода, а величина сродства к электрону определяет электрические свойства полупроводников. Следовательно, и эмиссионные свойства поверхности твердого тела обусловлены пребыванием атомов на его поверхности в виде отрицательных ионов.

Если атомы на поверхности твердого тела своими встроенными дипольными электрическими моментами обладают энергией взаимодействия порядка тепловой энергии, то под воздействием внешнего электрона в процессе образования отрицательного иона произойдет разрыв диполь-дипольного взаимодействия, и энергия сродства будет соответствовать свободному атому. Такая ситуация детально рассмотрена в работе [6] для свободных атомов углерода, кислорода, меди и титана. Когда кластеры формируются трехатомными молекулами, то взаимодействие между встроенными дипольными электрическими моментами атомов внутри трехатомной молекулы не является определяющим вследствие их аллотропии расположения встроенных дипольных моментов друг относительно друга [7]. Это обусловлено тем, что трехатомные молекулы обладают сравнительно небольшим значением встроенных электрических дипольных моментов.

При больших значениях дипольного электрического момента энергия их взаимодействия может существенно превышать энергию тепловой составляющей. В этом случае дипольные электрические моменты атомов на поверхности должны преимущественно располагаться вдоль поверхности. Если внешнее электрическое поле не достаточно для разрыва диполь-дипольного взаимодействия внутри кластера твердого тела, то эмиссия свободных электронов с атомов на поверхности произойдет с эффективной энергией связи в два раза меньше энергии сродства. При внешних больших электрических полях диполь-дипольное взаимодействие внутри кластера может быть полностью разрушено. Тогда дипольные электрические моменты атомов на поверхности твердого тела под влиянием внешнего электрического поля будут располагаться преимущественно перпендикулярно поверхности. В этом случае эмиссия свободных электронов с отрицательных ионов должна определяться полным значением сродства атомов к электрону.

Учитывая всю сложность взаимодействия электрона с атомами поверхностного слоя, **цель работы** — выяснить роль отрицательных ионов в явлении автоэлектронной эмиссии при анализе свойств упрочняющей поверхности. Для достижения поставленной цели необходимо:

- 1) обосновать формирование отрицательных ионов на поверхности твердого тела;
- 2) рассмотреть условия возникновения автоэлектронной эмиссии с одного эмиссионного центра;
- 3) установить зависимость автоэлектронной эмиссии от величины напряженности электрического поля;
- 4) провести измерения величины эмиссионного электрического тока от приложенного электрического поля.

Формирование отрицательных ионов на поверхности твердого тела

Формирование отрицательных ионов на поверхности твердого тела с соответствующей энергией сродства зависит от типа кристаллической структуры, величины встроенного электрического момента и температуры твердого тела. Как при этом ведут себя металлы и полупроводники, рассмотрим подробнее.

Типичными полупроводниковыми кристаллами являются кремний и германий. Для обоснования поставленной цели достаточно рассмотреть только кремний. При формировании кристаллов валентные электроны обобщаются, и формируется положительно заряженная решетка кристалла. Нейтрализация положительного остова кристалла происходит облаком электронов, которое по энергиям описывается распределением Ферми—Дирака. Теоретический расчет распределения относительной плотности электронного облака в зависимости от энергии электронов в электронвольтах разработан в работе [8].

Атом кремния обладает следующей электронной конфигурацией: $1s^2 2s^2 2p^6 3s^2 3p^2$. Основное состояние $3p^2$ представляет собой четный триплет $3p^2\ ^3P_0$, $3p^2\ ^3P_1$, $3p^2\ ^3P_2$. Эти уровни энергии могут комбинироваться с нечетными темами $4s(^3P_0^o)$, $4s(^3P_1^o)$, $4s(^3P_2^o)$; $3s3p^3(^3D_1^o)$, $3s3p^3(^3D_2^o)$, $3s3p^3(^3D_3^o)$ и через эти термы с группой триплетных термов с возбуждением $4p$ электрона. В результате такого взаимодействия основной уровень кремния обладает уширением 5,894 эВ; возбужденные уровни $^3P_{0,1,2}^o$ — 3,914 эВ с вероятностью участия в формировании основной зоны Бриллюэна 0,212; $^3D_{1,2,3}^o$ — 2,829 эВ с вероятностью участия в формировании первой зоны Бриллюэна 0,157; группа термов $4p(^3D_{1, 2, 3})$ — 0,741 эВ с вероятностью участия в формировании первой зоны Бриллюэна

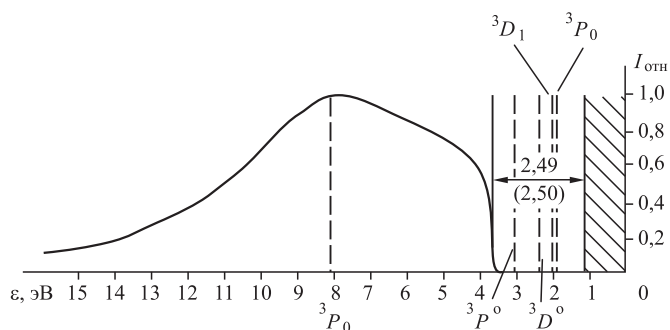


Рис. 1. Общий вид первой зоны Бриллюэна для кристалла кремния

0,055 и $4p(^3P_{0,1,2}) - 0,511$ эВ с вероятностью 0,0304. На рис. 1 приведен результат расчета по существу первой зоны Бриллюэна для кристалла кремния.

Смещение границы ионизации составляет 1,158 эВ, а положение уровня Ферми соответствует 3,648 эВ. Расстояние между максимумом энергии валентной зоны и минимумом энергии зоны проводимости составляет 2,49 эВ. Экспериментальные данные, приведенные в работе [9], составляют 2,5 эВ. В запрещенной зоне находятся уровни энергии, не занятые валентными электронами. Эти уровни представляют собой низшую точку зоны проводимости. Между этими уровнями энергии и высшей точкой валентной зоны при температуре вблизи абсолютного нуля возникает тепловая энергетическая щель $\sim 1,2$ эВ. Экспериментальное значение — 1,21 эВ [9].

Кристалл кремния обладает структурой алмаза и формируется трехатомными молекулами [7, 10]. В этом случае основной кластер содержит 12 трехатомных молекул. Второй координационный слой — 6 трехатомных молекул и третий координационный слой — 9 трехатомных молекул. Расстояние между атомами первой координационной сферы, т.е. в основном кластере, равно $a\sqrt{3}/4$. Расстояние между центральным атомом и атомами второй координационной сферы составляет $a\sqrt{3}/2$, а между центральным атомом и атомами третьей координационной сферы — a (размер кристаллической решетки типа алмаза). Кластеры в алмазной структуре формируются по типу ОЦК-структуры. На основании этих данных результирующая энергия бинарной связи атомов для кристалла кремния в нормальных условиях составляет 4,684 эВ.

Обычно полагают, что в полупроводниках уровень Ферми расположен посередине запрещенной зоны. Реально уровень Ферми, как и в металлах, отделяет валентную зону от зоны проводимости и расположен для всех веществ в максимуме валентной зоны. Расположение уровня Ферми посередине запрещенной зоны обусловлено тем, что в этой

области располагаются возбужденные уровни энергии нейтрального атома со слабым уширением и формируют как бы узкую разрешенную зону, характерную для энергетических состояний примесей. Реально это отрицательные ионы.

В запрещенной зоне кремния уровни энергии соответствуют нейтральным атомам. Расчетные значения встроенных дипольных электрических моментов для нейтральных атомов кремния — $1,87 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, однократных ионов — $0,105 \cdot 10^{-30}$ Кл·м и двукратных ионов — $1,74 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Энергия ионизации нейтральных атомов кремния составляет 8,15 эВ. Это соответствует максимуму функции распределения Ферми—Дирака. Поэтому нейтральные атомы кремния на поверхности кристалла способны захватывать встроенным дипольным электрическим моментом электроны из первой зоны Бриллюэна и пребывать в виде отрицательных ионов. Энергия сродства уровней энергии нейтральных атомов кремния, отсчитанной от дна зоны проводимости, для уровней ($^3D_1, ^3P_0$) составляет $EA_1 \cong 0,03$ эВ, а для уровней 3D_0 и 3P_0 — соответственно $EA_2 = 0,52$ эВ и $EA_3 = 1,39$ эВ [11]. Все эти уровни энергий атомарного кремния полностью заселены и пребывают в виде отрицательных ионов с вероятностью

$$A_i = \exp\left(-\frac{\mu_i - EA_i}{k_b T}\right), \quad (2)$$

где $A_i = N_i/N_0$ — отношение концентраций трехатомных молекул кремния к их общей концентрации $N_0 = 1/8r_m^3$ (r_m — радиус трехатомной молекулы кремния в кристалле);

$\mu = 2,5$ эВ — уровень Ферми для кристалла кремния, а для кристалла вольфрама $\mu = 4,55$ эВ;
 k_b — постоянная Больцмана;
 T — температура кристалла.

Для вольфрама расчетное значение встроенных дипольных электрических моментов для нейтрального атома — $19,62 \cdot 10^{-30}$ Кл·м, для однократного иона — $11,14 \cdot 10^{-30}$ Кл·м и для двукратного иона — $6,05 \cdot 10^{-30}$ Кл·м. Для нейтральных атомов вольфрама при таком значении дипольного электрического момента энергия диполь-дипольного взаимодействия в нормальных условиях превышает энергию теплового движения. В этих условиях энергия сродства атомов вольфрама определяется взаимодействием электрона с электрическим диполем перпендикулярно к оси диполя и составляет

$$EA_W = \frac{ep_z}{4\pi\epsilon_0 r_k^2} - \frac{Z^* e^2}{4\pi\epsilon_0 2r_k} = 0,35 \text{ эВ}, \quad (3)$$

где e — заряд электрона;

p_3 — встроенный дипольный электрический момент атома;
 ϵ_0 — диэлектрическая проницаемость вакуума;
 r_k — радиус атома вольфрама в кристалле;
 Z^* — эффективный заряд нейтральных атомов вольфрама.

Условия возникновения автоэлектронной эмиссии

Когда результирующая работа выхода соизмерима с энергией теплового движения (k_bT), тогда возникнет автоэлектронная эмиссия. Теория автоэлектронной эмиссии для плоскостей с большим количеством эмиссионных центров разработана в работе [2]. В сканирующем туннельном микроскопе (СТМ) исследуется один эмиссионный центр. Поэтому теория Шоттки в этом случае не применима и автоэлектронную эмиссию следует рассматривать применительно к одному эмиссионному центру.

Под действием внешнего электрического поля энергия воздействия на отрицательный ион определяется пондеромоторными силами и зависит от кристаллической структуры поверхности. Кристаллическая структура формируется кластерными образованиями. Размер кластерных образований не превышает 10 нм, а для отдельных атомов ~1 нм [6]. При приложенном напряжении 1 В около поверхности кластера возникнет напряженность электрического поля $E_3 \approx 10^8$ В/м, а около отдельного атома — $E_3 \approx 10^9$ В/м. При таких напряженностях электрического поля возникнут пондеромоторные силы, которые, воздействуя на отдельный кластер или атом, создадут давление [12]:

$$\vec{P} = \sigma \vec{E}_3 - \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E_3^2}{2}. \tag{4}$$

Здесь первый член является произведением поверхностной плотности электрических зарядов σ на величину приложенного внешнего электрического поля E_3 и определяет силу воздействия на электрон отрицательного иона вдоль линии напряженности электрического поля нормально к поверхности, а второй член приводит к возникновению давления вдоль поверхности кристалла. Растягивающее или сжимающее напряжение $P = 0,5\epsilon_r \epsilon_0 E_3^2$ вдоль поверхности вызывает деформацию величиной $E\Delta l/h$ (где E — модуль Юнга), что существенно изменяет структуру поверхности кристалла при растяжении или сжатии. Следовательно, в условиях динамического равновесия

$$\Delta l = \frac{Ph}{2E}, \text{ а } h \approx \sqrt{3}\Delta l. \tag{5}$$

Тогда работа пондеромоторных сил, направленная на растяжение или сжатие, равна

$$\Delta W = \sqrt{3} \frac{\epsilon_0 \epsilon_r E_3^2 h}{2E} r_i^2 = \alpha E_3^2, \tag{6}$$

где r_i — радиус отрицательного иона, который следует рассматривать как радиус нейтрального атома.

С ростом напряженности внешнего электрического поля отрицательные ионы на поверхности кристалла будут автоматически несколько удаляться от кантилевера СТМ в глубь кристалла, а при сжатии, наоборот, приближаться к кантилеверу при растяжении поверхностного слоя, что приведет к уменьшению эмиссионного тока в первом случае и увеличению эмиссионного тока во втором случае.

Автоэлектронная эмиссия с отрицательных ионов

В работе [2] автоэлектронная эмиссия рассмотрена как термоэлектронная эмиссия со многими эмиссионными центрами с уменьшением работы выхода при наложении внешнего электрического поля и без учета наличия в запрещенной зоне отрицательных ионов. В СТМ размер эмиссионного пятна соответствует диаметру одного атома. Поэтому эмиссия электронов осуществляется с одного эмиссионного центра. Для одного эмиссионного центра теория Шоттки не применима, а с учетом наличия отрицательных ионов в запрещенной зоне и их заселенности результирующая плотность эмиссионного тока составит:

$$J_{AT} = \frac{e}{4r_k^3} \sqrt{\frac{8k_bT}{m_c}} \sum_i \left(\frac{E_i \pm \sigma E_3^2}{k_bT} + 1 \right) \times \exp\left(-\frac{E_i \pm \sigma E_3^2}{k_bT}\right) \exp\left(-\frac{\mu - E_i}{k_bT}\right), \tag{7}$$

где r_k — размер кластера, молекулы или атома;
 m_c — масса кластера, молекулы или атома.

При $i = 0$ $E_0 = \mu$, а при остальных значениях $E_i = EA_i$.

Из уравнения (7) следует, что при $E_i \pm \sigma E_3^2 = 0$ плотность эмиссионного тока достигает своего предельного значения и не зависит от величины приложенного внешнего электрического поля:

$$J_{AT,max} = \frac{e}{4r_k^3} \sqrt{\frac{8k_bT}{m_c}} \exp\left(-\frac{\mu - EA_i}{k_bT}\right). \tag{8}$$

Поверхностные атомы кристалла участвуют в автоэлектронной эмиссии, если они содержат

избыточный отрицательный заряд. Для большинства металлов полагали, что в автоэлектронной эмиссии участвуют свободные электроны на уровне Ферми и эти электроны преодолевают работу выхода туннельным эффектом. Электроны отрицательных ионов не обладают спином, и являются свободными. Работа выхода для многих кристаллов составляет несколько электронвольт. При таких значениях работы выхода электрический ток автоэлектронной эмиссии в нормальных условиях составляет достаточно малую величину, и поэтому не поддается измерению. Чтобы увеличить ток автоэлектронной эмиссии, образцы кристаллов изготавливали площадью, которая обладала бы большим количеством эмиссионных центров.

В СТМ игла изготавливается из вольфрама, и электрический ток автоэлектронной эмиссии формируется с одного эмиссионного центра (кластера, молекулы или атома). При этом следует учитывать следующее. Вольфрам обладает сравнительно большой энергией связи между взаимодействующими частицами внутри металла, и поэтому разные воздействия существенно не изменяют его структуру и расположение встроенных дипольных электрических моментов. Как всякое твердое тело кристалл вольфрама состоит из кластеров [7], а его кристаллическая решетка обладает ОЦК-структурой. Кластеры ОЦК-структуры представляют собой четырехгранную призму с семью атомами. Если создать конец иглы размером в один кластер, то она должна заканчиваться одним атомом. Вот почему вольфрам применяется в виде иглы в СТМ. Размер атома вольфрама в кристалле составляет $r_k = 1,41 \text{ \AA}$. Если на такую иглу подать напряжение величиной $U \sim 2 \text{ В}$, то напряженность электрического поля у поверхности кластера вольфрама составит $E_{\text{э}} = U/r_k \approx 1,42 \cdot 10^{10} \text{ В/м}$. При таких значениях напряженности внешнего электрического поля автоэлектронная эмиссия достаточно ярко выражена. Для вольфрама модуль Юнга составляет $E = 4 \cdot 10^{11} \text{ Па}$, $h \cong r_k$ и $\epsilon_r \cong 1,01$ [11]. В соответствии с этими данными пондеромоторные силы совершат работу $\Delta W = 0,30 \text{ эВ}$. В этом случае плотность электрического тока в нормальных условиях составит

$$J_{AT,\max} = \frac{e}{4r_k^3} \sqrt{\frac{8k_b T}{m_c}} \exp\left(-\frac{\mu - EA_i}{k_b T}\right) = 4,13 \cdot 10^{-39} \text{ А/м}^2, \quad (9)$$

т.е. практически равна нулю.

Поэтому автоэлектронная эмиссия с вольфрамовой иглы не должна оказывать влияние на возникновение электрического тока между иглой и исследуемой поверхностью. Это принципиальное условие для СТМ. Если на вольфрамовую иглу подать напряжение более 4 В, то в разрядном про-

межутке возникнет электрический ток $1,1 \cdot 10^{-7} \text{ А}$, обусловленный только автоэлектронной эмиссией с вольфрамовой иглы. В этом случае электрический ток автоэлектронной эмиссии характеризует поведение кластеров вольфрама в электрическом поле, а не поведение исследуемой поверхности, которая существенно исказится.

Расстояние между движущейся иглой и исследуемой поверхностью не должно быть меньше радиуса исследуемой Ферми-поверхности кластера. В случае исследуемой поверхности кремния его радиус Ферми-поверхности кластера составляет $1,18 \cdot 10^{-10} \text{ м}$. Энергия ионизации кластера кремния $2,69 \text{ эВ}$ [7]. На Ферми-поверхности кластера кремния напряженность электрического поля без учета воздействия пондеромоторных сил составляет:

$$E_{\text{э, Si}} = \frac{Ur_0}{(r_0 + h)^2} = 4,2 \cdot 10^9 \text{ В/м}, \quad (10)$$

где r_0 и h — соответственно радиус иглы вольфрама и радиус кластера кремния.

Время прохождения электроном разрядного промежутка составит $\sim 3 \cdot 10^{-12} \text{ с}$. Электрический ток при этом равен $\sim 5,3 \cdot 10^{-8} \text{ А}$. Если время изменения напряжения, подаваемого на иглу, или время прохождения электроном размера кластера кремния значительно превышает время замыкания разрядного промежутка, то это не повлияет на результат измерений изменяющегося тока разряда в зазоре между вольфрамовой иглой и плоскостью исследуемой поверхности кремния.

Энергетическая схема уровней энергии отрицательных ионов кремния и индия относительно дна зоны проводимости приведена на рис. 2 (см. обложку).

Получается, что автоэлектронная эмиссия для кремния возникает, когда на кантилевер подается напряжение более 0,03 В, а для индия — свыше 0,3 В. В общем случае зависимость тока автоэлектронной эмиссии от приложенного внешнего потенциала на кантилевер относительно исследуемой плоскости кристалла определяется уравнением (7).

Из формулы (7) следует, что от перемены направления приложенного внешнего электрического поля зависит только изменение расстояния между кантилевером и плоскостью исследуемой поверхности кристалла. При растяжении поверхности $\Delta h > 0$ эмиссионный ток уменьшается, а при $\Delta h < 0$ — эмиссионный ток увеличивается. Изменение направления приложенного внешнего электрического поля не влияет на характер поведения электрического тока автоэлектронной эмиссии. Это интересный парадокс.

Скорость электронов при автоэлектронной эмиссии, когда $|\mu_i| > \alpha E_{\text{э}}^2$, является мнимой, т.е.

равна нулю. Поэтому автоэлектронная эмиссия с одного эмиссионного центра начинается при выполнении условия $|\mu_i| = \alpha E_3^2$ или $eU_i = EA_i$.

При большом положительном потенциале на кантилевере включаются эмиссионные центры следующего слоя атомов кластера, т.е. возникают условия, когда необходимо учитывать эффект Шоттки. Это должно приводить к периодическому изменению работы выхода [3], а следовательно, и эмиссионного тока.

При отрицательном потенциале на кантилевере влияние следующих слоев атомов в кластере исключается и начинает влиять дополнительная автоэлектронная эмиссия с кантилевера (с вольфрамового острья). Поэтому при отрицательном потенциале на кантилевере электрический ток эмиссии для кремния непрерывно возрастает, так как включается третий уровень энергии отрицательного иона (1,39 эВ) и эмиссия с вольфрамового острья.

Отрицательный ион индия обладает только одним уровнем энергии отрицательного иона. Поэтому ток автоэлектронной эмиссии с атомов индия отличается тем, что при положительном потенциале на кантилевере он больше, чем при отрицательном и четко проявляется начало автоэлектронной эмиссии.

Рассмотренную теоретическую модель автоэлектронной эмиссии при наличии одного эмиссионного центра потребовалось экспериментально подтвердить.

Экспериментальные исследования автоэлектронной эмиссии с одного эмиссионного центра

Экспериментальная установка. Для экспериментальной проверки разработанной модели автоэлектронной эмиссии с одного эмиссионного центра использовался СТМ, блок-схема которого

приведена на рис. 3. Острие кантилевера из вольфрама подводилось на расстояние к сканирующей поверхности $h < 10 \text{ \AA}$.

Эмиссионный ток автоэлектронной эмиссии измеряли электрометрическим усилителем. Сканирующая система обеспечивала перемещение иглы в направлении всех трех координатных осей с помощью пьезокристаллов, которые преобразовывали электрические сигналы в механическое перемещение с точностью менее 1 \AA .

С помощью СТМ снимали вольт-амперные характеристики в разных точках исследуемой поверхности кристалла, а компьютер позволял преобразовывать полученные вольт-амперные характеристики и представлять их в виде эмиссионной поверхности.

Используя эту технику, были проведены следующие исследования:

- 1) изменение структуры эмиссионной поверхности в зависимости от знака подаваемого на сканирующую иглу напряжения с положительного на отрицательное;
- 2) влияние изменения напряжения на функциональную зависимость эмиссионного электрического тока от знака подаваемого напряжения на иглу кантилевера;
- 3) изменение эмиссионного электрического тока от величины сродства к электрону для разных атомов;
- 4) изменение структуры поверхности при изменении знака подаваемого напряжения на сканирующую иглу кантилевера.

При положительном напряжении на сканирующей игле поверхность кристалла под действием пондеромоторных сил сжимается, а при отрицательном напряжении, наоборот, расширяется. Для проверки этого явления использовали поверхность кремния Si (111), как плотноупакованную. Величина подаваемого напряжения была выбрана 2 В.

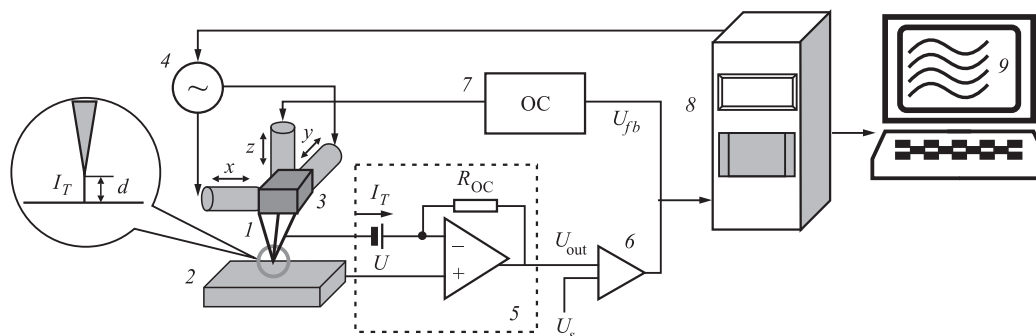


Рис. 3. Общая схема сканирующего туннельного микроскопа:

1 — зонд; 2 — исследуемая поверхность; 3 — пьезоэлектрические двигатели по координатам x, y, z ; 4 — генератор развертки по x, y ; 5 — туннельный сенсор; 6 — компаратор; 7 — система обратной связи; 8 — компьютер; 9 — эмиссионное изображение исследуемой поверхности [13]

В этом случае эффект был максимальным, и автоэлектронная эмиссия с иглы кантилевера на эмиссионную поверхность исследуемого кристалла не влияла. Результат приведен на рис. 4 (см. обложку).

Из рис. 4 следует, что влияние пондеромоторных сил существенное. Выдавливаются три молекулы из шести. В работе [7] предполагалось, что кластер кремния формируется трехатомными молекулами двух модификаций с разным расположением встроенных дипольных электрических моментов. Это предположение экспериментально доказано. Действительно, трехатомные молекулы из однородных атомов формируются двух модификаций.

Зависимость эмиссионного тока от подаваемого напряжения и его знака в разных местах кристаллической структуры твердого тела исследовали разные авторы [14, 15]. В результате были получены данные, которые трудно интерпретировать, так как контроль условий применения СТМ осуществлялся недостаточно корректно. Поэтому при строгом контроле условий применения СТМ были получены электрические токи автоэлектронной эмиссии в двух половинках ромба FH и УН поверхности кристалла кремния. Рассмотрение двух половинок выделенного ромба обусловлено тем, что при напылении индием поверхности кремния Si (111) вначале заполняется полностью одна половинка — УН, а затем FH, и обусловлено это разным значением энергии связи кластеров индия на поверхности кремния.

Результаты выполненных измерений эмиссионного тока на обеих половинках приведены на рис. 5 в виде зависимости тока автоэлектронной эмиссии от приложенного напряжения на зонде кантилевера.

Получается, что эмиссионные свойства атомов кремния, расположенных на разных половинках ромба, существенно не отличаются. Это естественно, так как автоэлектронная эмиссия происходит с одного и того же атома кремния.

Влияние энергии сродства на ток автоэлектронной эмиссии. На рис. 6 приведена зависимость электрического тока автоэлектронной эмиссии для индия, адсорбированного на поверхности кремния, от приложенного напряжения на сканирующей игле из вольфрама.

В случае кремния автоэлектронная эмиссия начинается с 0,03 В и на удалении 0,4...0,5 В достигает максимума. Со значения 0,5 В возникает резкий подъем, а со значения 1,4...1,5 В рост эмиссионного тока настолько значителен, что пришлось прекращать измерения.

Электроны в отрицательных ионах взаимодействуют со встроенным дипольным электрическим моментом. Они не обладают спином и являются свободными для участия в автоэлектронной эмис-

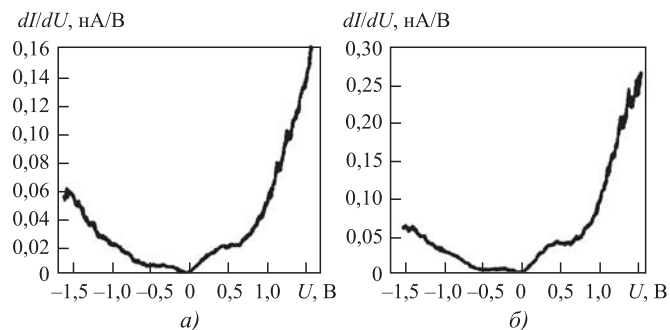


Рис. 5. Зависимость эмиссионного тока с атомов кремния: а — на половинке ромба FH; б — на половинке ромба УН

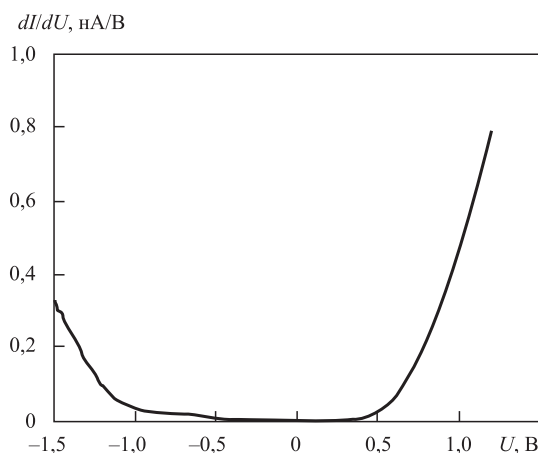


Рис. 6. Зависимость тока автоэлектронной эмиссии для атома индия в зависимости от приложенного напряжения на кантилевер (зонд)

сии наравне с электронами, находящимися на уровне Ферми. Поэтому в автоэлектронной эмиссии участвуют электроны на уровне Ферми и на энергетических уровнях отрицательных ионов. Автоэлектронная эмиссия начинается, когда $eU = |EA_i|$.

Ступенчатый рост тока автоэлектронной эмиссии в точности соответствует всем трем значениям энергий сродства электронов для основного состояния кремния. Полученные экспериментальные данные убедительно свидетельствуют, что электрический ток автоэлектронной эмиссии формируется эмиссией электронов преимущественно с отрицательных ионов.

Для подтверждения этого вывода были выполнены измерения тока автоэлектронной эмиссии для индия¹, атомы которого обладают сродством к электрону 0,3 эВ. Поэтому для индия авто-

¹ При напылении индия необходимо было согласовать размеры кластера индия с размерами свободной поверхности кремния, где происходит осаждение индия. Для этого поверхность кристалла кремния нагревалась до температуры ~520...550 К.

электронная эмиссия начинается с приложенного напряжения на игле из вольфрама с 0,3 В и по экспоненте возрастает в соответствии с формулой (7). Это хорошо видно на рис. 6.

Выводы

Установлены условия применимости сканирующего туннельного микроскопа для получения эмиссионного портрета упрочняющей кристаллической поверхности. Сканирующим туннельным микроскопом автоэлектронная эмиссия электронов измеряется с одного эмиссионного центра, пондеромоторные силы существенно искажают исследуемую поверхность кристалла.

Доказано, что трехатомные молекулы действительно обладают аллотропией расположения внутренних дипольных электрических моментов составных атомов. Рассмотрена автоэлектронная эмиссия с одного эмиссионного центра.

В сканирующем туннельном микроскопе автоэлектронная эмиссия осуществляется совместно с отрицательных ионов и уровня Ферми. Электрический ток автоэлектронной эмиссии начинается со значения подаваемого напряжения, соответствующего значению энергии сродства отрицательных ионов поверхностного слоя. Эмиссионный ток автоэлектронной эмиссии для каждого отрицательного иона обладает насыщением.

Основной результат проведенных исследований: атомы, обладающие заметным сродством к электрону, на поверхности твердых тел пребывают в виде отрицательных ионов. Это явление следует учитывать при всех видах упрочнения конструкционных материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гречихин Л.И., Шмермбек Ю.** Интерпретация результатов измерений разными методами на наноразмере // Школа науки. 2018. № 10 (5). С. 1–5.

2. **Модинос А.** Авто-, термо- и вторично-электронная эмиссионная спектроскопия / под ред. Г.Н. Фурсея. М.: Наука, 1990. 320 с.

3. **Гречихин Л.И.** Физика. Электричество и магнетизм. Современная электродинамика. Мн.: Право и экономика, 2008. 302 с

4. **Gretchikhin L.** Formation of p -, n -conductivity in semiconductors // Military technical courier. Scientific periodical of the ministry of defence of the republic of Serbia. 2018. Vol. 66. P. 304–321.

5. **Гречихин Л.И.** Формирование p -, n -проводимости и p – n -перехода // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. № 5.

6. **Gretchikhin L., Komarovskaya V.** Negative ions of atoms, diatomic and triatomic molecules // Military technical Courier. Scientific Periodical of the Ministry of Defence of the Republic of Serbia. 2016. No. 64 (2). P. 447–464.

7. **Кластерная** структура кремния и конструкция его поверхности / Л.И. Гречихин, С.Д. Латушкина, В.М. Комаровская, Ю. Шмермбек // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 9. С. 9–16.

8. **Гречихин Л.И.** Физика наночастиц и нанотехнологий. Общие основы, механические, тепловые и эмиссионные свойства. Мн.: Технопринт, 2003. 399 с.

9. **Уэрт Ч., Томсон Р.** Физика твердого тела. М.: Мир, 1969. 558 с.

10. **Гречихин Л.И.** Наночастицы и нанотехнологии. Мн.: ИОО "Право и экономика", 2008. 406 с.

11. **Физические** величины: справочник / А.П. Бабичев, Н.Ф. Бабушкина, А.М. Братковский и др.; под ред. И.С. Григорьева, Е.З. Мейлихова. М.: Энергоатомиздат, 1991. 1232 с.

12. **Сивухин Д.В.** Общий курс физики: учебное пособие для вузов. Том III. Электричество. В 2 ч. Ч. 1: 3-е изд. М.: Наука. Физматлит, 1996. 320 с.

13. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой спектроскопии. Нижний Новгород: Изд-во Института физики микроструктур Российской академии наук, 2004. 114 с.

14. **Wolkov R., Avouris Ph.** Atom-Resolved Surface Chemistry Using Scanning Tunneling Microscopy // Phys. Rev. Let. 1988. Vol. 60. No. 11.

15. **Li J.L., Jia J.F., Liang X.J. et al.** // Phys. Rev. Let. 2002. Vol. 88. P. 066101 (1–4).

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

E-mail: utp@mashin.ru

Web-site: www.mashin.ru

Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.

Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*

Сдано в набор 26.12.2019 г. Подписано в печать 04.03.2020 г. Формат 60×88 1/8.

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

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

Оригинал-макет: ООО "Авансд солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru

К сведению авторов журнала «Упрочняющие технологии и покрытия»

Объем статьи (текст статьи, рисунки, таблицы), предлагаемой к публикации, не должен превышать 12 страниц, напечатанных на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала 12-м кеглем.

Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

В редакцию предоставляется статья в электронном виде – файл (с расширением .doc или .pdf) с набором текста (шрифт Times New Roman) или распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: utp@mashin.ru

Требования к оформлению статьи

1. Обязательно должны быть представлены сведения об авторах:

- Ф.И.О.;
- ученая степень и звание (если есть);
- место работы;
- должность;
- адреса и телефоны (домашний и служебный), факс;
- E-mail.

Названия учреждений, в которых выполнялись исследования, необходимо раскрывать полностью, указывать город.

2. Обязательно представлять на русском и английском языках:

- фамилии, имена и отчества авторов, название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- название статьи;
- аннотацию к статье;
- ключевые слова.

3. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной классификации <http://teacode.com/online/udc/>);
- авторы (с указанием ученой степени);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо обозначать звездочкой () на первой странице.*

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского (не готического) и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми.

Для набора формул и буквенных обозначений следует использовать программу MathType или редактор формул Equation в офисном редакторе Microsoft Office Word.

5. После текста должен быть приведен список литературы, используемой при написании статьи.

Составляется список по порядку ссылок в тексте и оформляется по ГОСТ 7.0.5–2008. Ссылки на иностранную литературу следует писать на языке оригинала без сокращений. Количество литературных источников не должно превышать пяти наименований. Допускаются ссылки на литературу не ранее 2000 г. выпуска (при необходимости ссылку на более "старый" источник литературы приводят непосредственно в тексте).

6. Иллюстрации представляются в виде отдельных файлов (с расширением .doc, .tiff, .pdf, .jpeg 600 dpi), размер не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисовочную подпись. Подрисовочные подписи следует представлять отдельным списком. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков.

Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст!

Все статьи, поступающие в редакцию, проходят рецензирование.

В случае отклонения статьи редакционным советом журнала редакция оставляет за собой право сообщать автору о решении редакционного совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается

