ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 10 (142)
октябрь
2016

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.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
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.т.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
Н.К. КРИОНИ, 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.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.

Редакция:
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159,** "Пресса России" **39269,** "Почта России" **60252)** или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98,
268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве связи и массовых коммуникаций РФ. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-63956 от 09.12.2015 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Кременский И.Г. Современные технологии восстановления поверхностного слоя деталей 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения 6

Шин И.Г., Назаров С.Р., Сапаев У.А. Комплексная оценка работоспособности твердосплавных режущих пластин с покрытием из нитрида титана 10

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Панфилов Ю.В., Нестеров С.Б., Симакин С.Б., Яковлев М.Э. Применение ионно-плазменных методов для формирования гладких оптических поверхностей 15

Ульяницкий В.Ю., Батраев И.С., Штерцер А.А. Восстановление трибоузлов детонационным напылением 19

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Веселовский А.А. Управление толщиной термодиффузионных ванадиевых, хромовых и марганцевых покрытий на высокопрочном чугуне регулировкой внешних параметров насыщения 24

Гадалов В.Н., Ворначева И.В., Ковалев С.В., Журавлев Г.М., Розина Т.Н. Электролитические боридные покрытия с добавками окислов Cr_2O_3, ZrO_2 и Ta_2O_5 28

Оборин А.В., Богданов В.В., Оборин И.А. Ионное азотирование ответственных деталей судового машиностроения в ОАО "Калужский турбинный завод" 31

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Афонин С.М. Гармоническая линеаризация характеристик с гистерезисными петлями многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений 36

Билоконь С.А. Исследование электрических свойств и восстановление поврежденных участков элементов памяти 44

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

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

© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2016

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 10 (142)
October
2016

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

Edition:
I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159,** "Pressa Rossii" **39269,**"Pochta Rossii" **60252)** or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by Ministry of Telecom and Mass Communications of RF. The certificate of registration ПИ № 77-63956. 09.12.2015

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Kremensky I.G. Modern technology of the machinery parts surface layer reconstruction 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Zaides S.A., Ngo Cao Cuong. Evaluation of stress state in cramped conditions of local loading 6

Shin I.G., Nazarov S.R., Sapaev W.A. Comprehensive assessment of performance of carbide cutting plates coated with titanium nitride 10

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Panfilov Yu.V., Nesterov S.B., Simakin S.B., Yakovlev M.E. Application of ion-plasma methods for generating smooth optics surfaces 15

Ulianitsky V.Yu., Batraev I.S., Shtertser A.A. Restoration of tribological units by detonation spraying 19

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Veselovsky A.A. Management thickness of thermal-diffusion vanadium, chromic and manganese coverages on high-strength cast-iron by regulation of external parameters of satiation 24

Gadalov V.N., Vornacheva I.V., Kovalev S.V., Zhuravlev G.M., Rosina T.N. Electrolytic boride coatings with additives of oxides Cr_2O_3, ZrO_2 and Ta_2O_5 28

Oborin A.V., Bogdanov V.V., Oborin I.A. Ion nitriding of critical parts of marine engineering at JSC "Kaluga Turbine Works" 31

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Afonin S.M. Harmonious linearization hysteresis loop characteristics of multilayered piezoactuators of nano- and micrometric movement 36

Bilokon S.A. Study of the electrical properties and restoration of damaged areas of memory elements 44

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

© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2016

УДК 621.791

И.Г. Кременский *(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)*
E-mail: mt13@bmstu.ru

Современные технологии восстановления поверхностного слоя деталей

Восстановление деталей машин играет значительную роль в современном промышленном производстве. Наибольшие изменения в процессе эксплуатации деталей претерпевает их поверхностный слой, для восстановления свойств которого используют всевозможные способы технологического воздействия. На основе публикаций последнего времени проведен обзор современных технологий восстановления поверхностного слоя деталей.

Ключевые слова: *восстановление, поверхностный слой, износ, покрытия, коррозионная стойкость, теплостойкость.*

The recovery of machine components plays a significant role in modern industrial production. The greatest changes in the operation of the parts undergoing their surface layer, to restore the properties which is used all kinds of methods of technological impact. On the basis of publications of recent time provides an overview of current technologies for the recovery of the surface layer.

Keywords: *reconstruction, surface layer, wear, coatings, corrosion resistance, heat resistance.*

До настоящего времени в нашей стране выбытие производственных основных фондов значительно опережает их обновление. При этом до 90 % машин выходят из строя не из-за поломок деталей, а вследствие изнашивания их рабочих поверхностей [1], вследствие чего основное требование к свойствам поверхностного слоя детали — хорошая износостойкость. Интенсивность изнашивания определяется абразивным, химическим и тепловым воздействием на поверхностный слой, а износостойкость зависит от состава металла, микроструктуры, твердости поверхности и условий трения. В настоящее время известно более ста наименований и способов восстановления и упрочнения деталей.

Наиболее широко для восстановления и упрочнения поверхностного слоя применяются различного рода покрытия, наносимые многими способами. Покрытия, восстанавливая свойства поверхностного слоя до требуемых значений, выполняют и функцию восстановления размеров, компенсации утраченного вследствие износа объема металла.

Главенствующее положение среди способов восстановления и повышения долговечности служебных свойств рабочих поверхностей деталей занимает наплавка. Она различается прежде всего по виду источника нагрева. Наибольшую историю имеют способы дуговой наплавки, отличающиеся значительным тепловым воздействием, способным вызвать нежелательное изменение структуры основного металла. Используя различные способы дуговой наплавки: в защитных газах, под слоем флюса, вибродуговую, получают наплавленное покрытие различных состава и толщины — от долей миллиметра до 10 мм [2]. В результате высокой скорости охлаждения металла покрытия в нем образуются закалочные структуры, приводящие вместе с высокой твердостью к возникновению трещин и пор.

Получить покрытие при более дозированном тепловложении можно развиваемым в настоящее время методом лазерной наплавки. При ремонте дефектов деталей авиатехники из медных сплавов лазерной наплавкой получали покрытие толщиной 0,2...0,3 мм с отсутствием зоны перемешивания металла и его разупрочнения [3]. Физико-механические свойства металла наплавленного покрытия при восстановлении цилиндров авиатехники из стали 30ХГСА лазерной наплавкой в среде защитного газа практически совпадали со свойствами материала основы.

Применением новых нетрадиционных технологий добиваются существенного повышения качества наплавленных покрытий. Например, методом электронно-лучевой наплавки в пучке релятивистских электронов с повторной импульсной обработкой низкоэнергетическим электронным пучком в вакууме получены покрытия с ультрадисперсной и наноразмерной дендритной

структурой. Нанотвердость и модуль упругости в поверхностном слое достигают высоких значений, приближаясь к значениям для алмаза [4]. Однако в ремонтном производстве, как правило, восстановлению подлежит ограниченное количество деталей и использование технологий, требующих применения дорогого специализированного оборудования, экономически нецелесообразно.

Наибольшие развитие и практическое применение в настоящее время находят способы с ограниченным тепловложением, когда поверхностный слой детали остается в твердой фазе. На первое место по распространенности среди этих способов можно поставить газотермические методы напыления, когда покрытие наносится с помощью высокотемпературной скоростной струи. По критериям производительности и стоимости наиболее предпочтительны способы дуговой металлизации и сверхзвукового газовоздушного напыления. В последнем случае мелкие металлические частицы вводятся в поток газа, движущийся со скоростью звука, и направляются на поверхность детали [5]. Сталкиваясь с ней в процессе высокоскоростного удара, частицы закрепляются на поверхности, формируя таким образом сплошное покрытие.

В отечественных публикациях, посвященных нанесению покрытий, большое внимание уделяется плазменным покрытиям, хотя отмечается, что они имеют низкую прочность соединения с подложкой, высокие остаточные напряжения в покрытиях повышенной толщины, пористость [6]. Толщина покрытия значительно зависит от разнотолщинности изделия и его расположения относительно испарителя.

Тонкопленочное (⩽ 3 мкм) алмазоподобное покрытие, обеспечивающее высокую износостойкость инструмента, получают финишным плазменным упрочнением в безвакуумном пространстве. Процесс напыления в этом случае происходит при интегральной температуре нагрева деталей 100 °С без изменения исходной шероховатости рабочих поверхностей [7].

Стремясь уменьшить нежелательное изменение структуры металла при нагреве, расширяют применение способа холодного газодинамического напыления, при котором напыляемые частицы имеют температуру значительно более низкую, чем температура их плавления. Но вследствие наличия градиентов температуры в процессе образования покрытия как в поверхностном слое, так и в объеме детали появляются остаточные растягивающие напряжения, ухудшающие прочность сцепления покрытия с деталью. Для повышения адгезии покрытия с основным металлом и несущей способности поверхностного слоя применяют плазменное газотермическое напыление в сочетании с электроискровой обработкой [8]. Создается плотное и прочное покрытие толщиной более 1 мм, где электроискровой слой обеспечивает хорошую адгезионную прочность, а второй слой — газотермического покрытия создает необходимую толщину и плотность покрытия.

Покрытия, наносимые при восстановлении деталей, предназначены для защиты не только от абразивного износа, но и от коррозии металла. Требования к коррозионной стойкости бывают специфичными, зависящими от среды, в которой работает деталь. Например, стали с алюмоцинковым покрытием не только успешно эксплуатируются в атмосферных условиях, горячей и холодной воде, но и в среде выхлопных газов имеют стойкость не ниже стойкости стали с покрытием из чистого алюминия [9]. Алюминий в сочетании с цинком образует устойчивый оксид на поверхности и интерметаллическое соединение с кремнием, которые обладают высокой коррозионной стойкостью и, кроме того, способствуют особо прочному сцеплению покрытия с основой.

Восстановление нужной износостойкости поверхностного слоя может происходить за счет твердости покрытия и улучшения условий трения. Последнее реализуется при известном способе нанесения покрытий методом финишной антифрикционной безабразивной обработки (ФАБО). Суть технологического процесса ФАБО заключается в нанесении путем натирания латунных (реже медных или бронзовых) покрытий толщиной 1...5 мкм. В зоне контакта деталей образуется тонкая металлическая пленка, защищающая деталь от износа и снижающая коэффициент трения. При этом на поверхности самой детали формируются диффузионные, модифицированные зоны (куда кроме элементов стали входят Cu, Zn, Sn), обеспечивающие улучшение микрогеометрических характеристик [10]. Введение металлоплакирующих смазок в зону трения приводит к интенсивному образованию пленок и "залечиванию" шероховатостей вплоть до образования на них гладкой защитной пленки меди. Процесс самопроизвольного образования в зоне контакта металлической пленки, защищающей детали от износа, относят к понятию "безызносное трение".

Хорошие результаты по повышению микротвердости и износостойкости дает обработка антифрикционных и других покрытий, нанесенных для восстановления деталей, поверхностным пластическим деформированием (ППД). Так, при восстановлении подшипников скольжения газопламенным напылением износостойкого покрытия производят ППД накатыванием твердосплавным инструментом в виде роликов [11]. В результате происходит упрочнение поверхностного слоя при одновременном снижении шероховатости и пористости.

В последние годы получают развитие комбинированные процессы обработки поверхности, когда процесс пластического деформирования сопровождается воздействием ультразвука, тока, различных технологических сред. К таким способам обработки можно отнести и фрикционное нанесение покрытий гибким инстру-

ментом — вращающимися проволочными щетками. Размеры детали восстанавливают накаткой роликом с нанесенным на него сетчатым рельефом; за счет высоты наплывов, образующихся по краям канавок, диаметр изношенной детали увеличивается на 50 мкм [12]. Покрытие из латуни толщиной около 30 мкм наносится фрикционным плакированием проволочными щетками, интенсивно деформирующими поверхностный слой. При этом вершины выступов сглаживаются, покрытие полностью заполняет впадины между выступами. Твердость стальной основы значительно увеличивается вследствие двойного пластического деформирования при накатке и упрочнении щетками (при котором твердость тонкого поверхностного слоя может возрасти вдвое), а условия трения улучшаются из-за замены трения твердого металла по твердому на трение твердого металла по мягкому.

Поверхностное пластическое деформирование повышает не только износостойкость увеличением твердости, но и коррозионную стойкость снижением растягивающих остаточных напряжений. Так, один из основных способов ППД — обкатывание — повышает на 25...30 % поверхностную твердость и формирует в поверхностном слое остаточные напряжения сжатия в пределах 550...730 МПа.

Хотя под действием эксплуатационных нагрузок остаточные сжимающие напряжения существенно релаксируют, их наличие повышает долговечность и усталостную прочность деталей. Применяемые после восстановления деталей наплавкой, напылением, гальваническим нанесением покрытий различные способы ППД могут изначально обеспечить уровень напряжений более 1000 МПа на глубине до 0,5 мм [13].

Изношенные поверхности иногда восстанавливают без компенсации утраченного объема, без какого либо покрытия. Это самый экономичный метод восстановления — метод обработки под ремонтный размер, когда припуском под чистовую обработку является изношенный слой детали. В этом случае восстановить нужную микроструктуру поверхности и твердость металла можно разными способами ППД. При обработке деталей из сталей различных марок микротвердость поверхностного слоя (толщиной до 0,1 мм) может увеличиться в 2...3 раза. Вместе с увеличением твердости и остаточных сжимающих напряжений увеличивается радиус скруглений микронеровностей и снижается шероховатость [14].

Обзор публикаций последних лет свидетельствует, что в разных отраслях хозяйственной деятельности в соответствии с общим прогрессом в машиностроении ведутся исследования по разработке эффективных технологий восстановления поверхностного слоя деталей из различных материалов. Эти технологии, исключая необходимость изготовления или закупки новых запасных частей, имеющих высокую стоимость (особенно для импортного оборудования), позволяет обеспечить существенную экономию материальных ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кременский И.Г.** Реновация и реконструкция, ремонт и восстановление, рециклинг и инновации // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 4. С. 46—48.

2. **Схиртладзе А.Г., Тимирязев В.А.** Методы восстановления деталей наплавкой и обработки наплавленных поверхностей в ремонтном производстве // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 9. С. 3—8.

3. **Юркевич С.Н., Тамашевич А.В., Юркевич А.С.** Восстановление деталей авиатехники из медных сплавов с точечными и локальными дефектами методом лазерной наплавки // Ремонт, восстановление, модернизация. 2015. № 6. С. 7—12.

4. **Износостойкость** покрытий, полученных соединением двух технологий электронно-лучевой обработки / И.М. Полетика, Т.А. Крылова, М.В. Тетюцкая, Ю.Ф. Иванов // Технология металлов. 2014. № 3. С. 36—47.

5. **Коробов Ю.С., Шумяков В.И., Прядко А.С.** Рациональный подход к восстановлению деталей оборудования газотермическим напылением // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 3. С. 17—21.

6. **Кадырметов А.М.** Плазменное нанесение покрытий в режиме модуляции электрических параметров // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 10. С. 23—28.

7. **Технология** упрочнения алмазоподобным покрытием / Г.П. Фетисов, А.В. Прокопенко, Д.В. Бологов, А.С. Помельникова // Технология металлов. 2015. № 8. С. 36—40.

8. **Оптимизация** параметров процесса нанесения плазменных композиционных покрытий / И.П. Кравченко, А.А. Пузряков, Н.И. Соляев и др. // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 4. С. 20—26.

9. **Ковтунов А.И., Мямин С.В., Меджидов К.И.** Исследование процессов формирования на сталях алюминиево-цинковых покрытий // Технология металлов. 2016. № 2. С. 35—43.

10. **Влияние** структуры поверхности на реализацию эффекта безызносности при трении / Л.И. Куксёнова, В.Г. Лаптева, М.С. Алексеева, И.А. Хренникова // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 12. С. 21—29.

11. **Коренев В.Н., Коломейченко А.В.** Эффективные технологические методы, оборудование и материалы для восстановления и упрочнения деталей газопламенным напылением // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 6. С. 36—39.

12. **Белявский Л.С., Белявская И.В., Ефимова Ю.Ю.** Модификация поверхности и восстановление деталей фрикционной комбинированной обработкой // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 4. С. 24—27.

13. **Кременский И.Г.** Повышение поверхностным пластическим деформированием усталостной прочности восстановленных деталей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2014. № 10. С. 27—29.

14. **Кременский И.Г.** Пластическое деформирование в технологии восстановления деталей // Ремонт, восстановление, модернизация. 2013. № 11. С. 41—44.

УДК 621.7.011

С.А. Зайдес, Нго Као Кыонг
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)
E-mail: zsa@istu.edu

Оценка напряженного состояния при стесненных условиях локального нагружения

На основе конечно-элементного моделирования рассмотрено влияние локального свободного и стесненного условий деформирования на напряженное состояние при нагружении упругопластического цилиндрического тела жестким индентором-шаром. Рассмотрено влияние различных факторов на напряженное состояние: диаметра шара, глубины внедрения, материала и размера нагруженного тела. Выявлена эффективность упрочнения при деформировании в стесненном условии локального нагружения по сравнению с деформированием локальным свободным нагружением.
Ключевые слова: *пластическая волна, пластическое упрочнение, стесненная деформация, напряженное состояние, глубина наклепа.*

The mathematical model of hardening process is built based on the small elastic deformation theory and the finite element method, which allows to consider the influence of the local free and constrained deformation conditions on the state of stress at loading elastic-plastic cylindrical body rigid indenter — ball. Considering the influence of different factors on the state of stress: the ball diameter, the depth of penetration, different materials and size of the loaded body. Determining the effective hardening during deformation in cramped conditions of loading, which compared with the free local loading.
Keywords: *plastic wave, plastic hardening, constrained deformation, stress of state, depth of hardening.*

Введение

Управление напряженным состоянием при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием имеет большое значение для изготовления качественных изделий. Например, при обработке маложестких стержневых изделий сложно получить необходимую интенсивность напряжений, так как повышенное давление на деформирующий инструмент приводит к искажению геометрической формы самого изделия.

При изготовлении тонкостенных изделий иногда требуется снизить напряжения в очаге пластической деформации, чтобы в процессе формообразования изделия исключить перенаклеп или увеличение твердости.

Механика стесненного деформирования является новым направлением исследования отделочно-упрочняющих процессов. В работе [1] приведены результаты моделирования простых геометрических форм, нагруженных шаром, которые свидетельствуют, что деформирование в стесненных условиях закрепления заготовки и (или) деформирующего инструмента влияет на интенсивность напряжений в очаге деформации.

В настоящей работе в качестве критерия управления интенсивностью напряжений рассматривается пластическое волнообразование при воздействии деформирующего инструмента. Пластическая волна возникает при разных давлениях на континууме. В пластической волне формируются напряжения растяжения, отрицательно влияющие на качество поверхностного слоя. В работе [2] установлено, что подавление процесса пластического формообразования вне зоны нагружения приводит к интенсификации напряжений в очаге деформации. **Цель настоящей работы** — рассмотрение возможности изменения напряженного состояния при локальном поверхностном пластическом деформировании в условиях стесненного нагружения.

Постановка задачи

Пластическая волна при внедрении шара в поверхность объемного упругопластического тела образуется благодаря свободной поверхности, которая позволяет воспринимать обратное внеконтактное течение металла из очага деформации. Если наложить ограничение на это пластическое течение, то условия деформирования металла при внедрении шара должны измениться и оказать воздействие на изменение механических свойств.

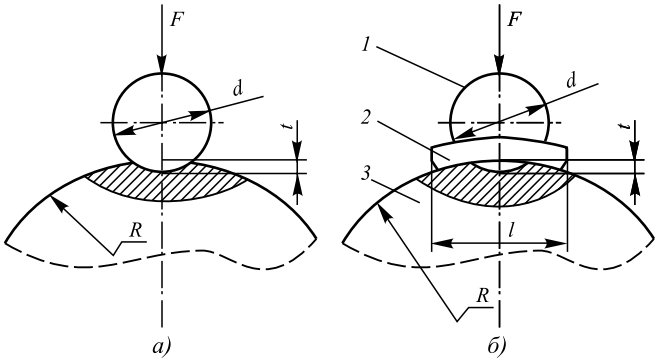


Рис. 1. Схема нагружения упругопластического тела жестким шаром:

а — свободное нагружение; *б* — стесненное нагружение; *1* — индентор (шар); *2* — кольцо; *3* — цилиндрическое тело

Таким образом, техническая идея заключается в том, чтобы погасить волновые течения металла вне очага пластической деформации. Это позволит уменьшить размеры пластической волны и интенсифицировать напряженное и деформированное состояние в объеме тела.

Численное решение упругопластической задачи для неоднородного материала выполнено с помощью программы ANSYS, основанной на методе конечных элементов и предназначенной для расчета напряжений и деформаций в нагруженном теле [3]. Рассмотрим влияние глубины внедрения шара, диаметра шара, марки материала образца и масштабного фактора на напряженное состояние поверхностного слоя цилиндрической детали при локальном свободном и стесненном условиях деформирования.

Формирование геометрии расчетной области проводили согласно расчетной схеме (рис. 1), на которой представлены модель и схема процесса нагружения цилиндрической поверхности образца локальным индентором (шаром). Конечно-элементная модель при свободном условии нагружения содержит 351 279 элементов и 92 931 узел, а при стесненном условии — 363 647 элементов и 99 830 узлов. Сетки образцов образуются гексаэдрическими и тетраэдрическими элементами. Топология сетки (число узлов и их связи) в ходе решения задачи сохраняется неизменной.

Характеристики образца: форма поверхности — цилиндрическая (диаметр $D = 15$ мм); материал (сталь 45) — упругопластический, упрочняющийся; модуль упругости $E = 2\cdot10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$; диаграмма деформирования материала — билинейная, описываемая пределом текучести $\sigma_т = 360$ МПа, модулем упругости E и модулем упрочнения $E_т = 1{,}45\cdot10^3$ МПа.

Характеристики индентора: тип — шар и шар с диском (диаметр шара $d = 10$ мм); материал — твердый сплав ВК8; модуль упругости $E = 6\cdot10^5$ МПа; коэффициент Пуассона $\mu = 0{,}3$. Для устранения формирования волны при пластическом течении материала в процессе вдавливания шара использовали пластину, ширина которой соответствует длине волны ($l = d_1 + 2a = 8$ мм; d_1 — диаметр отпечатка; a — длина пластической волны). Пластина находится на расстоянии, обеспечивающем заданную глубину вдавливания шара t.

Результаты моделирования

Рассмотрим влияние основных параметров процесса деформирования на напряженное состояние в очаге деформации, остаточное эквивалентное напряжение после разгрузки и глубину наклепа. Эквивалентное напряжение по Мизесу при использовании главных напряжений σ_1, σ_2 и σ_3 вычисляется как [3]

$$\sigma_{экв} = \frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_1-\sigma_2)^2+(\sigma_2-\sigma_3)^2+(\sigma_3-\sigma_1)^2}.$$

Влияние глубины внедрения шара ($d = 10$ мм). На рис. 2 (см. с. 2 обложки) приведены примеры распределения остаточных эквивалентных напряжений в зависимости от условий нагружения при глубине внедрения шара $t = 0{,}2$ мм. Видно, что распределение напряжений по сечению в обоих случаях нагружения имеет аналогичный характер, но при деформировании в стесненном условии значения остаточных напряжений выше, чем при деформировании в свободных условиях.

Как видно на рис. 3, обработка со значениями на-

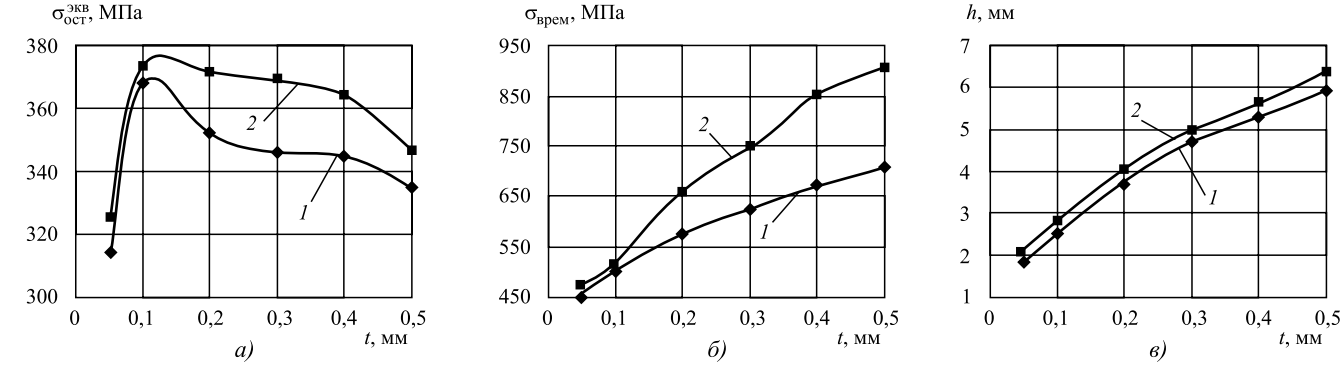


Рис. 3. Влияние глубины внедрения шара на остаточное эквивалентное напряжение (*а*), временное напряжение (*б*) и глубину наклепа (*в*) под пластическим отпечатком при свободном (*1*) и стесненном (*2*) условиях локального нагружения

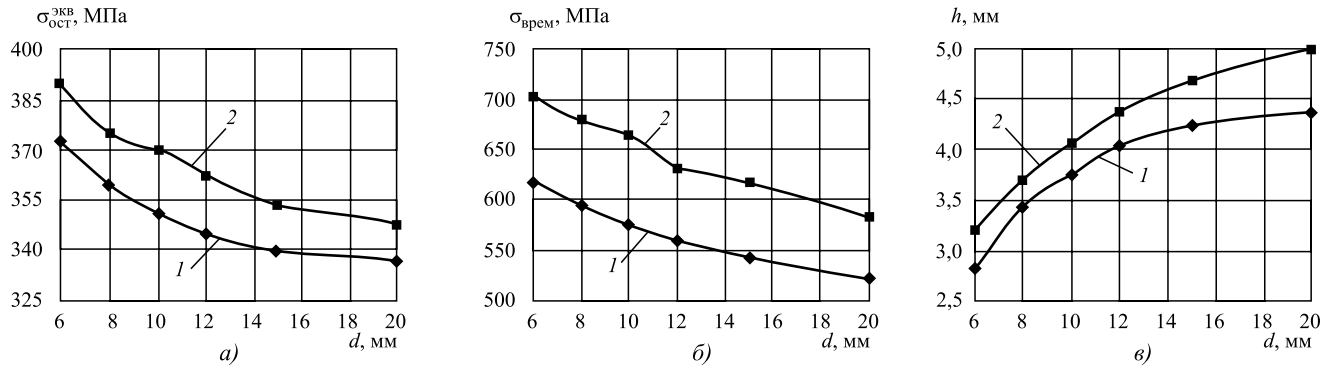


Рис. 4. Влияние диаметра шара на остаточное эквивалентное напряжение (*а*), временное напряжение (*б*) и глубину наклепа (*в*) под пластическим отпечатком при свободном (*1*) и стесненном (*2*) условиях локального нагружения

тяга, превосходящими оптимальное (t = 0,1 мм), приводит к перенаклепу и снижению напряжений. Наибольшее значение остаточных напряжений оказалось у образцов с глубиной внедрения шара t = 0,1 мм. Дальнейший рост глубины внедрения шара приводит к уменьшению эквивалентных остаточных напряжений, а глубина наклепа при этом продолжает увеличиваться. Однако не следует рекомендовать применение таких натягов для получения глубокого наклепа, так как перенаклеп отрицательно сказывается на эксплуатационных свойствах деталей машин.

При деформировании в стесненных условиях получили повышенные значения временных, остаточных эквивалентных напряжений и глубины наклепа по сравнению с деформированием при свободном условии нагружения.

Влияние диаметра шара (глубина внедрения 0,2 мм). С увеличением диаметра шара при постоянной глубине внедрения напряжения снижаются (рис. 4). Такое уменьшение объясняется тем, что при малых диаметрах под шарами при их внедрении образуется упругопластический клин, влияние которого распространяется в большей степени, чем при больших диаметрах [4]. Напряжение в зоне контакта обратно пропорционально площади соприкосновения инструмента с поверхностью изделия, следовательно, можно повысить давление в зоне контакта за счет уменьшения площади пластического отпечатка.

Глубину наклепа также можно регулировать изменением размеров деформирующего инструмента. Уменьшение диаметра шара приводит к снижению глубины наклепа. Если обкатывание проводится шарами большего диаметра, то из-за увеличения контактной площади глубина наклепа возрастает. При стесненном условии за счет изменения геометрии инструмента для подавления пластической волны перед очагом деформации площадь контакта увеличивается, следовательно, происходит повышение глубины наклепа. Эти результаты согласуются с экспериментальными данными [5, 6].

Влияние диаметра цилиндрического образца (диаметр шара 10 мм, глубина внедрения 0,2 мм). Анализируя характер кривых, приведенных на рис. 5, можно отметить, что стесненное условие нагружения шаром оказывает более существенное влияние на повышение интенсивности напряжений и глубину наклепа. Изменение диаметра цилиндрического образца оказывает меньшее влияние на напряженное состояние и глубину наклепанного слоя. При D > 60 мм указанные характеристики практически не изменяются.

При деформировании в стесненном условии за счет устранения пластического течения материала вокруг

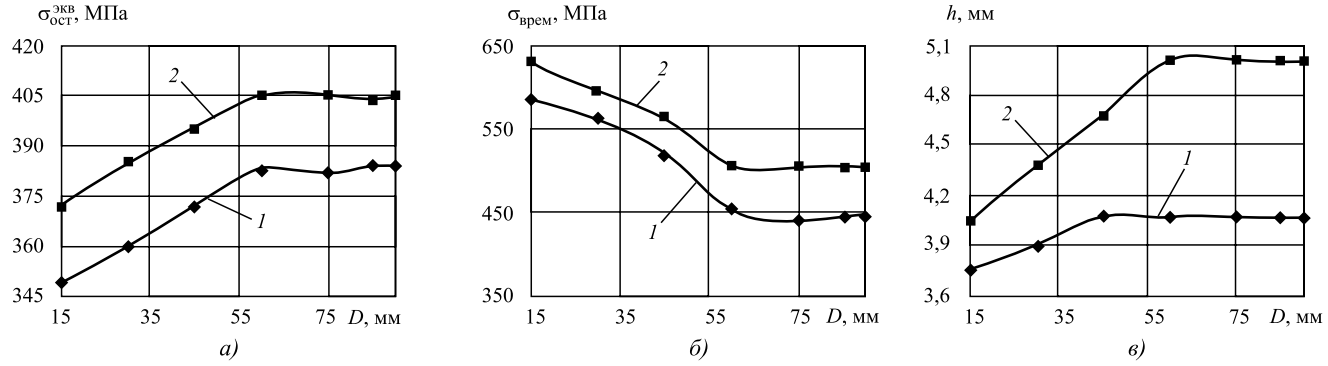


Рис. 5. Влияние диаметра цилиндрического образца на остаточное эквивалентное напряжение (*а*), временное напряжение (*б*) и глубину наклепа (*в*) под пластическим отпечатком при свободном (*1*) и стесненном (*2*) условиях локального нагружения

Таблица

Остаточное эквивалентное и временное напряжения, а также глубина наклепа при свободном (1) и стесненном (2) условиях локального нагружения для различных материалов

Материал	E, ГПа	$\sigma_т$, МПа	$\sigma_{ост}^{экв}$, МПа		$\sigma_{врем}$, МПа		h, мм	
			1	2	1	2	1	2
Магниевый сплав	45	193	154	155	312	348	3,438	3,75
Алюминиевый сплав	71	280	247	255	352	374	3,438	3,75
Титановый сплав	96	930	603	632	1180	1234	2,813	3,125
Коррозионно-стойкий сплав	193	210	205	221	462	567	4,125	4,687
Конструкционный сплав	200	250	250	270	465	555	4,063	4,375
Медный сплав	110	280	244	259	444	506	3,75	4,063

инструмента получены повышенные значения напряжений и глубины наклепанного слоя.

Влияние марки материала (диаметр шара 10 мм, глубина внедрения 0,2 мм). На качество упрочненного поверхностного слоя большое влияние оказывают физико-механические свойства (предел текучести $\sigma_т$ и модуль упругости E) обрабатываемого материала. Анализ данных, представленных в таблице, показывает преимущество применения стесненного условия при деформировании образцов различных материалов.

Глубина распространения пластической деформации при нагружении зависит от механических свойств (см. табл.). При одной и той же глубине внедрения шара глубина проникновения пластической деформации тем больше, чем ниже предел текучести материала. Глубина упрочнения в большой мере зависит от предела текучести. Увеличение предела текучести приводит к уменьшению глубины наклепа. При одинаковом пределе текучести глубина упрочнения больше у материала, который имеет более высокий модуль упругости. Следовательно, у деталей из мягких сталей более глубокий наклеп может быть получен при значительно меньших нагрузках по сравнению с более твердыми и прочными сталями.

Заключение

С помощью программного пакета ANSYS на основе метода конечных элементов разработана расчетная математическая модель процесса внедрения деформирующего инструмента в поверхность объемного тела при свободном и стесненном условиях нагружения.

В результате конечно-элементного моделирования установлено, что существует определенная глубина внедрения шара ($t = 0{,}1$ мм), при которой формируется максимальное остаточное напряжение сжатия. На напряженное состояние в очаге деформации оказывает влияние диаметр цилиндрического образца. Так, с увеличением диаметра образца временные эквивалентные напряжения снижаются, а остаточные растут. При $D > 60$ мм напряженное состояние остается стабильным. Увеличение диаметра деформирующего шара приводит к уменьшению величины остаточных напряжений.

Представленные результаты моделирования и численного расчета напряженно-деформированного состояния при внедрении жесткого шара в упругопластическое тело показывают высокую эффективность использования стесненных условий деформирования как для подавления процесса пластического внеконтактного формообразования, так и для изменения напряженного состояния деформированного тела.

При деформировании в стесненных условиях глубина наклепа и эквивалентные остаточные напряжения увеличиваются на 6...13 и 6...8 % соответственно по сравнению с деформированием при свободном условии нагружения.

Моделирование напряженно-деформированного состояния при внедрении жесткого шара в упругопластическое тело показывает высокую эффективность применения стесненных условий деформирования для повышения и качества упрочненных деталей.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Зайдес С.А., Нго Као Кыонг, Бубнов А.С.** Стесненное деформирование при обработке металлов. Германия: Изд-во LAP LAMBERT Academic Publishing, 2016. 231 с.

2. **Зайдес С.А., Нго К.К.** Научное обоснование деформаций в стесненных условиях // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2015. № 9. С. 39—44.

3. **Бруяка В.А.** Инженерный анализ в ANSYS Workbech. Самара, Самар. гос. техн. ун-т, 2013. 149 с.

4. **Поляк М.С.** Технология упрочнения. В 2 т. Т. 2. М.: Л.В.М. — СКРИПТ, Машиностроение, 1995. 688 с.

5. **Папшев Д.Д.** Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.

6. **Одинцов Л.Г.** Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.

УДК 621.9.02

И.Г. Шин, С.Р. Назаров, У.А. Сапаев
(Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности, Узбекистан)
E-mail: dimashin@list.ru

Комплексная оценка работоспособности твердосплавных режущих пластин с покрытием из нитрида титана

Приведены результаты экспериментальных исследований обрабатываемости конструкционных и легированных сталей твердосплавными инструментами с нитридотитановым покрытием и комплексная оценка их работоспособности через частные характеристики размерной стойкости и интенсивности изнашивания.

Ключевые слова: *твердый сплав, нитрид титана, покрытие, режим резания, длина пути резания, площадь обработанной поверхности, интенсивность изнашивания, критерий износа, стойкость.*

The article presents the results of experimental investigations of the workability of structural and alloyed steel carbide tools coated with titanium nitride and comprehensive assessment of their efficiency through private characteristics of dimensional stability and wear rate.

Keywords: *solid carbide, titanium nitride, coating, cutting mode, path length of the cutting, area of the treated surface, wear rate, criterion of wear, resistance.*

Работоспособность металлорежущих инструментов резко возросла в результате разработки и промышленного освоения эффективных технологических методов нанесения на них износостойких покрытий на основе металлоподобных и неметаллических соединений в виде нитридов, карбидов, боридов, окислов, обладающих высокой твердостью, износостойкостью и теплостойкостью. При выборе соответствующего износостойкого материала необходимо учитывать ряд важных факторов: физико-механические свойства и способ получения покрытия, обрабатываемый материал и режимы резания, инструментальный материал (твердый сплав, быстрорежущие и углеродистые стали, условия эксплуатации инструмента (стационарные или нестационарные динамические нагрузки)) и др.

В настоящее время одним из наиболее распространенных в практике металлообработки является износостойкое покрытие на основе нитрида титана (TiN), применение которого повышает производительность металлорежущего оборудования и, соответственно, снижает себестоимость выпускаемой продукции. При оптимизации параметров режима резания необходимо использовать данные о стойкости инструмента, оцениваемой не только абсолютной величиной — линейным износом по задней поверхности $h_з$ (при превалирующем износе по задней поверхности), но и дополнительными параметрами. Так, в качестве частных характеристик размерной стойкости инструмента были выбраны длина пути резания и площадь обработанной поверхности, которые определяли по формулам

$$l = \mathrm{v}T, \quad (1)$$

$$\Pi = 10\,\mathrm{v}Ts, \quad (2)$$

где v — скорость резания, м/мин; l — длина пути резания, м; П — площадь обработанной поверхности, см^2; T — стойкость, мин; s — подача, мм/об.

Зависимости (1) и (2) устанавливают соотношения между режимными параметрами процесса резания через стойкость инструмента и количественные характеристики механической обработки.

Наиболее эффективна относительная оценка износа с помощью интенсивности изнашивания J:

$$J = \frac{h_з}{\mathrm{v}T} = \frac{h_з}{l}, \quad \frac{\text{мм}}{\text{м}}. \quad (3)$$

В работе приведены результаты комплексного исследования работоспособности режущего инструмента с износостойким покрытием из нитрида титана при чистовой токарной обработке конструкционных и легированных сталей 45 (180...200 HB), ХВГ (35...40 HRC), применяемых в инструментальном производстве машиностроительных предприятий.

Нанесение износостойкого покрытия TiN на многогранные неперетачиваемые пластины различной формы из твердых сплавов Т5К10, Т14К8, Т15К6 и ВК8 осуществляли методом конденсации с ионной бомбардировкой (КИБ), относящимся к способам электродугового распыления в вакууме ($p = 5{\cdot}10^{-5}$ мм рт. ст.). Данный способ, как известно, заключается в испарении тугоплавких материалов (титана, молибдена и др.) или их сплавов электрической вакуумной дугой в присутствии

реакционных газов (азота, метана и др.) и последующей конденсации с ионной бомбардировкой материалов покрытия, которые образуются вследствие протекания плазмохимических реакций.

У пластин с покрытием контролировали поверхностную микротвердость H_μ при нагрузке $P = 0{,}98$ Н на приборе ПМТ-3, толщину покрытия и шероховатость поверхности *Ra*. Толщину покрытия определяли методом светового сечения на двойном микроскопе МИС-11, а также микроскопическим методом на поперечном срезе твердосплавных пластин с помощью инструментального микроскопа "ММИ".

Шероховатость поверхности режущих пластин после нанесения покрытия и в исходном состоянии измеряли на профилометре-профилографе модели "201" завода "Калибр" с фиксаций интегральных значений параметра *Ra*.

Оптимальные режимы ионной очистки и напыления создают равномерный слой нитрида титана толщиной 5...7 мкм с поверхностной микротвердостью $H_\mu = (2{,}8...2{,}9)\cdot10^4$ МПа при исходной $H_\mu = (1{,}5...1{,}6)\cdot10^4$ МПа. Покрытие практически не изменяет параметр *Ra*, находящийся в пределах 0,32...0,16 мкм.

При экспериментальных исследованиях стойкости инструментов в основном применяли твердосплавные пластины неправильной трехгранной формы с отверстием и стружечными канавками на одной грани с углом 80°. В качестве державок использовали сборные резцы с механическим креплением пластин. При составлении рабочей программы стойкостных исследований были учтены литературные и производственные данные по режимам резания при обработке сталей инструментами из твердого сплава. Так, были выбраны следующие диапазоны режимов резания: скорость v = 100...260 м/мин; подача $s = 0{,}097...0{,}34$ мм/об и глубина резания $t = 0{,}3...1$ мм. За критерий износа приняли фаску износа по задней поверхности $h_з = 0{,}4$ мм. Износ фиксировали непосредственно на станке с помощью отсчетного микроскопа МПБ-2 и вне станка на инструментальном микроскопе "ММИ" с точностью до 0,01 мм в конце каждого испытания на определенном режиме резания.

Исследование работоспособности режущего инструмента с покрытием из нитрида титана проводили при чистовом режиме точения (v = 175...240 м/мин; $s = 0{,}15$ мм/об, $t = 0{,}5$ мм; в отдельных опытах *s* составляла 0,097 и 0,21 мм/об) твердосплавными пластинами марки Т15К6.

На рис. 1 представлены зависимости износа $h_з$ по задней поверхности инструмента из Т15К6 + TiN от времени работы при различных скоростях резания. Для исследуемых скоростей резания первоначальный период обработки характеризуется интенсивным износом $h_з$, достигающим 0,15 мм при $T = 5$ мин. Дальнейший период резания характеризуется относительной

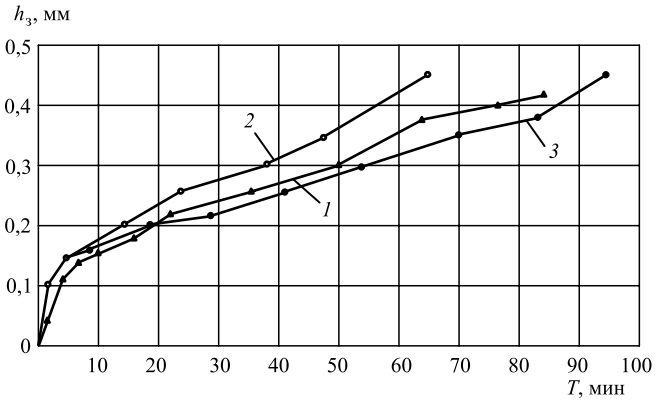


Рис. 1. Зависимость износа $h_з$ по задней поверхности от времени работы *T* инструмента при точении стали 45 пластинами из Т15К6 + TiN. Режим резания: *s* = 0,15 мм/об; *t* = 0,5 мм:
1 — v = 175 м/мин; *2* — v = 200 м/мин; *3* — v = 240 м/мин

стабилизацией скорости изнашивания задней поверхности инструмента. При достижении критерия износа $h_з = 0{,}4$ мм стойкость твердосплавных пластин с покрытием *T* составила 78, 56 и 86 мин при точении со скоростями резания v, равными 175, 200 и 240 м/мин соответственно. Таким образом, при размерах сечения среза $s \times t = 0{,}15 \times 0{,}5$ мм, соответствующих чистовой обработке, оптимальной является скорость резания v = 240 м/мин.

На рис. 2 представлены зависимости стойкости *T* и частных характеристик размерной стойкости (длины пути резания *l* и площади обработанной поверхности П) от скорости резания. Анализ этих зависимостей подтверждает целесообразность обработки стали 45 на повышенных скоростях резания (v = 240 м/мин). Этому значению скорости резания соответствуют $l = 22\,600$ м и П = 3,1 м^2. Сравнение результатов стойкостных исследований при точении стали 45 режущими пласти-

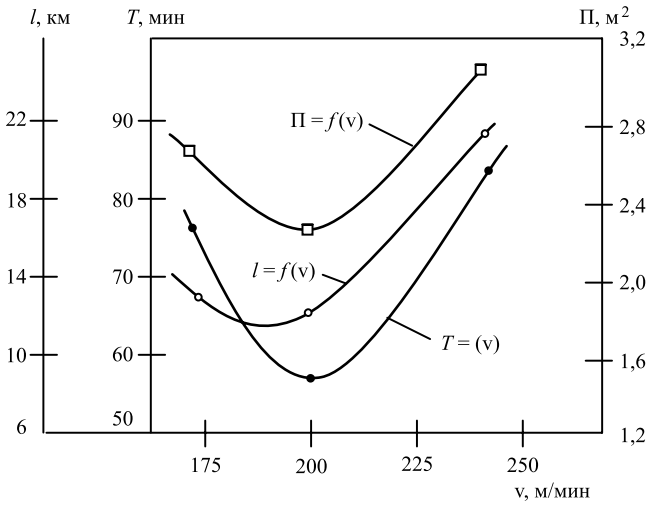


Рис. 2. Зависимость стойкости *T*, длины пути резания *l* и площади обработанной поверхности П от скорости резания v при точении стали 45 пластинами из Т15К6 + TiN

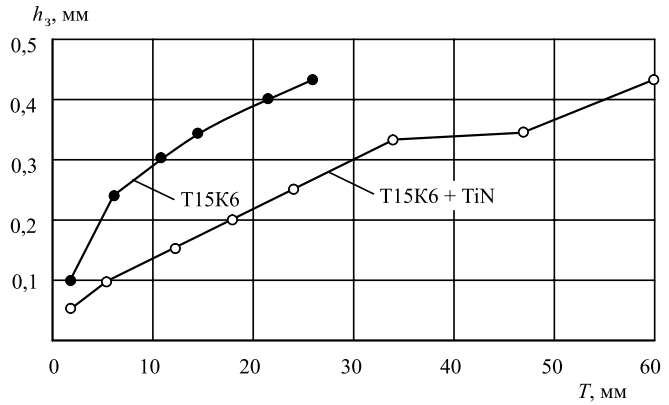


Рис. 3. Зависимость износа $h_з$ по задней поверхности от времени работы *T* инструмента при точении стали 7Х3. Режим резания: v = 180 м/мин; *s* = 0,15 мм/об; *t* = 0,5 мм

нами с покрытием из нитрида титана и без покрытия показало повышение стойкости инструментов до 2,5 раз.

В связи с низкой обрабатываемостью легированной стали 7Х3 стойкостные исследования проводили при значениях скоростей резания, меньших чем при обработке стали 45. Данные, приведенные на рис. 3, свидетельствуют о значительном увеличении стойкости инструмента с покрытием (в 3 раза), причем разница в интенсивности изнашивания наблюдается с самого начала резания.

Относительное увеличение стойкости инструментов с покрытием из нитрида титана при точении легированной инструментальной стали ХВГ составило в среднем 1,5...2,0 раза (рис. 4) в диапазоне изменения скорости резания v = 100...180 м/мин.

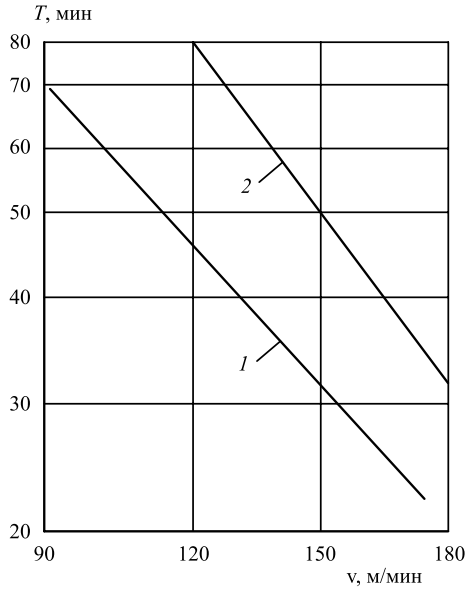


Рис. 4. Зависимость стойкости *T* инструмента от скорости резания v при точении стали ХВГ:
1 — T15K6; *2* — T15K6 + TiN

Специальные опыты при точении стали ХВГ твердосплавными режущими пластинами T15K6 с покрытием из нитрида титана с различной степенью исходной шероховатости их передней поверхности показали, что наибольшей стойкостью обладают резцы с износостойким покрытием, имеющие минимальную шероховатость поверхности лезвия. По-видимому, минимальная шероховатость поверхности обеспечивает более равномерную толщину покрытия, что гарантирует равную вероятность локального разрушения покрытия в пределах контактной площадки между стружкой и передней поверхностью режущего инструмента.

Для анализа механизма изнашивания твердосплавных пластин с покрытием устанавливали зависимость относительного износа (3) от режимов резания, а также изучали кинетику развития очагов износа и изменения формы режущей части инструмента. На рис. 5 показан пример оценки интенсивности изнашивания пластин из T15K6 с покрытием из нитрида титана. Опыты свидетельствуют о том, что эффективность применения твердосплавных пластин с покрытием увеличивается при повышенных скоростях резания. Так, при v = 240 м/мин относительный износ пластин из T15K6 + TiN и T15K6 составил $1{,}76 \cdot 10^{-5}$ и $8{,}35 \cdot 10^{-5}$ мм/м соответственно. Зависимость $J = f(\text{v})$ характеризуется смещением оптимальной скорости (для которой относительный износ является минимальным) в сторону ее бóльших значений для всех исследованных твердосплавных пластин с покрытием.

Смещение характерных скоростей резания, минимизирующих износ твердосплавных пластин с покрытием, было отмечено и при обработке конструкцион-

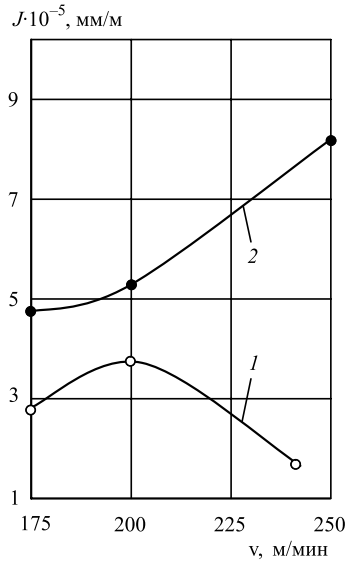


Рис. 5. Влияние скорости резания v на относительный износ *J* при точении стали 45 (197 НВ). Режим резания: *s* = 0,15 мм/об; *t* = 0,5 мм. Критерий износа $h_з$ = 0,4 мм:
1 — T15K6 + TiN; *2* — T15K6

ных сталей (40Х, 38ХС, ШХ15), высоколегированных сталей и сплавов (Х18Н12Т, ВТ14, ВТ20) [1]. Причиной такого изменения является уменьшение термомеханической напряженности режущей части твердосплавной пластины с покрытием за счет уменьшения контактных напряжений и температуры в зоне резания. Как установлено [2], основным фактором влияния покрытий на процесс резания является уменьшение протяженности (длины) контакта стружки с передней поверхностью инструмента, что связано с повышением градиента температуры в прирезцовой части стружки или уменьшением адгезионной активности по отношению к обрабатываемому материалу.

Равновероятное локальное разрушение покрытия в пределах контактной площадки между стружкой и передней поверхностью режущего инструмента может быть обеспечено равномерным по толщине покрытием при минимальной шероховатости поверхности. В работе [3] показано, что исходная шероховатость поверхности лезвия твердосплавных резцов из Т15К6 при точении легированной стали ХВСГ (38...42 HRC) влияет на стойкость инструмента. В целях повышения стойкости инструмента режущую поверхность подвергают полированию и затем наносят износостойкое покрытие из нитрида титана.

Важнейшим параметром работы режущего инструмента в автоматизированных системах является его надежность, т. е. способность инструмента выполнять свои функции при заданном периоде стойкости с определенной вероятностью. Как известно, период стойкости режущего инструмента имеет большие разбросы значений и для обеспечения высокого коэффициента надежности принимают стойкость, соответствующую минимальным его значениям, т. е. меньше средних и максимальных периодов стойкости. Использование более производительных режущих инструментов с покрытием, имеющих высокую стабильность режущих свойств, позволяет не только увеличить скорость резания, но и одновременно повысить вероятность безотказной работы инструмента.

Процесс резания и изнашивания режущего инструмента определяется случайным характером взаимодействия контактных поверхностей инструмента с обрабатываемым материалом, нестабильностью термомеханических процессов, неоднородностью свойств инструментального и обрабатываемого материалов, состоянием системы СПИД (станок—приспособление—инструмент—деталь) и др. Поэтому работоспособность режущего инструмента является случайной величиной. Сложность прогнозирования надежности в этом случае вызвана не только тем, что трение и изнашивание зависят от многих факторов, но и тем, что практически все факторы могут изменяться в процессе самого изнашивания. Таким изменениям подвергаются геометрические параметры режущего клина (передний γ, задний α углы, углы в плане φ и φ_1), состояние контактирующих поверхностей и распределение нормальных и касательных нагрузок на них.

Методика прогнозирования изнашивания механических устройств [4] применительно к режущим инструментам предусматривает последовательное определение следующих параметров: предельно допустимого износа $z_д$; изменение износа $z(x)$ в зависимости от наработки x или интенсивности изнашивания поверхности трения J; пути трения L до наступления износа $z_д$. Во многих случаях средняя скорость изнашивания не остается постоянной. Так, максимальная скорость изнашивания инструмента наблюдается при приработке в начальный момент резания. Изнашивание при переменной скорости обычно целесообразно аппроксимировать параболой (нелинейная аппроксимация) вида

$$\overline{x(z)} = a + bz + cz^2. \qquad (4)$$

Параметры a, b, c определяют из уравнений, полученных методом наименьших квадратов,

$$\begin{aligned} an + b\Sigma z_i + c\Sigma z_i^2 &= \Sigma x_i; \\ a\Sigma z_i + b\Sigma z_i^2 + c\Sigma z_i^3 &= \Sigma x_i z_i; \\ a\Sigma z_i^2 + b\Sigma z_i^3 + c\Sigma z_i^4 &= \Sigma x_i z_i^2, \end{aligned} \qquad (5)$$

где n — число наблюдений; Σ изменяется от $i = 1$ до n.

В частном случае возможна аппроксимация параболой вида

$$\overline{x(z)} = cz^2, \qquad (6)$$

проходящей через начало координат, или параболой

$$\overline{x(z)} = a + cz^2. \qquad (7)$$

Как следует из данных стойкостных исследований (см. рис. 1), при точении стали 45 пластинами из Т15К6 + TiN со скоростью резания v = 175 м/мин износ по задней поверхности $h_з$ = 0,16 мм при T = 10 мин и $h_з$ = 0,30 мм при T = 50 мин. Составим уравнение развития изнашивания.

Для данного случая при параболической аппроксимации воспользуемся первыми двумя уравнениями системы (5) при $b = 0$, т. е. будем аппроксимировать параболами вида $x = a + cz^2$. Тогда

$$2a + c\sum_{i=1}^{2} z_i^2 = \sum_{i=1}^{2} x_i; \qquad (8)$$

$$2\sum_{i=1}^{2} z_i + c\sum_{i=1}^{2} z_i^3 = \sum_{i=1}^{2} x_i z_i. \qquad (8)$$

Подставляя $x_i = T_i$ и $z_i = h_{3i}$ в систему уравнений (8), определим параметры a и c: $a = 0{,}262$; $c = 600{,}6$, т. е. искомое уравнение параболы

$$x = 600{,}6\, z^2 + 0{,}262$$

или в общепринятых обозначениях параметров процесса резания при стойкостных исследованиях

$$T = 600{,}6 h_3^2 + 0{,}262. \qquad (9)$$

Таким образом, уравнение развития изнашивания (9) может быть получено для различных условий и режимов резания и позволяет вести прогнозную оценку работоспособности режущих инструментов, в том числе и высокоэффективных твердосплавных неперетачиваемых пластин с износостойким покрытием из нитрида титана. Покрытие оказывает положительное влияние на стабилизацию режущих свойств инструментов, так как прежде всего способно устранять и "залечивать" поверхностные дефекты материала инструмента. Кроме того, ионная бомбардировка влияет на морфологию поверхности и уменьшает шероховатость. Основное воздействие покрытия на процесс резания состоит в стабилизации сформированных контактных зон и термомеханической напряженности режущей части инструмента.

Комплексная оценка режущих свойств инструментов с покрытием по таким критериям, как предельный износ по задней поверхности, площадь обработанной поверхности, длина пути резания, обеспечивает обоснованный выбор оптимальных режимов резания через производительность и, следовательно, снижает себестоимость выпускаемой продукции. Возможность прогнозирования работоспособности режущих инструментов по уравнениям развития изнашивания позволяет значительно повысить эффективность функционирования автоматизированных станочных линий в современном машиностроительном производстве.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Верещака А.С., Третьяков И.П.** Режущие инструменты с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1986. 192 с.

2. **Мацевитый В.М., Казак И.Б., Романова Л.М.** Влияние износостойкого покрытия на условия фрикционного контакта стружки с передней поверхностью инструмента // Трение и износ. 1985. Т. VI. № 2. С. 332—338.

3. **Крюков В.К., Зозуля В.Ф., Богуш В.С.** Фрикционные покрытия — эффективное средство повышения износостойкости режущего инструмента // Сб. науч. трудов "Резание и инструменты" Харьковского политехнического института. 1985. № 33. С. 130—134.

4. **Хазов Б.Ф., Дидусев Б.А.** Справочник по расчету надежности машин на стадии проектирования. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.

ВНИМАНИЮ ЧИТАТЕЛЕЙ!

С 1 января 2016 года журнал "Наноинженерия" не издается.
В журнале "Упрочняющие технологии и покрытия" введены рубрики
"Упрочняющие нанотехнологии" и **"Материаловедение наноструктур"**.
Все материалы, касающиеся данной тематики,
будут публиковаться в нашем журнале.

Телефон редакции: 8 (499) 268-47-19
E-mail: utp@mashin.ru

УДК 621.9.048.7 + 681.7.022.5

[1]Ю.В. Панфилов, [2]С.Б. Нестеров, [2]С.Б. Симакин, [1]М.Э. Яковлев
([1]Московский государственный университет им. Н.Э. Баумана,
[2]Научно-исследовательский институт вакуумной техники им. С.А. Векшинского, г. Москва)
E-mail: maxim5_91@mail.ru

Применение ионно-плазменных методов для формирования гладких оптических поверхностей

Для ряда научных и промышленных применений требуются оптические зеркала и линзы с многослойными интерференционными покрытиями. Заготовки для них должны иметь специально подготовленную поверхность. В данной работе проанализированы методы обработки оптических поверхностей. Для ионно-плазменных методов показаны физические модели и изложены результаты исследований, показывающие актуальность освещаемой тематики.

Ключевые слова: *шероховатость, отражение, ионно-лучевое полирование, планаризация, плазма, ионные кластеры.*

For a number of scientific and industrial applications optical mirrors and lenses with multilayer interference coatings are required. Preform surface for them must be specially prepared. Some methods of optical surfaces manufacturing are analyzed in this article. The physical models and the results of some researching which shows the urgency of ion-plasma methods are represented.

Keywords: *roughness, reflection, ion-beam polishing, planarization, plasma, ion clusters.*

Введение

В современной оптической промышленности предъявляются высокие требования к состоянию поверхности элементов оптических систем, где определяющими являются шероховатость, толщина нарушенного слоя и глубина залегания привнесенных нарушений. Даже наноразмерные искажения поверхности оказывают заметное влияние на различные физические свойства изделий. Заготовки для оптических деталей должны иметь сверхгладкие поверхности с высотами неровностей не более 1 нм, на которые осаждают отражающие, поглощающие, просветляющие и другие специальные тонкопленочные покрытия. Важнейшие параметры оптических изделий определяются светопотерями, одной из главных причин которых является рассеяние на границах раздела многослойной интерференционной структуры тонкопленочного покрытия. Предполагается, что шероховатость границ раздела в многослойном покрытии связана с шероховатостью подложки, на которой сформированы функциональные слои.

Общая проблема обработки поверхности материалов включает в себя получение геометрически совершенных поверхностей с высокой степенью химической чистоты и разработку методов полирования, обеспечивающих уменьшение нарушенного слоя. Состояние поверхности и толщина нарушенного слоя после обработки определяют пригодность того или иного метода полирования поверхности. В настоящее время наиболее распространены механические, химико-механические и электрохимические способы полирования.

Однако достичь требуемого уровня шероховатости только за счет абразивной обработки с помощью мелкодисперсных (алмазных) паст не представляется возможным, так как минимальный диаметр абразивной частицы в этом случае должен быть близким к диаметру молекул вещества. Вследствие этого финишную обработку и доводку поверхности проводят электрохимическим и химико-механическим способами. Однако применение этих методов имеет ряд недостатков, в том числе таких, как образование глубокого нарушенного слоя, в состав которого входят элементы полирующего композита.

Для наноразмерного полирования все более широко применяют комбинирование методов химико-механического полирования, плазменной и ионно-лучевой обработки, так как эти процессы позволяют получить поверхности с наименьшим уровнем шероховатости.

Цель работы — анализ современных методов обработки оптических поверхностей и определение наиболее перспективных способов обработки оптических деталей.

Анализ методов получения сверхгладких поверхностей

С помощью механической обработки можно получить следующие уровни шероховатости поверхности *Ra*: 200...400 нм (шлифование) [1], 2,0 нм (полирование) [2] и 1...2,5 нм (алмазное точение) [3]. Методы ионно-плазменной и плазмохимической обработки обеспечивают получение следующих уровней шероховатости:

ионное полирование — $Rq = 0{,}25...0{,}5$ нм;

ионное полирование с планаризацией — $Rq = 0{,}25...0{,}5$ нм;

плазмохимическое травление — $Ra = 0{,}8$ нм;

ионно-кластерное полирование — $Ra = 0{,}6...1{,}3$ нм.

Традиционные методы механического шлифования и полирования не позволяют достичь сверхмалого уровня шероховатости и оставляют после себя достаточно глубокий нарушенный слой в обрабатываемом материале, что в ряде случаев ограничивает область применения механической обработки. Алмазное точение позволяет получить шероховатость до 1 нм, однако на поверхности также остается дефектный слой.

Ионное полирование — это управляемый, а следовательно, воспроизводимый процесс формирования оптических поверхностей с заданными характеристиками и топографией, в основе которого лежит физическое явление распыления атомов поверхности мишени под действием ионной бомбардировки. Ионное полирование позволяет с высокой точностью обрабатывать поверхностный слой детали в целях улучшения его свойств. Частичное или полное удаление дефектного слоя приближает свойства поверхности к свойствам материала в объеме и позволяет уменьшить шероховатость поверхности.

На рис. 1 представлена схема воздействия ионов на шероховатую поверхность. Ускоренные ионы бомбардируют поверхность материала, выбивая с поверхности атомы (А) вещества и тем самым сглаживая микронеровности поверхности ($h_2 < h_1$).

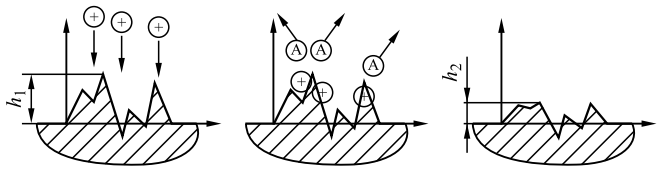


Рис. 1. Схема сглаживания микронеровностей поверхности ионной бомбардировкой

У метода ионного полирования имеется существенный недостаток, заключающийся в том, что поверхность подложки может иметь микродефекты и загрязнения (царапины, поры, пыль, химические соединения), которые могут стать причиной различия скоростей распыления на разных участках подложки, а следовательно, и неоднородной шероховатости поверхности.

Для устранения этого недостатка перед операцией ионного полирования на поверхность подложки наносят тонкую пленку, т. е. проводят планаризацию поверхности. Метод ионного полирования с планаризацией заключается в осаждении на исходную поверхность подложки пленки наноразмерной толщины из материала подложки с дальнейшим ионным травлением образца на глубину, примерно вдвое большую толщины осажденного слоя. Данные операции многократно повторяют с постепенным уменьшением толщины наносимого слоя. На рис. 2 представлена схема ионного полирования с планаризацией ($h_3 < h_2 < h_1$).

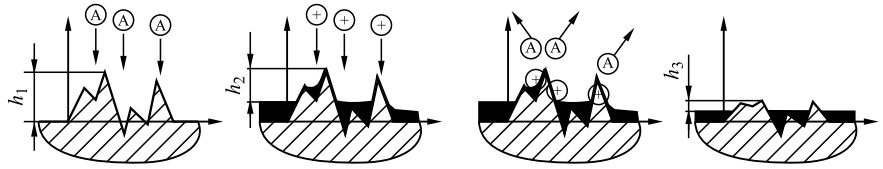


Рис. 2. Схема ионного полирования с планаризацией. Слева направо: осаждение пленки, ионная бомбардировка, удаление осажденной пленки, рельеф после обработки

Наряду с ионным полированием существует и плазмохимическое полирование, в основе которого лежит химическая реакция между реактивным газом и поверхностью образца. В газоразрядной плазме образуются химически активные радикалы, которые вступают в химическую реакцию с материалом подложки и удаляют часть ее поверхностного слоя. Достоинством метода является возможность создать равномерную низкотемпературную плазму с высокой плотностью и воздействовать на поверхность, не внедряя примеси. Метод плазмохимического полирования позволяет значительно повысить скорость обработки поверхности по сравнению с ионным полированием. Недостатками метода можно считать высокую селективность (для каждого материала подложки нужно подбирать свой травитель, особенно для таких материалов, как, например, кварцевое стекло) и необходимость использования токсичных газов.

В настоящее время интенсивно развивается новый вид ионной обработки поверхности — ионно-кластерное полирование. Существует возможность получения сверхгладких поверхностей любых веществ

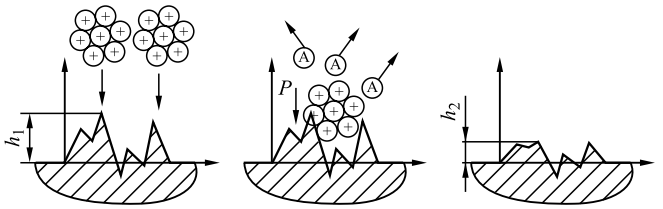


Рис. 3. Схема воздействия ионных кластеров на шероховатую поверхность. Слева направо: поток ионных кластеров, взаимодействие ионных кластеров с поверхностью, рельеф после обработки

и покрытий (в том числе сверхтвердых) с сохранением структуры обрабатываемых материалов, что актуально в силовой электронике для полирования алмазных подложек, при производстве кристаллооптических элементов для повышения их радиационной стойкости. Ионный кластер — группа соединенных ионов. На рис. 3 показана схема ионно-кластерного полирования поверхности ($h_2 < h_1$). Согласно работе [4] при помощи ионных кластеров можно улучшить качество поверхности практически любого материала.

Недостатком метода ионно-кластерного полирования является отсутствие на рынке промышленного оборудования для ионно-кластерной обработки поверхностей.

Обзор результатов исследований по ионно-плазменному воздействию на поверхности материалов

В работе [5] представлено исследование полирования поверхности ионным пучком, приводится сравнение методов прямого бомбардирования ионами и ионного полирования с планаризацией на подложках, имеющих изначально различную шероховатость. На рис. 4 показан результат полирования образца ионами аргона. Исследование позволяет наглядно наблюдать изменение поверхности образца — переход от шероховатой к гладкой поверхности.

Результаты полирования прямым бомбардированием и полирования с планаризацией — нанесением специального фоторезиста представлены на рис. 5. Торец образца № 1 представляет собой

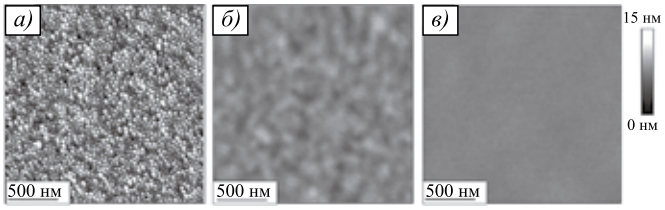


Рис. 4. Поверхность кремния в зависимости от времени обработки [5]:

а — исходный образец; *б* — 10 мин полирования; *в* — 180 мин полирования

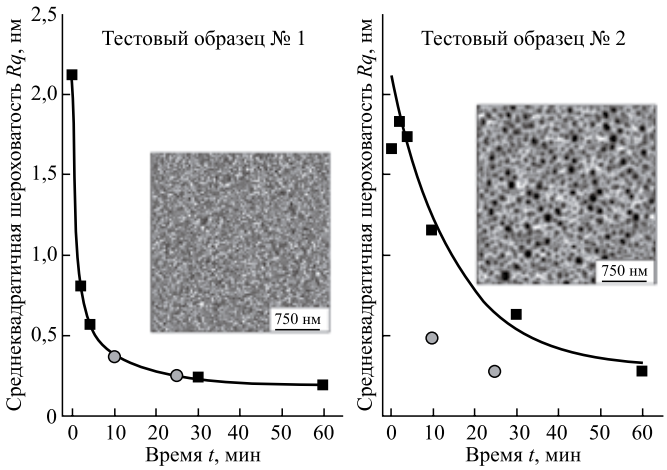


Рис. 5. Результаты полирования прямым бомбардированием и полирования с планаризацией [5]:

■ — ионно-лучевое полирование; ● — ионно-лучевое полирование + ионно-лучевая планаризация

точечно-структурированную поверхность, образца № 2 — поверхность с небольшими впадинами. Как показывает исследование, для образца № 2 при использовании планаризации для достижения шероховатости *Ra* в пределах 0,25...0,5 нм потребовалось меньшее время обработки.

В работе [6] в качестве планаризации рассматривается заполнение впадин образца материалом, аналогичным материалу образца, методом ионного распыления мишени. В дальнейшем проводится травление поверхности ионами. Такой прием позволяет улучшить поверхность исходного образца кварца в 2 раза (до *Ra* = 0,8 нм). Этот способ позволяет создать химически чистую поверхность и не привносит дефекты.

Полирование кварцевого стекла с помощью высокочастотной плазмы различных газов (SF_6, Ar, O_2) рассмотрено в работе [7]. На рис. 6 показаны результаты полирования плазмой Ar.

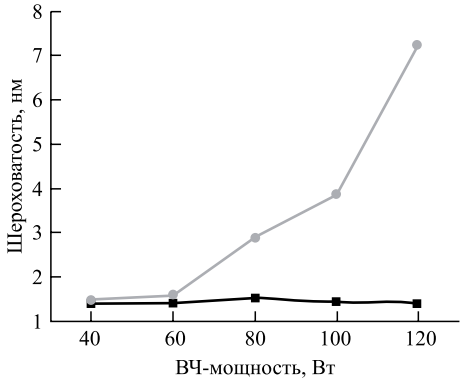


Рис. 6. Результаты полирования поверхности аргоновой плазмой: зависимость шероховатости от мощности источника [7]:

—■— исходная поверхность; —●— полированная поверхность

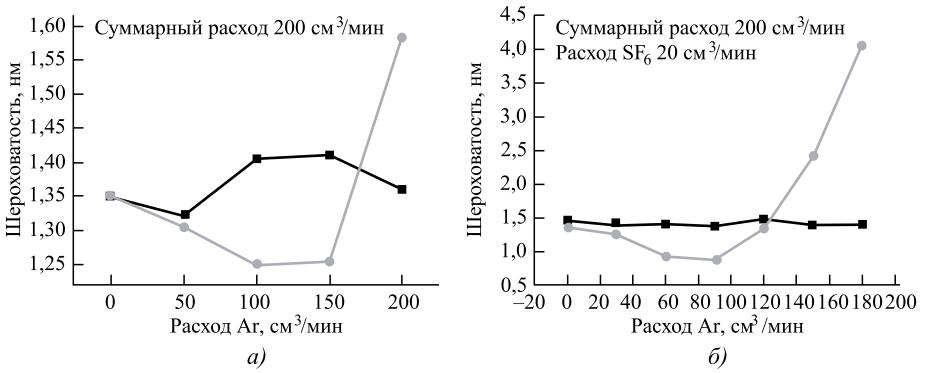


Рис. 7. Влияние плазмы смеси газов на шероховатость поверхности [7]:
а — Ar; *б* — Ar + SF_6; —■— исходная поверхность; —●— полированная поверхность

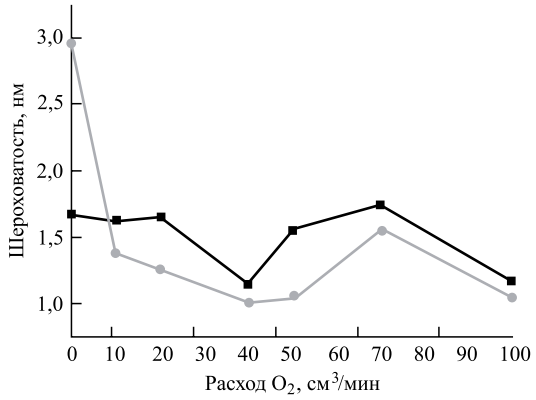


Рис. 8. Влияние расхода кислорода на шероховатость поверхности при полировании высокочастотной (13,56 МГц) плазмой [8]:
—■— исходная поверхность; —●— полированная поверхность

Влияние на шероховатость поверхности плазмы смеси газов представлено на рис. 7.

В работе [8] рассматриваются исследования по выявлению влияния потока кислорода на полирование высокочастотной плазмой. На рис. 8 представлены результаты исследований для генератора плазмы частотой 13,56 МГц с различными расходами кислорода.

Заключение

Для современной оптики, микро- и наноэлектроники актуальной является задача получения поверхностей с параметром шероховатости $Ra < 1$ нм. Анализ литературы показал, что в различных странах активно ведутся поиски наилучшего метода обработки поверхностей в целях получения минимально возможной шероховатости.

Среди наиболее востребованных выделяются ионно-лучевые, ионно-плазменные и плазмохимические методы, позволяющие получать поверхности с показателями шероховатости на уровне 1 нм, с высокой степенью химической чистоты и не привносящие нарушений в поверхностный слой.

Одним из наиболее перспективных, с нашей точки зрения, методов получения сверхгладких поверхностей сегодня является комбинация методов ионно-лучевого полирования, планаризации и ионно-плазменного травления в едином вакуумном цикле.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Витязь П., Ильющенко А., Жорник В.** Наноалмазы детонационного синтеза: получение и применение. Litres, 2014. С. 97.

2. **Изменение** шероховатости поверхности CVD—ZnSe при механической обработке в зависимости от размера зерна суспензии / Е.Ю. Вилкова, О.В. Тимофеев, С.А. Носов, А.Н. Дубовой // Научно-технический "Оптический журнал". С. 70. URL: http://opticjourn.ifmo.ru/file/article/9817.pdf

3. http://www.nppfocus.com/Almaznoe_tochenie.php

4. **Зарвин А.Е.** Кластерные пучки в разреженных газах: от науки к технологиям // Материалы XXII науч.-техн. конф. "Вакуумная наука и техника". М., 2015. С. 39—41.

5. **Large** area smoothing of surfaces by ion bombardment: fundamentals and applications / F. Frost, R. Fechner, B. Ziberi, J. Vollner et al. // J. Phys.: Condens. Matter 21 (2009) 224026 (20 p.).

6. **Стогний А.И., Новицкий Н.Н., Стукалов О.М.** Ионно-лучевое полирование наноразмерного рельефа поверхности оптических материалов // Письма в ЖТФ. 2002. Т. 28. Вып. 1.

7. **Yilong Wu, Weiguo Liu, Lingxia Hang.** Research on RF-generated Plasma Polishing. Physics Procedia 32 (2012) 590—597 1875-3892 © 2012 Published by Elsevier B.V. Selection and/or peer review under responsibility of Chinese Vacuum Society (CVS), doi: 10.1016/j.phpro.2012.03.605 18th International Vacuum Congress.

8. **Yuan Tian, Weiguo Liu, Lingxia Hang.** Influence of Oxygen Flow Rate on the Variation of Surface Roughness of Fused Silica during Plasma Polishing Process. Physics Procedia 18 (2011) 107—111 1875-3892 © 2011. Published by Elsevier B.V. Selection and/or peer-review under responsibility of Selection and/or peer-review under responsibility of Lanzhou Institute of Physics, China, doi:10.1016/j.phpro.2011.06.067. The Fourth International Conference on Surface and Interface Science and Engineering.

УДК 534.222.2 + 621.793.79

В.Ю. Ульяницкий, И.С. Батраев, А.А. Штерцер
(Институт гидродинамики им. М.А. Лаврентьева, СО РАН, г. Новосибирск)
E-mail: asterzer@mail.ru

Восстановление трибоузлов детонационным напылением*

На установке CCDS2000 проведено детонационное напыление покрытий из антифрикционных и износостойких сплавов, применяемых в парах трения, исследованы прочностные свойства и микроструктура покрытий. Для напыления использовались газовые смеси на основе бинарного топлива ацетилен-пропан с различным молярным составом. Разработанная технология пригодна для восстановления изношенных трибоузлов различных механизмов и устройств. Результаты исследований использованы при восстановлении трибоузла вал — втулка винтовых компрессоров F200 SU и F2016c-51, применяемых холодильных установках.

Ключевые слова: *детонационное напыление, подшипник скольжения, антифрикционное покрытие, износостойкое покрытие, адгезия, микротвердость.*

The CCDS2000 facility was used for detonation spraying of antifriction and wear-resistant alloys that are employed in tribological units. Investigation of strength properties and microstructure of coatings was performed. The gaseous mixtures based on acetylene-propane binary fuel with different molar compositions were chosen for spraying The developed technology can be used in restoration of worn friction units of different gears and devices. The research results were used in rework of shaft — bushing friction unit of F200 SU and F2016c-51 helical compressors.

Keywords: *detonation spraying, plane bearing, antifriction coating, wear-resistant coating, adhesion, microhardness.*

Введение

Подшипники скольжения для узлов трения различных технических устройств традиционно изготавливают с применением металлургических способов соединения антифрикционного материала с несущей основой (прилуживания, заливки, прокатки) [1]. Широко применяется также наплавка [2], а в некоторых случаях — сварка взрывом [3]. Развитие газотермических методов нанесения покрытий привело к тому, что в настоящее время они успешно конкурируют с традиционными технологиями в получении или восстановлении антфрикционных слоев [4, 5]. Надо отметить, что методы напыления и наплавки часто позволяют повысить адгезию антифрикционного слоя на той или иной подложке по сравнению с указанными выше традиционными способами. В [5] подчеркивается, что газотермические методы особенно эффективны при изготовлении подшипников скольжения больших размеров. При детонационном напылении (ДН) порошковые частицы разгоняются и нагреваются в стволе установки и, сталкиваясь с поверхностью обрабатываемой детали, образуют покрытие. Несмотря на высокую температуру продуктов детонации ДН можно применять и для нанесения покрытий из легкоплавких материалов. Так, в [3] с помощью ДН получали баббитовый приработочный слой на антифрикционном сплаве АО20-1 (AlSn20Cu1), используемом во вкладышах двигателей внутреннего сгорания, в том числе в крупногабаритных дизельных двигателях.

В промышленности существует большая потребность в восстановлении изнашиваемых пар трения (трибоузлов) различных машин, механизмов и устройств. Детонационное напыление наряду с другими газотермическими методами уже давно используется для восстановления деталей машин, в том числе шеек валов, сопрягаемых с подшипниками скольжения. Как правило, на шейки наносятся покрытия из твердых сплавов, чугуна, самофлюсующихся сплавов и других износостойких материалов. Чтобы восстанавливать не отдельные детали пар трения, а трибоузел целиком, представляется перспективным шире использовать газотермические технологии для нанесения покрытий из антифрикционных материалов, в том числе и легкоплавких.

В настоящей работе описываются исследования по нанесению детонационных покрытий на детали пар трения. Результаты исследований использованы при восстановлении трибоузла импеллер — втулка винтовых компрессоров F200 SU и F2016c-51, применяемых в холодильных установках.

Используемые материалы

Для исследования свойств получаемых покрытий проводили детонационное напыление антифрикционных и износостойких слоев на плоские образцы из

* Исследования проведены при поддержке гранта Президента РФ для научных школ № 2695.2014.1.

стали 45. Антифрикционные слои получали с использованием порошков баббита ПР-Б83 (AP-SnSb11Cu6) с размером частиц 40...100 мкм и алюминиевой бронзы ПР-БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5 (AP-CuAl8.5Fe4Ni5Mn1.5) с размером частиц 40...63 мкм производства ОАО "Полема". Для нанесения износостойких слоев применяли порошок самофлюсующегося сплава на никелевой основе CastoJet 55396C производства компании Castolin Eutectic с размером частиц 25...50 мкм, а также порошки стали ПР-20Х13Н2 и чугуна ПР-ЧН15Д7 с размером частиц 20...63 мкм производства ОАО "Полема".

Баббит Б83 является антифрикционным сплавом на оловянной основе и применяется в деталях, работающих в экстремальных условиях, в частности в тяжелонагруженных подшипниках скольжения. Мягкую основу материала составляет твердый раствор сурьмы и меди в олове (α-фаза). В этой основе присутствуют твердые включения SnSb (β-фаза) и Cu_3Sn (γ-фаза). Мягкая матрица обеспечивает хорошую прирабатываемость поверхности при трении. Твердые включения повышают износостойкость материала. Химический состав баббита Б83: сурьма — 10...12 %, медь — 5,5...6,5 %, олово — остальное. Плотность материала 7,38 г/см^3.

Алюминиевая бронза ПР-БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5, легированная железом, никелем и марганцем, представляет собой α-твердый раствор алюминия в меди. Материал кристаллизуется в диапазоне температур от 1083 до 1037 °С. В литературе отсутствуют данные по свойствам объемного материала БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5, однако если исходить из химического состава (8,5 % Al, 4 % Fe, 5 % Ni, 1,5 % Mn), эта бронза должна обладать наряду с хорошими антифрикционными свойствами высокой пластичностью, механической прочностью и коррозионной стойкостью. Расчетная плотность материала 7,40 г/см^3. В табл. 1 приведены некоторые свойства полученных традиционными способами баббита Б83 и близких по химическому составу к БрАЖНМц 8,5-4-5-1,5 бронз БрАЖН 10-4-4 и БрАЖМц 10-3-1,5.

Самофлюсующийся сплав CastoJet 55396C применяется в основном при нанесении износо- и коррозионно-стойких покрытий методом высокоскоростного газопламенного напыления — HVOF (High Velocity Oxygen Fuel). Химический состав: 16 % Cr, 4,3 % Si, 3,4 % B, Ni — основа. HVOF-покрытия имеют микротвердость 750 HV1, адгезию более 70 МПа, пористость менее 0,5 % и работают до температуры 800 °С [7]. Расчетная плотность материала 7,10 г/см^3.

Коррозионно-стойкая сталь 20Х13Н2 (0,2 % C, 13 % Cr, 2,2 % Ni, 0,8 % Mn) и высоколегированный никелевый чугун ЧН15Д7 (2,6 % C, 15 % Ni, 7 % Cu, 2,2 % Cr, 2,2 % Si, 1 % Mn) часто применяются для восстановления деталей машин газотермическими способами. В частности, ЧН15Д7 используют для устранения дефектов чугунного литья. Плотность стали составляет 7,70 г/см^3, чугуна — 7,25 г/см^3. В [8] подробно описан опыт использования ДН для восстановления деталей электроцентробежного насоса с применением этих материалов и самофлюсующихся сплавов на никелевой основе (российские аналоги CastoJet 55396C).

Получение покрытий, изучение их свойств и восстановление пар трения

Детонационное напыление проводили на установке CCDS2000, описанной в [9]. Одна из особенностей этого оборудования заключается в возможности заполнения разных участков ствола детонирующими смесями различного состава (формирование стратифицирован-

Таблица 1

Свойства антифрикционных материалов, получаемых металлургическими методами [1, 6] (прочностные свойства бронз из [1] соответствуют прессованным пруткам (ГОСТ 1628—78), из [6] — горячекатаной полосе)

Параметр	Баббит Б83	БрАЖН 10-4-4	БрАЖМц 10-3-1,5
ρ, г/см^3	7,38 [6]	7,50 [1]	7,50 [1]
$T_{пл}$, °С: ликвидус солидус	 370 [6] 240 [6]	 1082 [6] —	 1045[6] —
$\sigma_в$, МПа	88 [6]	> 637 [1] 637 [6]	> 588 [1] 490 [6]
δ, %	6 [6]	⩾ 5 [1] 10...15 [6]	⩾ 5 [1] 20 [6]
НВ, МПа	294 [8]	1670...1960 [1] 1344 [8]	1274...1960 [1] 1177 [8]
k	0,005* [6]	0,011* [6] 0,230** [6]	0,012* [6] 0,210** [6]

Обозначения: $T_{пл}$ — температура плавления; $\sigma_в$ — прочность на разрыв; δ — относительное удлинение; НВ — твердость по Бринеллю; *k* — коэффициент трения; * — со смазкой; ** — без смазки.

ного заряда). В некоторых детонирующих смесях, где в качестве топлива используется не ацетилен, а другие углеводороды (пропилен, пропан, пропан-бутан), детонационная волна формируется на больших расстояниях от места инициирования, поэтому в традиционных установках ДН применяются длинные (2...3 м) стволы.

В стратифицированном заряде детонация может возбуждаться сначала в чувствительной смеси, заполняющей камеру зажигания и ствол у казенной части (заряд-бустер), и затем переходить в низкочувствительную смесь (рабочий заряд) в виде уже сформировавшейся детонационной волны. Это позволяет значительно уменьшить длину ствола. В настоящей работе применяли стволы длиной 1 м, в качестве бустера использовали эквимолярную смесь ацетилен—кислород (C_2H_2 + O_2). Скорость детонации этой смеси составляет 2934 м/с, температура продуктов за фронтом детонации — 4516 К, динамический напор газа за фронтом детонации — 1,82 МПа [9]. Динамический напор характеризует способность продуктов детонации разгонять частицы порошка и вычисляется по формуле $\rho u^2/2$, где ρ, u —плотность и скорость газа за фронтом детонационной волны соответственно.

Еще одной особенностью установки CCDS2000 является возможность формировать для напыления детонирующие смеси, содержащие два вида топлив, а при необходимости и более. Для напыления перечисленных выше порошков использовали рабочие заряды на основе бинарного топлива ацетилен-пропан с различным молярным соотношением компонентов детонирующей смеси $aC_2H_2 + bC_3H_8 + cO_2$. При этом коэффициенты a, b, c подбирали так, чтобы в продуктах детонации практически отсутствовал свободный кислород для предотвращения окисления напыляемого материала. Скорость детонации использовавшихся смесей варьировалась в диапазоне 2500...2762 м/с, температура за фронтом детонации — 2665...3652 К, динамический напор — 1,45...1,76 МПа. При нанесении покрытий из баббита диаметр ствола составлял 26 мм, для продувки ствола между выстрелами использовали азот. Остальные материалы напыляли на стволе переменного сечения диаметром 20 мм в казенной и 16 мм в дульной части. Продувку осуществляли воздухом. Такая конструкция позволяет эффективнее разгонять частицы. Экспериментально были подобраны дистанции напыления для баббита 300 мм и для всех остальных материалов 250 мм. Отработку режимов вели на плоских образцах из стали 45, которые перед напылением подвергали пескоструйной обработке электрокорундом с размером зерна около 300 мкм.

У полученных покрытий измеряли микротвердость, пористость и адгезию. Износостойкие покрытия (сталь, чугун, сплав CastoJet 55396C) дополнительно подвергали испытаниям на абразивный износ и измеряли их твердость. Микротвердость определяли на приборе DuraScan-50, твердость — на твердомере ТР 5006-02. Микроструктуру изучали на электронном микроскопе Hitachi TM-1000 Tabletop Microscope и металлографическом микроскопе OLYMPUS GX-51 с пакетом программ Olympus Stream Essentials для измерения пористости. Адгезию определяли по штифтовой методике. В абразивных испытаниях образец прижимается с усилием F = 35 Н к вращающемуся обрезиненному диску диаметром d = 218 мм и на поверхность трения подается порошок корунда. Через 200 оборотов диска взвешиванием на весах ЛВ-210-А определяется потеря массы покрытия, по которой с учетом плотности материала вычисляется потеря объема.

Характеристики покрытий приведены в табл. 2, откуда видно, что ДН обеспечивает для всех покрытий низкую пористость и высокую адгезию. В сравнении с данными, опубликованными в [8], абразивный износ стали 20Х13Н2 и чугуна ЧН15Д7 в тестах оказался значительно ниже. Это связано с тем, что в [8] использовали большее усилие прижима образца к вращающемуся диску (45 Н) и был больше диаметр диска (233 мм). Кроме того, в настоящей работе тестировали шлифованные покрытия, а в [8] — покрытия без обработки после напыления. Фактически при одинаковых условиях испытаний разных материалов измерялась их относительная износостойкость.

Из табл. 2 видно, что абразивная стойкость покрытия 20Х13Н2 существенно превышает стойкость покрытий из чугуна и сплава CastoJet 55396C, в то же время самую высокую твердость имеет CastoJet. Это еще раз подтверждает сделанный в [10] вывод, что нет прямой связи между твердостью и износостойкостью (абразив-

Таблица 2

Прочностные свойства и пористость η детонационных покрытий

Материал покрытия	σ, МПа	HRA	HV300, МПа	η, %	w, мм^3
Баббит Б83	25	—	286...304	< 0,10	—
БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5	59...78	—	2744...3038	0,50...1,00	—
CastoJet 55396C	103...107	80...81	5880...7350	0,11...0,16	9,4...10,1
20Х13Н2	91...93	70...76	4410...4900	0,10...0,30	4,3...4,6
ЧН15Д7	83...91	73...76	4606...4900	0,10...0,65	11,0...11,3

Обозначения: σ — адгезия; HRA — твердость по Роквеллу; HV300 — микротвердость при нагрузке 300 гс; w — объемный износ покрытия за 200 оборотов диска.

ной, эрозионной, гидроабразивной) покрытий. В [10] также показано, что с ростом абразивной стойкости для металлических покрытий растет и гидроабразивная стойкость. Поэтому сталь 20Х13Н2 можно рекомендовать для покрытий на деталях, работающих в условиях не только абразивного, но и гидроабразивного износа. Самую высокую твердость и адгезию имеет покрытие из сплава CastoJet, поэтому он был выбран для восстановления шеек импеллера. Пористость износостойких покрытий значительно меньше 1 %, что говорит об оптимальности выбранных режимов напыления. Твердость полученного детонационным напылением бронзового покрытия БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5 существенно выше, чем у полученных металлургическим путем бронз БрАЖН 10-4-4 и БрАЖМц 10-3-1,5 (см. табл. 1). Заметим, что значения твердости материалов по Бринеллю и по Виккерсу практически совпадают, если эти значения меньше 3450 МПа. Пористость бронзового

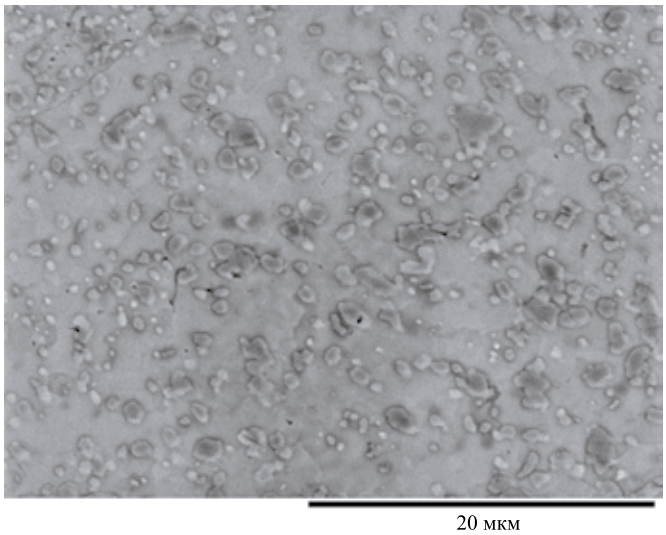


Рис. 1. Микроструктура покрытия из баббита

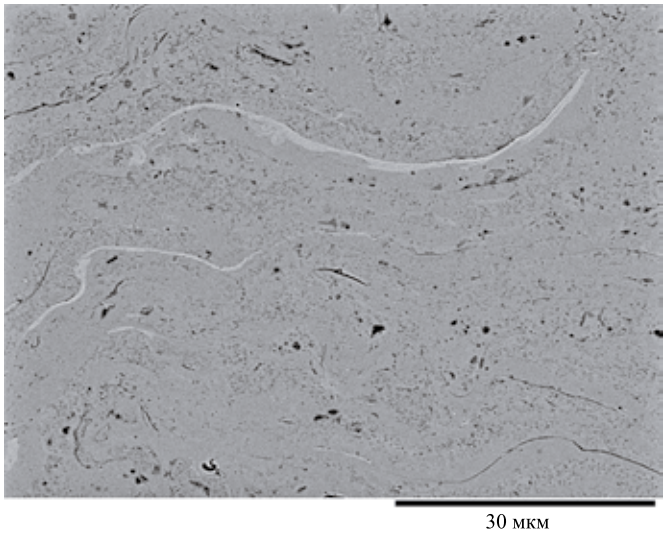


Рис. 2. Микроструктура покрытия из сплава CastoJet 55396C

Рис. 3. Трибоузел: импеллер и ответные втулки. Стрелками указаны изношенные поверхности, которые необходимо восстанавливать

Рис. 4. Втулки с напыленным слоем баббита

Рис. 5. Импеллер с шейками, восстановленными напылением сплава CastoJet 55396C

Рис. 6. Втулка с напыленным слоем бронзы

покрытия не превышает 1 %. У покрытия из баббита твердость такая же, как и у полученного металлургическим путем (см. табл. 1, 2). На рис. 1, 2 для иллюстрации показана микроструктура покрытий из баббита Б83 и сплава CastoJet 55396C.

В парах трения типа вал — втулка в качестве антифрикционного материала часто применяется баббит. Трущиеся поверхности при эксплуатации изнашиваются, и возникает проблема их восстановления. На рис. 3 показан ведущий вал (импеллер) и ответные втулки компрессора F200 SU, который перекачивает фреон и применяется в рефрижераторах. После подбора оптимальных технологических режимов на шейки валов (ведущего и ведомого) напыляли сплав CastoJet 55396C, втулки были восстановлены детонационным напылением баббита Б83 (рис. 4, 5). Для сравнения эксплуатационных свойств втулки восстанавливали также напылением алюминиевой бронзы БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5 (рис. 6). В результате проведенных работ была восстановлена партия трибоузлов для компрессоров F200 SU и F2016c-51, детали отправлены заказчику и в настоящее время находятся в эксплуатации.

Заключение

Проведенные исследования показали возможность применения технологии детонационного напыления для восстановления трибоузлов машин и механизмов. Получаемые на установке CCDS2000 антифрикционные покрытия из баббита Б83 и бронзы БрАЖНМц 8.5-4-5-1.5, а также износостойкие покрытия из сплава CastoJet 55396C, 20Х13Н2 и ЧН15Д7 обладают высокими прочностными свойствами и низкой пористостью. Технология опробована при восстановлении компрессоров F200 SU и F2016c-51, применяемых, в частности, в судовых рефрижераторах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Конструкционные** материалы: справочник / Б.Н. Арзамасов, В.А. Брострем, Н.А. Буше и др.; под общ. ред. Б.Н. Арзамасова. М.: Машиностроение, 1990. 688 с.

2. **Илюшенко В.М., Лукьянченко Е.П.** Сварка и наплавка меди и медных сплавов. Киев, Международная ассоциация "Сварка", 2013. 396 с.

3. **Использование** взрывных технологий для производства подшипников скольжения дизельных двигателей / А.А. Штерцер, Б.С. Злобин, В.Ю. Ульяницкий, С.Б. Злобин // Известия Самарского научного центра РАН. 2011. Т. 13. № 4 (4). С. 1056—1060.

4. **Microstructure** and Properties of Thermally Sprayed Al—Sn based Alloys for Plain Bearing Applications / T. Marrocco, L.C. Driver, S.L. Harris, D.G. McCartney // Proceed. of the Intern. Thermal Spray Conf. (ITSC-2006), May 15—18, 2006. Seattle, Washington, USA. Presentation No. s7_4-11929.

5. **M. Jalali Azizpour, S. Norouzi, H. Mohammadi Majd.** Babbitt Casting and Babbitt Spraying Processes // World Academy of Science. Engineering and Technology. 2011. Vol. 5 (8). P. 816—818.

6. **Материалы** в машиностроении. Выбор и применение. Т. 1. Цветные металлы и сплавы / Колл. авт.; под ред. Л.П. Лужникова. М.: Машиностроение, 1967. 304 с.

7. *www.castolin.com*

8. **Восстановление** деталей электроцентробежного насоса детонационным напылением / С.Б. Злобин, И.С. Батраев, В.Ю. Ульяницкий, А.А. Штерцер // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 5. С. 20—24.

9. **Computer-Controlled** Detonation Spraying: From Process Fundamentals Toward Advanced Applications / V. Ulianitsky, A. Shtertser, S. Zlobin and I. Smurov // Journal of Thermal Spray Technology. Vol. 20. Iss. 4 (2011). P. 791—801.

10. **Штерцер А.А., Ульяницкий В.Ю., Гринберг Б.Е.** Износостойкость металлических, твердосплавных и алюмооксидных покрытий, полученных детонационным напылением // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 3. С. 39—43.

УДК 669

А.А. Веселовский
(Исследовательский центр АО "КОНАР", г. Челябинск)
E-mail: a_a_ves@mail.ru

Управление толщиной термодиффузионных ванадиевых, хромовых и марганцевых покрытий на высокопрочном чугуне регулировкой внешних параметров нсыщения

Приведены эмпирические формулы, выведенные расчетным путем с использованием экспериментальных данных, позволяющие спрогнозировать толщину (структуру) сформированных диффузионных слоев на высокопрочном чугуне ВЧ60 в зависимости от температуры и времени процесса насыщения.
Ключевые слова: *покрытия, чугун, диффузия.*

The paper presents the empirical formulas derived by calculation using experimental data, allowing sprognozi-ment thickness (structure) formed by diffusion layers on ductile iron ВЧ 60 depending on the temperature and time of the saturation process
Keywords: *cover, cast iron, diffusion.*

Введение

В доктрине продовольственной безопасности Российской Федерации, утвержденной 30 января 2010 г. Президентом РФ, указано на необходимость устойчивого развития отечественного производства продовольствия и сырья для обеспечения продовольственной независимости нашей страны. Государственная программа сырья и продовольствия на 2008—2016 гг. предусматривает инновационное развитие отрасли, ускоренный переход к использованию современных технологий. Однако объемы поставок сельхозтехники и энергообеспеченность сельскохозяйственных организаций явно недостаточны [1]. Остаются низкими показатели надежности отечественной сельскохозяйственной техники в условиях эксплуатации. Сроки фактической эксплуатации машин и оборудования превышают нормативные в 2—3 раза. Затраты на ремонт техники в настоящее время составляют почти 60 млрд руб. в год, или 10 % от всей выручки за произведенную продукцию [2]. Отсутствие целого ряда позиций техники конкурентоспособного отечественного производства вынуждает наиболее крупные и эффективные хозяйства покупать зарубежную технику — более дорогую, с лучшими эргономическими характеристиками. Однако для импортных машин в современных условиях остро стоит проблема технического сервиса. Практически на все типы сложных машин из-за отсутствия рабочей конструкторской документации отсутствуют технологии ремонта, высоки затраты на запасные части. Повысить эффективность технического сервиса отечественных и импортных сельскохозяйственных машин и снизить эксплуатационные затраты можно путем организации восстановления деталей [3].

Перспективным способом восстановления и упрочнения почворежущих инструментов является механизированное диффузионное намораживание износостойкими материалами [4, 5]. Технология позволяет свести к минимуму затраты на наплавочные работы и увеличить долговечность деталей в 2—4 раза. Способ предполагает автоматизацию процесса диффузионного намораживания путем создания на базе установки для механизированного диффузионного намораживания робототехнического комплекса [6, 7].

Применение для восстановления деталей композиционных составов базируется на разъяснениях современной физики металлов, причин их пластичности, прочности и долговечности. Композиционные материалы с металлической, более мягкой матрицей позволяют решить проблему прочности (хрупкости) композиционного покрытия [8]. Однако существующие способы восстановления изношенных деталей сель-

скохозяйственных машин являются очень дорогими, трудоемкими и требуют специального технологического оборудования [9].

В условиях ремонтного производства выгодно применять метод нанесения износостойких покрытий из порошковых материалов путем совместного нагрева реакционной смеси вместе с упрочняемыми деталями в герметичном контейнере или использования специальных паст и обмазок, содержащих насыщающий элемент, для упрочнения крупногабаритных деталей или их отдельных частей.

В связи с простотой технологии, отсутствием потребности в специальном технологическом оборудовании и возможностью повторного восстановления изношенного слоя данный метод может быть успешно реализован в любых производственных условиях.

Оборудование, материалы и методика проведения экспериментов

Для термодиффузионного упрочнения серого и высокопрочного чугуна из порошковой среды взяли следующие компоненты:

феррованадий марки ФВд50У03 с содержанием ванадия не менее 50 % мас. (ГОСТ 27130—94);

ферромарганец марки ФМн88 с содержанием марганца в среднем 88 % мас. (ГОСТ 4755—91);

феррохром высокоуглеродистый ФХ800 или ФХ900 (ГОСТ 4757—91) с содержанием хрома более 65 %, углерода 8...9 %, кремния не более 2 %;

оксид алюминия марки ч.д.а.;

хлористый аммоний (ГОСТ 2210—73).

Ферросплавы приведенных марок широко применяются в металлургической промышленности для легирования выплавляемых сталей и чугуна.

Хлористый аммоний, используемый в качестве активатора, в отличие от других ферросплавов имеет низкую температуру термической диссоциации (350 °С). В результате образуется аммиак и хлороводород:

$$NH_4Cl = NH_3 + HCl.$$

Хлороводород вступает в реакцию с ферросплавами с образованием летучих галогенидов.

Ферросплавы, предварительно раздробленные и размолотые в порошок, просеивали через сито с размером ячейки 1 мм. Перед использованием исходные компоненты просушивали и прокаливали.

Реакционная смесь для диффузионного насыщения имела следующий состав: 60 % мас. — ферросплавы, 4 % — хлористый аммоний, остальное — оксид алюминия.

Для создания упрочненного слоя на чугунных деталях типа тел вращения была разработана и запатентована установка [10] для термодиффузионного насыщения, представленная на рис. 1.

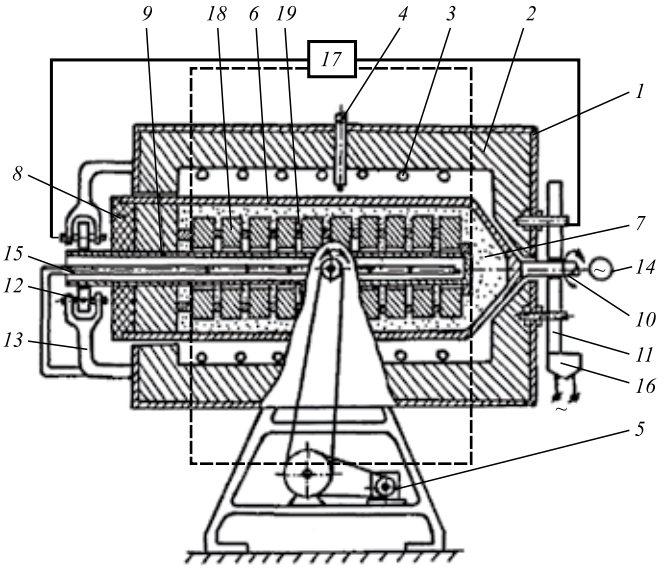


Рис. 1. Установка для термодиффузионного насыщения:
1 — камера нагрева; *2* — цилиндрический муфель; *3* — электронагреватель; *4* — датчик температуры; *5* — механизм поворота; *6* — реторта; *7* — реакционная смесь; *8* — задняя крышка; *9* — глуходонная гильза; *10* — вал реторты; *11* — передний каток; *12* — задний каток; *13* — электроизолятор; *14* — электропривод; *15* — датчик температуры; *16* — вибратор; *17* — крышка реторты; *18* — деталь; *19* — промежуточная вставка

Упаковку реторты проводили следующим образом: на дно засыпали слой рабочей шихты толщиной 10...15 мм, разравнивали, затем проводили укладку деталей. При этом расстояние от укладываемых деталей до стенок реторты не должно было быть меньше 10 мм. Расстояние между колесами обеспечивается промежуточными вставками в виде втулок, установленных на глуходонную гильзу, и составляет 8...10 мм. Верхний слой рабочей смеси должен быть не менее 20 мм. На этот слой устанавливается крышка, изготовленная из того же материала, что и реторта. Диаметр крышки меньше внутреннего диаметра реторты на 5...7 мм. В желоб, образованный стенками контейнера и крышкой, укладывали асбест, поверх него размещали смесь жидкого стекла.

Упакованную таким образом реторту помещали в камеру печи ровно, без уклонов и нагревали. По достижении температуры разложения хлористого аммония (350...400 °С) проводили изотермическую выдержку в течение 20...30 мин, после которой разогрев реторты до рабочей температуры (1050 °С) должен был проводиться с максимальной для данной печи скоростью. Время выдержки исчисляли с момента выхода печи на режим, установленный технологическим процессом. Оно составляло 5 ч для всех видов покрытий.

После окончания процесса печь выключали, ретор-

ту охлаждали вместе с печью на воздухе до 20...50 °С, затем распаковывали, проводили очистку деталей.

Результаты исследований

Для получения формул, позволяющих управлять толщиной термодиффузионных ванадиевых, хромовых и марганцевых покрытий на исследуемом чугуне ВЧ60 посредством регулирования температуры и времени насыщения, использовали методику, приведенную в работе [11]. Из интегрального выражения для первого закона диффузии следует, что при росте фазы с постоянной концентрацией при условии постоянства концентраций в начале плоскости толщина слоя δ будет определяться выражением

$$\delta = K\sqrt{D\tau},$$

где K — коэффициент, зависящий от вида и условий насыщения; D — коэффициент диффузии; τ — время насыщения.

С учетом температурной зависимости D имеем

$$\delta^2 = K^2 D_0 \tau \exp\left(-\frac{E}{RT}\right), \qquad (1)$$

где E — энергия активации диффузии; R — газовая постоянная; T — абсолютная температура.

При T = const δ будет зависеть только от времени процесса. Тогда, обозначив $K^2 D_0 \tau \exp\left(-\frac{E}{RT}\right)$ через $2p$, получим

$$\delta^2 = 2p\tau. \qquad (2)$$

Построив графические зависимости $\delta^2 = f(\tau)$, можно определить величину $2p$ как тангенс угла наклона прямых (рис. 2). Результаты вычислений представлены в табл. 1.

Таблица 1

Результаты расчетов 2*p*

Диффундирующий элемент	Температура		$\frac{1}{T}\cdot 10^{-3}$	Результаты расчетов	
	°С	К		$2p\cdot 10^{-4}$	$\ln 2p$
Ванадий	960 1050	1233 1323	0,811 0,756	2,90 4,86	–8,14 –7,63
Хром	960 1050	1233 1323	0,811 0,756	1,02 2,51	–9,19 –8,29
Марганец	960 1050	1233 1323	0,811 0,756	0,94 2,46	–9,32 –8,33

После логарифмирования получим

$$\ln 2p = \ln K^2 D_0 - \frac{E}{RT}. \qquad (3)$$

При $T = \infty$ величина $1/T = 0$, тогда (3) принимает вид

$$\ln 2p = \ln K^2 D_0. \qquad (4)$$

Для определения $\ln K^2 D_0$ строится график $\ln 2p = f\left(\frac{1}{T}\right)$ (рис. 3).

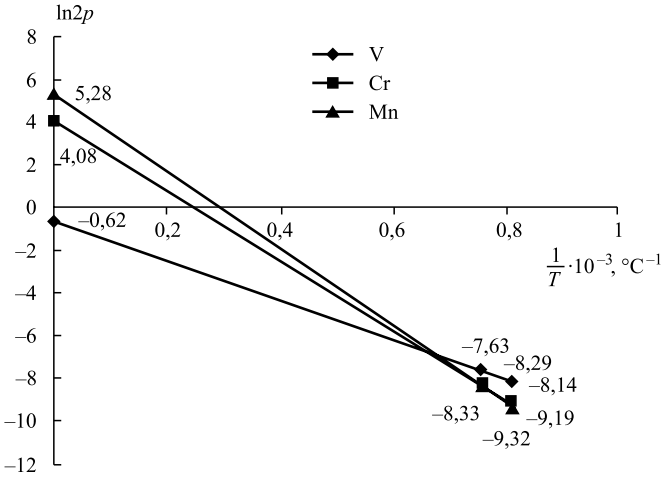


Рис. 3. Зависимость $\ln 2p = f(1/T)$

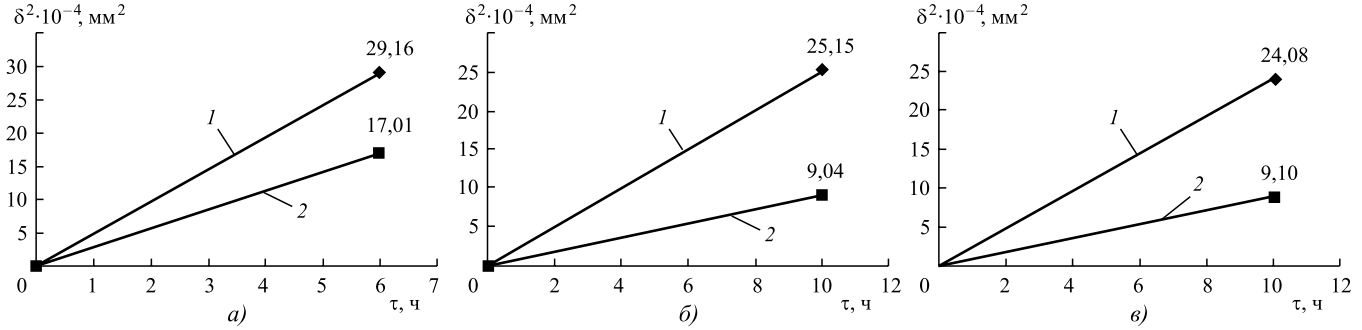


Рис. 2. Зависимость δ^2 от τ для процессов насыщения чугуна ВЧ60:
а — ванадием; *б* — хромом; *в* — марганцем; *1* — 1050 °С; *2* — 960 °С

Таблица 2

Результаты расчетов tgα и *E*

Насыщающий элемент	Уравнение прямой (см. рис. 3)	$\ln K^2 D_0$ (точка пересечения с осью $\ln 2p$)	tgα	*E*, Дж/моль
Ванадий	$y = -9{,}27 \cdot 10^3 x - 0{,}62$	–0,62	9274,23	77106
Хром	$y = -16{,}36 \cdot 10^3 x + 4{,}08$	4,08	16365,5	136059
Марганец	$y = -18 \cdot 10^3 x + 5{,}28$	5,28	18006,1	149702

Для точного определения точек пересечения построенных прямых с осью $\ln 2p$ составляются уравнения прямой, проходящей через две точки с известными координатами,

$$\frac{x - x_1}{x_2 - x_1} = \frac{y - y_1}{y - y_2}. \quad (5)$$

Значения $\ln 2p$ определяются по координатам точки пересечения прямой (уравнение которой определено) с осью $\ln 2p$.

Из уравнения (3) следует выражение

$$\ln K^2 D_0 - \ln 2p = \frac{E}{RT}. \quad (6)$$

Из построенного графика $\ln 2p = f\left(\frac{1}{T}\right)$ следует, что

$$\mathrm{tg}\alpha = \frac{E/(RT)}{1/T} = \frac{E}{R}.$$

Тогда

$$E = R\mathrm{tg}\alpha. \quad (7)$$

Подставляя (7) в (6), получим

$$\mathrm{tg}\alpha = (\ln K^2 D_0 - \ln 2p)T. \quad (8)$$

Найденные значения $\ln K^2 D_0$ и $\ln 2p$ подставляем в (8) для соответствующих температур и находим значения tgα и *E* (табл. 2).

Вычисленные значения энергии активации диффузии *E* позволили получить эмпирическую формулу для определения толщины диффузионного слоя δ в зависимости от температуры *T* и времени диффузионного насыщения τ

$$\delta = K\sqrt{D_0}\exp\left(-\frac{E}{2RT}\right)\sqrt{\tau}. \quad (9)$$

Для определения неизвестных значений *K*α в формулу (9) подставляют экспериментальные значения δ при соответствующих параметрах *T* и τ:

$\delta = 11{,}45\sqrt{\tau}\exp\left(\frac{-4637{,}1}{T}\right)$ — для ванадиевого покрытия;

$\delta = 122{,}57\sqrt{\tau}\exp\left(\frac{-8182{,}52}{T}\right)$ — для хромовых покрытий;

$\delta = 218{,}85\sqrt{\tau}\exp\left(\frac{-9003}{T}\right)$ — для марганцевых покрытий.

Вывод

Полученные эмпирические закономерности позволяют спрогнозировать толщину создаваемых ванадиевых, хромовых и марганцевых покрытий на высокопрочном чугуне ВЧ60 регулировкой температуры и времени насыщения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Юдников А.С., Рыжих Ю.Л.** Эффективное упрочнение деталей почвообрабатывающей техники — актуальная проблема в сельском хозяйстве // Труды ГОСНИТИ. Т. 102. 2010.

2. **Коломейченко А.В.** Технологии повышения долговечности деталей машин восстановлением и упрочнением рабочих поверхностей комбинированными методами: Автореф. ... д-ра техн. наук: 05.20.03. М., 2011. 32 с.

3. **Мирталипов Р.Ш.** Перспективы применения антифрикционных покрытий при восстановлении деталей сельскохозяйственных машин. М.: Информагротех, 1991. 32 с.

4. **А. с. 1227322 СССР**, МКИ 3 B22 D11/14, 19/10. Многопозиционная установка роторного типа для автоматической наплавки методом намораживания погружением в расплав / Бетеня Г.Ф., Анискович Г.И., Лобузов И.П. № 3787394/22; Заявл. 14.0684; Опубл. 30.04.86, Бюл. № 16 // Открытия. 1986. № 16. С. 61.

5. **Разработка** и исследование технологии механизированной наплавки намораживанием лап машин для внесения в почву жидких комплексных удобрений: Отчет о НИР / Белорусский институт механизации сельского хозяйства; Руководитель темы Г.Ф. Бетеня, отв. исполнитель Г.И. Анискович. Минск. 1984. 64 с.

6. **Бетеня Г.Ф., Анискович Г.И.** Робототехнический комплекс для наплавки деталей методом намораживания // Восстановление и упрочнение деталей сельскохозяйственных машин: Сб. научн. трудов. Горки, БСХА, 1989. С. 11—15.

7. **Бетеня Г.Ф., Анискович Г.И., Терешкович В.Г.** Опыт внедрения и перспективы использования наплавки намораживанием при восстановлении и упрочнении деталей машин // Проблемы механизации, электрификации, автоматизации сельского хозяйства и подготовки инженерных кадров: Тез. докл. науч. конф. Минск, 16—19 апреля 1991 г. / Белорусский институт механизации сельского хозяйства, Минск, 1991. С. 156—157.

8. **Дорожкин Н.Н.** Упрочнение и восстановление деталей машин металлическими порошками. Минск: Наука и техника, 1975.

9. **Черновол М.И.** Технологические основы восстановления деталей сельскохозяйственной техники композиционными покрытиями: Дис. ... д-ра техн. наук. М., МИИСП. 1992. 257 с.

10. **Веселовский А.А., Завалищин А.Н.** Новая установка для термодиффузионного упрочнения изделий типа колец // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 8. С. 16—19.

11. **Гусейнов А.Г.** Повышение работоспособности деталей машин и аппаратуры путем восстановления и упрочнения диффузионной металлизацией: Дис. ... д-ра техн. наук. М., 2002.

УДК 621.793

[1] В.Н. Гадалов, [1] И.В. Ворначева, [2] С.В. Ковалев, [3] Г.М. Журавлев, [1] Т.Н. Розина

([1] Юго-Западный государственный университет, г. Курск,
[2]Курская государственная сельскохозяйственная академия,
[3] Тульский государственный университет)
E-mail: gadalov_vn@yandex.ru

Электролитические боридные покрытия с добавками оксидов Cr_2O_3, ZrO_2 и Ta_2O_5

Представлены результаты исследований окалиностойкости сталей, упрочненных боридными покрытиями комплексного состава, полученными при совместном насыщении стали бором и такими элементами, как хром, цирконий, тантал.

Ключевые слова: *боридные покрытия, диффузионные слои, сталь, реверсированный ток.*

The research results of resistance to scaling steel reinforced complex boride coating composition obtained by the joint become saturated with boron and elements such as chromium, zirconium, tantalum are presented.

Keywords: *boride coatings, diffusion layers, steel, reverse current.*

Представлены результаты исследований окалиностойкости сталей, упрочненных боридными покрытиями комплексного состава, полученными при совместном насыщении стали бором и такими элементами, как хром, цирконий, тантал.

При окислении боридов [1] кроме окислов соответствующих металлов образуется борный ангидрид, который может частично испаряться из-за высокой летучести, а частично идти на образование боратов [2]. Улетучивание борного ангидрида делает оценку окалиностойкости диффузионных слоев гравитационным методом несколько искаженной. В связи с этим ряд авторов, например [3, 4], заменяют массовую характеристику толщиной окисного слоя, образуемого в процессе испытаний. В настоящей работе окалиностойкость диффузионных слоев оценивали по увеличению привеса образцов и результатам металлографического анализа.

Диффузионные покрытия на стали 45 получали из расплавов буры с добавлением оксидов Cr_2O_3, ZrO_2 и Ta_2O_5 электролизным методом [1, 4]. Содержание оксидов составляло 5...8 % от общей массы расплава. Диффузионные слои на поверхности стали создавали отдельно постоянным и реверсированным токами. Плотность постоянного тока устанавливали равной 2000...4000 А/м^2, параметры реверсированного тока выбирали таким образом, чтобы обеспечить наиболее интенсивное насыщение испытываемых образцов требуемыми элементами. Плотность тока в прямом направлении, т. е. в катодный полупериод, составляла 4000 А/м^2, а в обратном — в анодный полупериод — 2000 А/м^2. Длительность катодного полупериода равнялась 0,4...0,42 с. Температуру диффузионного насыщения во всех экспериментах задавали равной 1173 К. Продолжительность диффузионного насыщения составляла от 2 до 4 ч. Толщина диффузионного слоя в среднем составляла 140...150 мкм.

Диффузионные слои на стали 45 подвергали испытаниям на окалиностойкость (жаростойкость) в атмосфере воздуха. Оценку окалиностойкости проводили по изменению массы образца и результатам металлогра-

фического анализа. Металлографические исследования являлись подкрепляющей оценкой гравиметрического метода, так как учитывалась возможность улетучивания борного ангидрида в процессе окисления поверхностных слоев образца. Длительность испытаний образцов на окалиностойкость составляла от 10 до 60 ч. Изменение массы (привеса) образцов в зависимости от температуры в течение 10 ч приведено в табл. 1. Изменение глубины коррозии диффузионных слоев представлено в табл. 2.

Сравнение табличных данных показывает, что диффузионные слои, полученные с применением реверсированного тока, обнаруживают более высокую устойчивость к окислению кислородом воздуха. Независимо от вида тока более высокую устойчивость к окислению показывают борохромированные слои, затем бороцирконированные, им уступают боридные и, наконец, последнее место занимают танталоборированные слои. Установлено, что заметное ускорение окисления всех диффузионных слоев начинается при температуре 1023 К, это отчетливо видно на графических зависимостях (рис. 1, 2). Меньшие значения изменения привеса и глубины коррозии слоев, полученные при воздействии реверсированного тока, объясняются уменьшением внутренних напряжений и меньшим количеством

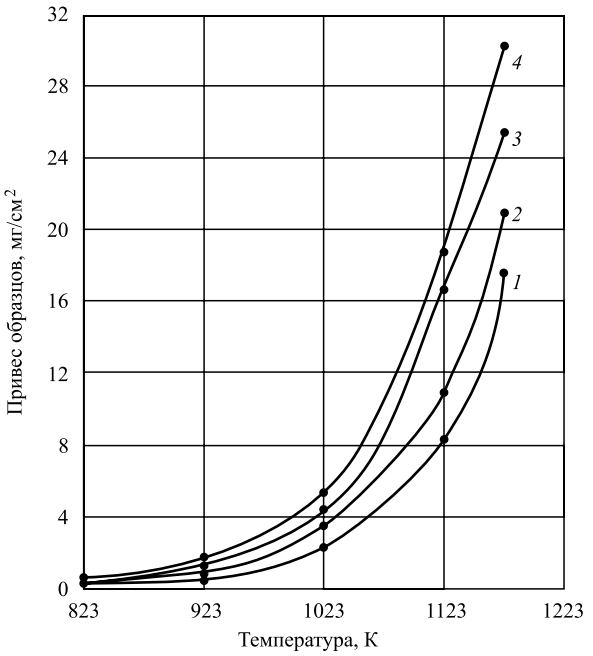


Рис. 1. Зависимость привеса образцов Δ*m* от температуры (насыщение реверсированным током):
1 — борохромирование; *2* — бороцирконирование; *3* — борирование; *4* — танталоборирование

Таблица 1

Изменение массы образцов, мг/см², в зависимости от температуры

Способ электролизного насыщения	Вид слоя	Температура, К				
		823	923	1023	1123	1173
На постоянном токе	Боридный	0,48	1,23	5,08	19,44	30,8
	Борохромированный	0,31	0,60	2,41	11,01	19,5
	Бороцирконированный	0,42	1,06	4,92	18,47	28,68
	Танталоборированный	0,52	1,21	5,32	20,33	34,77
На реверсированном токе	Боридный	0,41	0,99	4,12	16,73	25,6
	Борохромированный	0,30	0,52	2,32	8,33	17,46
	Бороцирконированный	0,31	0,87	3,91	10,9	21,80
	Танталоборированный	0,44	1,16	5,11	18,62	30,26

Таблица 2

Изменение глубины коррозии, мкм, в зависимости от температуры

Способ электролизного насыщения	Вид слоя	Температура, К				
		823	923	1023	1123	1173
На постоянном токе	Боридный	1	2	18	70	130
	Борохромированный	0	2	12	43	80
	Бороцирконированный	1	2	15	62	120
	Танталоборированный	2	5	20	78	135
На реверсированном токе	Боридный	1	2	17	66	120
	Борохромированный	0	1	10	44	70
	Бороцирконированный	1	2	12	57	115
	Танталоборированный	1	3	16	70	125

Таблица 3

Увеличение массы, мг/см², образцов при температуре 1023 К во времени

Способ электролизного насыщения	Вид слоя	Время, ч				
		10	20	30	40	50
На постоянном токе	Боридный	5,08	6,30	7,20	8,00	9,11
	Борохромированный	2,41	3,31	3,92	4,35	4,62
	Бороцирконированный	4,82	5,99	6,87	7,59	8,04
	Танталоборированный	5,32	6,84	7,86	8,25	9,80
На реверсированном токе	Боридный	3,91	5,03	5,87	6,41	7,02
	Борохромированный	2,32	3,00	3,38	3,70	4,03
	Бороцирконированный	4,12	5,48	5,83	6,41	7,80
	Танталоборированный	5,11	6,35	7,21	8,07	9,20

микротрещин. Кроме того, высказано предположение о наличии большей плотности дислокаций в слоях, полученных при постоянном токе.

Это приводит к увеличению коэффициента диффузии элементов при рассасывании боридного слоя во время его окисления при повышенной температуре. В результате такого процесса имеет место понижение жаростойкости боридного покрытия.

Динамика окисления диффузионных слоев во времени при температуре 1023 К представлена в табл. 3. Видно, что окисление образцов с течением времени постепенно замедляется и далее протекает с почти постоянной скоростью. Это объясняется тем обстоятельством, что со временем элементы из слоя диффундируют в глубь металла, образуя на основе железа фазы, легированные соответствующим элементом. Эти фазы уже отличаются по составу от первоначальной структуры диффузионных сплавов.

В процессе окисления борохромированных слоев

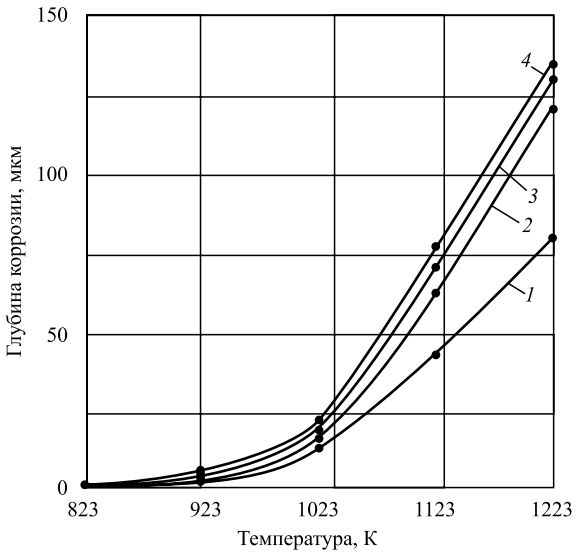


Рис. 2. Зависимость глубины коррозии от температуры (насыщение постоянным током):
1 — борохромирование; *2* — бороцирконирование; *3* — борирование; *4* — танталоборирование

в результате диффузионных перемещений элементов под слоем образуется твердый раствор углерода в железе, обогащенный хромом. Микротвердость данной зоны несколько выше твердости основного металла и составляет 3400...4800 МН/м².

С течением времени у бороцирконированных образцов в процессе окисления под слоем образуются соединение $ZrFe_2$ и твердый раствор циркония в α-железе, что подтверждается химическим анализом. При измерении микротвердости очищенной от оксидов поверхности образцов после испытаний их на окалиностойкость получены значения 4900...6900 МН/м², т. е. отличные от микротвердости основного металла и первоначального диффузионного слоя.

Сходная картина наблюдается у образцов, подвергнутых танталоборированию. В процессе окисления диффузионных слоев под ними образуются соединение $TaFe_2$ и твердый раствор тантала в α-железе в достаточно узкой зоне (10...15 мкм). Твердость данной зоны составляла 4500...6700 МН/м².

Полученные данные не противоречат исследованиям и экспериментальным данным, представленным в публикациях [5, 6].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Диффузионные** боридные покрытия на железе, сталях и сплавах / В.Н. Гадалов, А.С. Борсяков, В.Г. Сальников и др. // М.: Курс. 2012. 146 с.

2. **Самсонов Г.В., Портной К.И.** Сплавы на основе тугоплавких соединений. М.: Оборонгиз, 1961. 148 с.

3. **Бор** / Г.А. Меерсон, Г.В. Самсонов, Р.Б. Котельников и др. // Труды конференции по химии бора и его соединений / М., ГХИМ. 1958. С. 56—68.

4. **Самсонов Г.В.** Тугоплавкие соединения: справочник по свойствам и применению. М.: Металлургия, 1963. 398 с.

5. **Афанасьев А.А.** Повышение качества поверхностей деталей машин. Белгород: Изд-во БГТУ им. В.Г. Шухова, 2007. 235 с.

6. **Окалиностойкость** диффузионных боридных слоев комплексного состава на сталях / А.А. Афанасьев, В.Н. Гадалов, Т.Н. Розина и др. // Известия ЮЗГУ. 2013. № 3. С. 16—20.

УДК 621.785.53

А.В. Оборин, В.В. Богданов, И.А. Оборин
(ООО "Ионные технологии", г. Пермь)
E-mail: ion@procion.ru

Ионное азотирование ответственных деталей судового машиностроения в ОАО "Калужский турбинный завод"

Рассматривается создание участка ионного азотирования в ОАО "Калужский турбинный завод". Представлены результаты металлографических исследований технологий азотирования стали 38Х3М1Ф1А и ее химический состав. Выявлены преимущества ионно-плазменного азотирования перед другими способами упрочнения.

Ключевые слова: *химико-термическая обработка, азотирование, ионное азотирование, ионно-плазменное азотирование, тлеющий разряд, оборудование для азотирования, сталь 38Х3М1Ф1А, зубчатые колеса, судовое машиностроение.*

This article describes how to create site ion nitriding at JSC "Kaluga Turbine Works". Presented in comparison metallographic examination of nitriding steel 38Cr3Mo1V1A technology and its chemical composition. The advantages of ion nitriding over other methods of hardening are determined.

Keywords: *chemical-thermal treatment, nitriding, ion nitriding, ion-plasma nitriding, glow discharge, nitriding equipment, 38Cr3Mo1V1A steel, gears, marine engineering.*

Создание современных технологий на оборонных промышленных предприятиях является одной из главных задач, в частности, в ОАО "Калужский турбинный завод" (ОАО "КТЗ"), специализирующемся на производстве паровых турбин и турбогенераторов.

К зубчатым колесам предъявляются высокие требования по точности изготовления, плавности работы и характеристикам упрочнения (глубине и твердости слоя). Было необходимо выбрать такую технологию химико-термической обработки, после которой будет минимальной деформация деталей с высокими эксплуатационными свойствами поверхностного слоя. Для решения данной задачи хорошо подходит технология азотирования, так как давно известно, что процесс насыщения стали азотом протекает в широком интервале температур (400...600 °С). Такое технологическое преимущество дает возможность упрочнять детали, изготовленные в окончательный, конструкторский размер, без значительных геометрических изменений и последующей дополнительной механической обработки.

Для производства ответственных деталей планетарных редукторов главной ступени турбины используется безникелевая высокопрочная сталь 38Х3М1Ф1А. Одна из причин разработки этой стали — необходимость обеспечения прокаливаемости заготовки для улучшения комплексных свойств по всему ее сечению и получение азотированного слоя глубинной $h \geqslant 0{,}6$ мм при поверхностной твердости свыше 700 HV. Уменьшение процентного содержания никеля в стали способствовало росту производительности процесса азотирования, так как никель не образует нитридов и препятствует диффузии азота в стали. Главными нитридообразующими элементами являются хром, молибден, ванадий.

Интенсификация процесса напрямую зависит от применяемой технологии азотирования. Так, метод ионно-плазменного азотирования сокращает время изотермической выдержки по сравнению с традиционным методом печного азотирования в 2...4 раза для получения одинаковых глубин азотированного слоя. Необходимо отметить, что данное утверждение является верным при получении азотированного слоя не более 0,5 мм, затем наблюдается обратная экспоненциальная зависимость глубины азотированного слоя от времени изотермической выдержки. Это же происходит и при азотировании коррозионно-стойких сталей. При ионном азотировании депассивация поверхности высоколегированных коррозионно-стойких сталей не требуется.

Ионное азотирование — это химико-термическая обработка изделий, деталей и инструмента в азотсодержащей газовой среде под воздействием тлеющего электрического разряда между катодом (деталями) и анодом (стенками вакуумной камеры) в диапазоне температур 400...600 °С. При бомбардировке детали ионами рабочего газа происходит диффузионное насыщение поверхностного слоя деталей азотом, в результате соединений азота с основными легирующими элементами материала образуются их нитриды.

В ОАО "КТЗ" (Энергомашиностроительный концерн "Силовые машины") построен участок ионной химико-термической обработки. Участок оснащен

Рис. 1. Установка ИОН-200И-2 с двумя камерами колпакового типа

установкой ионного азотирования ИОН-200И-2 фирмы IONITECH (г. София, Болгария) мощностью 200 кВт, в состав которой входят две вакуумные камеры колпакового типа (рис. 1):

большая камера с рабочими размерами ∅2650 × × 1400 мм; масса обрабатываемых деталей до 4,5 т;

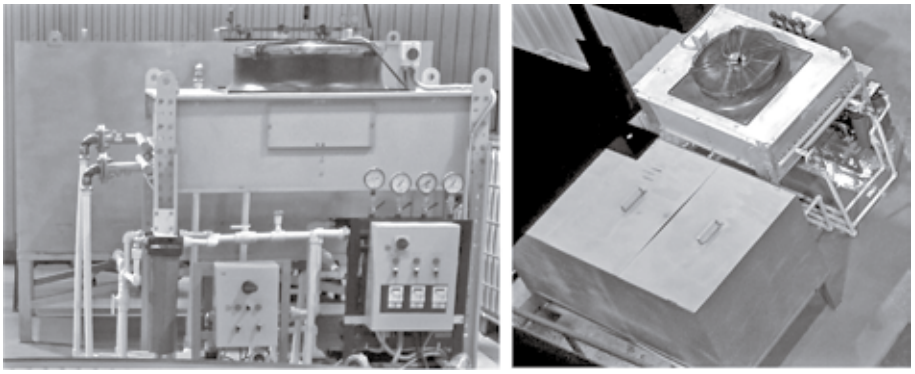
малая камера с рабочими размерами ∅1000 × × 1200 мм; масса обрабатываемых деталей до 1,5 т.

Для поддержания рабочей температуры воды в стенках камер разработана система замкнутого охлаждения (рис. 2), включающая в себя: драйкулер (сухой охладитель), насосную группу и нержавеющий бак.

Для обеспечения камер рабочим газом спроектированы магистраль и перепускная аммиачная рампа.

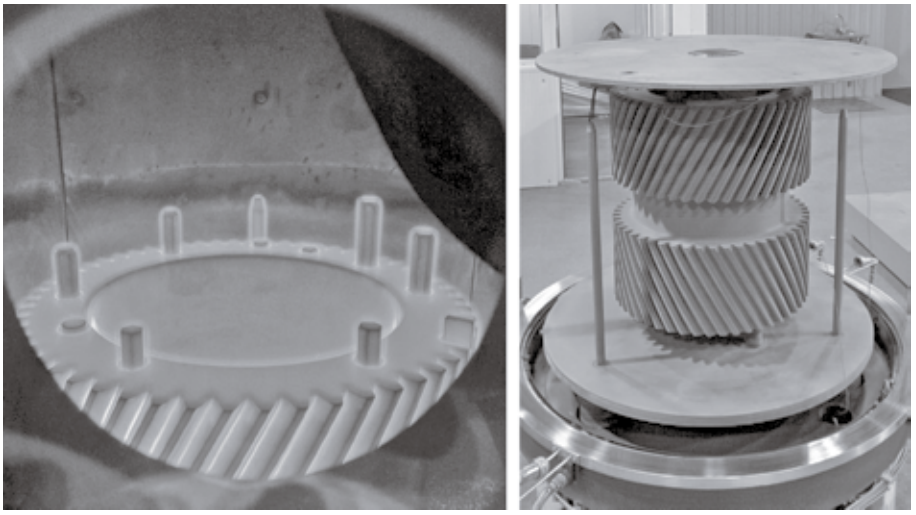
Отработку технологии вели на деталях-представителях: узлах планетарных редукторов диаметром до 2600 мм, 3-й и 4-й степени точности по ГОСТ 1643—81 (рис. 3...6).

Компанией "Ионные технологии" (г. Пермь) были



а) *б)*

Рис. 2. Система охлаждения:
а — вид сбоку; *б* — вид сверху



а) *б)*

Рис. 3. Сателлит:
а — в плазме тлеющего разряда; *б* — после ионного азотирования

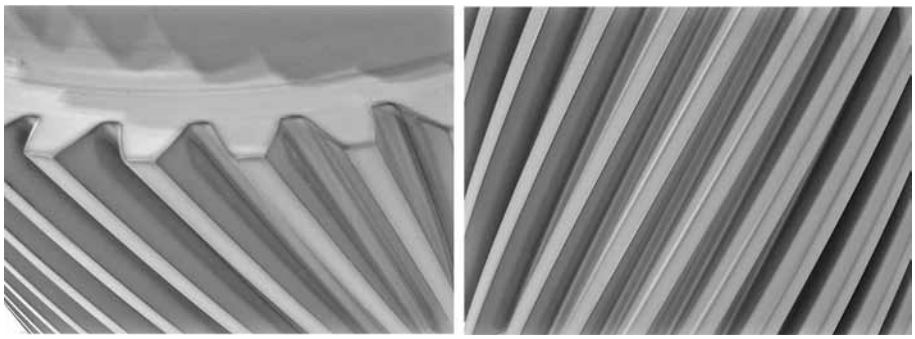
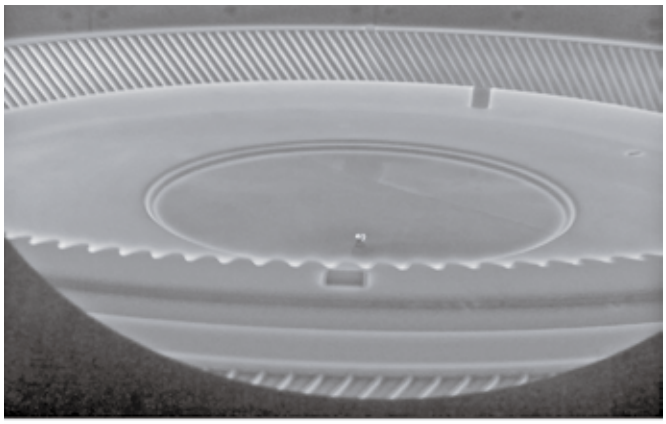
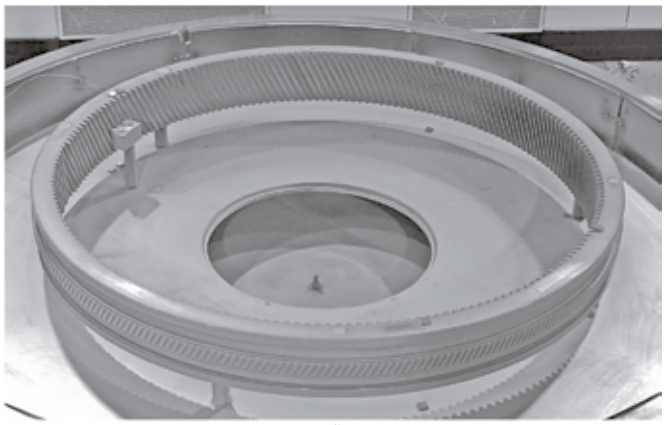


Рис. 4. Зубья сателлита после ионного азотирования под разным ракурсом



а)



б)

Рис. 5. Зубчатый венец:
а — в плазме тлеющего разряда; *б* — после ионного азотирования

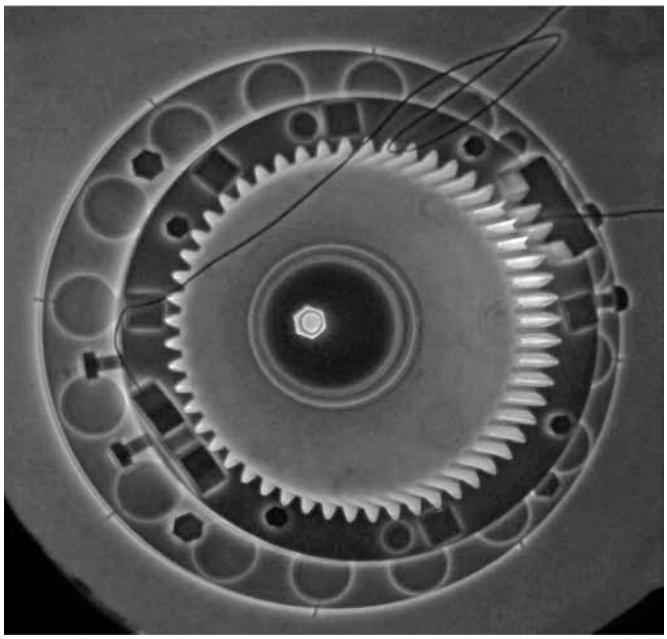


Рис. 6. Зубчатая муфта в плазме тлеющего разряда

проведены металлографические исследования образцов-свидетелей из стали 38Х3М1Ф1А (табл. 1) после печного и ионного азотирования (рис. 7).

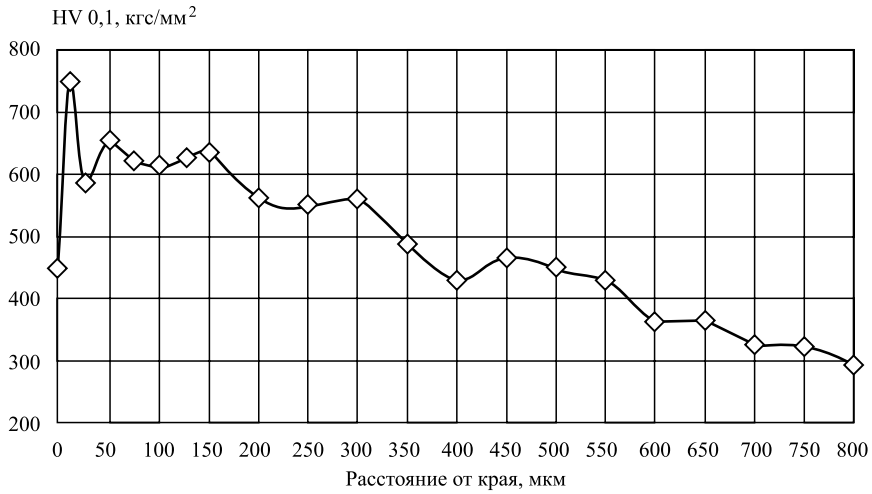
Более точный метод определения глубины азотированного слоя — по распределению микротвердости от поверхности образца до твердости его сердцевины. В ОАО "КТЗ" для ответственных деталей за глубину азотированного слоя принимают глубину слоя с микротвердостью, в 1,3 раза превышающей микротвердость сердцевины.

Таблица 1

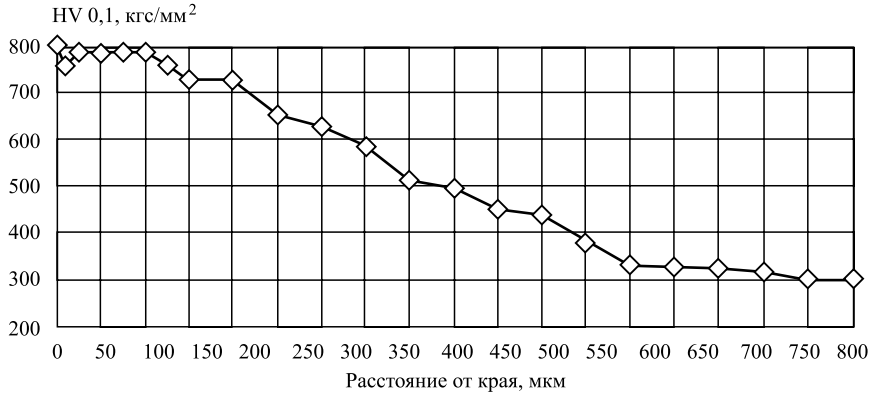
Характеристики упрочненного слоя на исследованных образцах-свидетелях

Характеристика		Азотирование	
		Печное	Ионное
Твердость поверхности, кгс/мм^2	HV 10	715...752	762
	HV 5	713	701...726
	HV 0,1	428...469	788...821
Глубина упрочненного слоя, мм		0,725	0,85

По результатам исследований выяснили, что изотермические выдержки при разных технологиях для получения глубины слоя более 0,6 мм совпадают, однако следует учитывать, что сам цикл обработки по упрочнению деталей сократился в 2 раза за счет охлаждения и безынерционности нового оборудования. Также необходимо отметить тот факт, что график изменения микротвердости по глубине азотированного слоя намного равномернее (твердость плавно убывает от поверхности к сердцевине образца), чем при печном



а)



б)

Рис. 7. Распределение микротвердости по глубине упрочненного слоя образца-свидетеля из стали 38Х3М1Ф1А:

а — после печного (газового) азотирования; *б* — после ионного азотирования

азотировании (диффузия идет волнами, твердость неравномерная, убывает от поверхности к сердцевине образца). Хрупкость слоя по шкале Всероссийского научно-исследовательского института авиационных материалов (ВИАМ) — I балл (не хрупкий). Поверхностная мкиротвердость HV 0,1 при традиционном азотировании низкая, что говорит о дефектах нитридной зоны (порах, микротрещинах), которая является важной составляющей и основополагающей для азотированного слоя в целом.

В связи с тем, что глубина азотированного слоя достигала 0,85...0,9 мм при сохранении высокой поверхностной твердости (750...850 HV) и минимальных деформациях деталей, технологию ионного азотирования можно применять для замены высокотемпературной химико-термической обработки — цементации для зубчатых колес и других тяжелонагруженных деталей машиностроения без дополнительной механической обработки (шлифования).

Химический состав стали 38Х3М1Ф1А был определен методом атомного спектрального анализа (табл. 2).

Азотированию подвергали сегменты поковки безникелевой стали, из которых затем изготовили ударные образцы с V- и U-образными концентраторами напряжений для исследований влияния температуры процесса ионного азотирования на ударную вязкость стали 38Х3М1Ф1А. Результаты исследований показали, что изотермическая выдержка ионного азотирования при температуре 565 °С более трех суток не влияет на значение ударной вязкости.

Сотрудники компании "Ионные технологии" (г. Пермь) сдали участок ионно-плазменного азотирования с оборудованием фирмы IONITECH (г. София, Болгария) "под ключ" и внедрили современную передовую технологию упрочнения в ОАО "КТЗ". Сталь 38Х3М1Ф1А была впервые подвергнута современной технологической операции — ионному азотированию — в промышленных условиях с получением положительных результатов.

Необходимо отметить большой вклад в организацию работ руководства и персонала ОАО "КТЗ", в частности В.М. Щербакова, А.В. Жидкова, А.Г. Дворядкина, Г.В. Зоркиной, С.В. Павельева.

Внедрение технологии ионного азотирования на предприятии позволило реализовать ее основные преимущества в сравнении с существующей технологией традиционного газового азотирования и другими промышленными технологиями химико-термической обработки (цементацией, хромированием и др.):

1) экологическую чистоту, безвредность и безотходность производства;

2) сокращение затрат электроэнергии в 2...5 раз в зависимости от требований к азотированию (0,035...0,05 кВт на 1 кг садки);

3) сокращение расхода рабочего газа в 30...80 раз за 1 рабочий час и в 60...150 раз за весь цикл обра-

Таблица 2

Химический состав, %, стали 38Х3М1Ф1А

C	Si	Mn	Cr	Ni	P	S	Mo	V	Ti	Cu	Al
0,3633	0,2803	0,4531	2,8396	0,1546	0,0082	0,0000	0,6097	0,3268	0,0018	0,0860	0,0029

ботки в зависимости от требований к азотированию (60...160 л/ч);

4) сокращение цикла технологической операции в 2...4 раза в зависимости от требований к азотированию;

5) универсальность оборудования (обработка различных деталей и выполнение шести видов технологических операций на одном оборудовании);

6) автоматизацию — использование оборудования со встроенным индустриальным компьютером и возможность удаленного доступа к нему из локальной сети предприятия;

7) создание различных модификаций диффузионных слоев;

8) безынерционность оборудования (завершение цикла технологической операции не требует дополнительных операций перед началом нового цикла другой технологической операции);

9) исключение дополнительных депассивирующих операций при азотировании высоколегированных сталей;

10) высокое качество азотированного слоя.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ
ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ
СПРАВОЧНИК
Осинцев О.Е., Федоров В.Н.
2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.
ISBN 978-5-9907638-3-8

В справочнике впервые систематизированы и обобщены сведения о физических, механических и технологических свойствах почти всех марок меди и сплавов на ее основе: латуней, бронз, медно-никелевых сплавов, а также специальных медных сплавов: микролегированных, дисперсно-упрочненных, с эффектом памяти и др. Показано влияние легирующих элементов и примесей на свойства сплавов. Изложены сведения о составе и структуре, особенностях термической обработки, даны двойные и многокомпонентные диаграммы состояния, определяющие фазовый состав. Приведены также сведения о свойствах зарубежных аналогов отечественных медных сплавов. 2-е издание (1-е издание 2004 г.) переработано в соответствии с новыми стандартами, а также дополнено сведениями по припоям на основе меди.

Для инженерно-технических работников машиностроительных, металлургических и металлообрабатывающих предприятий, научно-исследовательских и проектно-конструкторских организаций, а также для студентов, аспирантов и преподавателей высших учебных заведений и университетов.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:
по почте: 107076, г. Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2; по e-mail: realiz@mashin.ru.
Дополнительная информация по телефону: (495) 785-60-69 и на сайте www.mashin.ru

УДК 621.315:539.3

С.М. Афонин
(НИУ Московский институт электронной техники)
E-mail: eduems@mail.ru

Гармоническая линеаризация характеристик с гистерезисными петлями многослойных пьезоактюаторов нано- и микроперемещений

Исследованы гистерезисные характеристики многослойных пьезоактюаторов для нано- и микроперемещений с основными и частными циклами. Получена передаточная функция нелинейного звена с гистерезисной характеристикой типа петля в виде основного гистерезисного цикла для деформации многослойного пьезоактюатора. Определены коэффициенты гармонической линеаризации характеристики с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора.

Ключевые слова: *многослойный пьезоактюатор, нано- и микроперемещения, продольный и поперечный пьезоэффекты, деформация, характеристики с гистерезисными петлями, основной и частный циклы, коэффициенты гармонической линеаризации.*

Hysteresis loop characteristics of the multilayered piezoactuators are proposed. Basic and local loops for hysteresis characteristics of the multilayered piezoactuators are proposed. Transfer functions of a nonlinear links with a loop characteristics are found for the multilayered piezoactuators of longitudinal, and cross and shear piezoeffect. Coefficients of harmonious linearization are received for loop characteristics of piezoeffect for calculation of a systems of automatic control of the multilayered piezoactuators for nanometric movement.

Keywords: *multilayered piezoactuator, nano- and microdisplacements, longitudinal and transversal piezoeffects, deformation, hysteresis loop characteristics, basic and local loops, coefficients of harmonious linearization.*

Введение

Пьезоактюаторы нано- и микроперемещений применяются для юстировки зеркал лазерных кольцевых гироскопов, для совмещения и сканирования в электронных, зондовых, атомно-силовых микроскопах [1—7]. В фотонике используются пьезоактюаторы и для нано- и микроперемещений зеркал лазеров при применении оптических методов передачи информации и энергии. Применение пьезоактюаторов перспективно для нано- и микроперемещений в нанотехнологии, нанобиологии, фотонике, энергетике, микроэлектронике и астрономии. Использование многослойного (составного, пакетного, блочного) пьезоактюатора позволяет увеличить диапазон перемещения до десятков микрометров при обеспечении нанометрической точности. В лазерных системах для управления оптическим лучом используются пьезодефлекторы с наличием автоколебаний в системе управления деформацией пьезоактюатора.

Многослойные пьезоактюаторы для приводов нано- и микроперемещений имеют диапазон перемещения от нескольких нанометров до сотен микрометров; чувствительность менее 1 нм/В; нагрузочную способность до 10 000 Н; мощность на выходном валу до 100 Вт; полосу пропускания до 1000 Гц; диапазон перемещений от единиц нанометров до сотен микрометров. Применение многослойных пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов с пьезоприводами позволяет решать задачи точного совмещения [1—7]. В отличие от простого многослойный пьезоактюатор имеет в статике без нагрузки увеличенный в *n* раз диапазон перемещения, что соответствует числу пьезослоев (пьезопластин) *n* пьезоактюатора. Конструктивно многослойный пьезоактюатор в зависимости от технологии изготовления может быть выполнен в виде составного пьезопреобразователя из отдельных упругоподжатых пьезопластин; пакетного или блочного пьезопреобразователя из пьезопластин, спеченных с применением серебряной пасты; составного пьезопреобразователя из пьезопакетов с упругим армированием; склеенного многослойного пьезопреобразователя из пьезопластин; многослойного пьезопреобразователя со слоями, нанесенными по толстопленочной или тонкопленочной технологии.

Практическое использование многослойных пьезоактюаторов обусловлено одновременно большими диапазоном перемещений (до 200 мкм) и нагрузочной способностью (до 10 000 Н) по сравнению с простыми пьезоактюаторами (пьезопластинами). Для изготовления пьезоактюаторов используется пьезоэлектрическая керамика на основе цирконата и титаната свинца марок ЦТС или PZT, например ЦТС-19, ЦТС-21, ЦТС-23, ЦТС-26Ц, ЦТС-36, НЦТС-1, НЦТБС-1, ЦТБС-3, ЦТБС-7, ЦТС-42, ЦТС-43, ЦТС-46, ЦТС-47, ЦТС-48, ПКР-7, ПКР-7М или PZT-4, PZT-5H [1, 2, 5]. Многослойные пьезоактюаторы производства ОАО "ЭЛПА" различного конструктивного исполнения обеспечивают следующие технические характеристики: многослойный пьезоэлектрический микроактюатор МПМА-1/90 — амплитуду перемещения 60 мкм, блокирующее усилие 1200 Н; многослойный пьезоактюатор АПМ-2-22 — амплитуду перемещения 44 мкм, блокирующее усилие 1200 Н; многослойный преобразователь МПП 6 × 6 × 40 — амплитуду перемещения 48 мкм, блокирующее усилие 1500 Н; армированный актюатор продольного типа ППУ-8 — амплитуду перемещения 40 мкм, усилие размыкания 2500 Н [6, 7].

Наряду с преимуществами многослойного пьезоактюатора, такими как высокая точность, большая нагрузочная способность, широкая полоса пропускания, он обладает и существенным недостатком — нелинейной характеристикой с гистерезисными петлями для деформации многослойного пьезоактюатора, наличие которой усложняет проектирование системы управления пьезоприводом для нано- и микроперемещений.

При расчете деформации многослойного пьезоактюатора необходимо учитывать его гистерезис в статических и динамических режимах работы, статический и динамический коэффициенты гистерезиса.

Определены коэффициенты гармонической линеаризации характеристики с гистерезисными петлями деформации многослойного пьезоактюатора, подставляя которые в критерий Гольдфарба [8], получаем условие существования автоколебаний для системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора.

Статические и динамические характеристики с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора

Рассмотрим экспериментальную статическую характеристику с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора (рис. 1). Измерения перемещения торца многослойного пьезоактюатора проводили с использованием измерительных электронных систем "Модель 213" и "Модель 214" завода "Калибр".

На статической характеристике наблюдаются начальная кривая, на которой лежат вершины основных

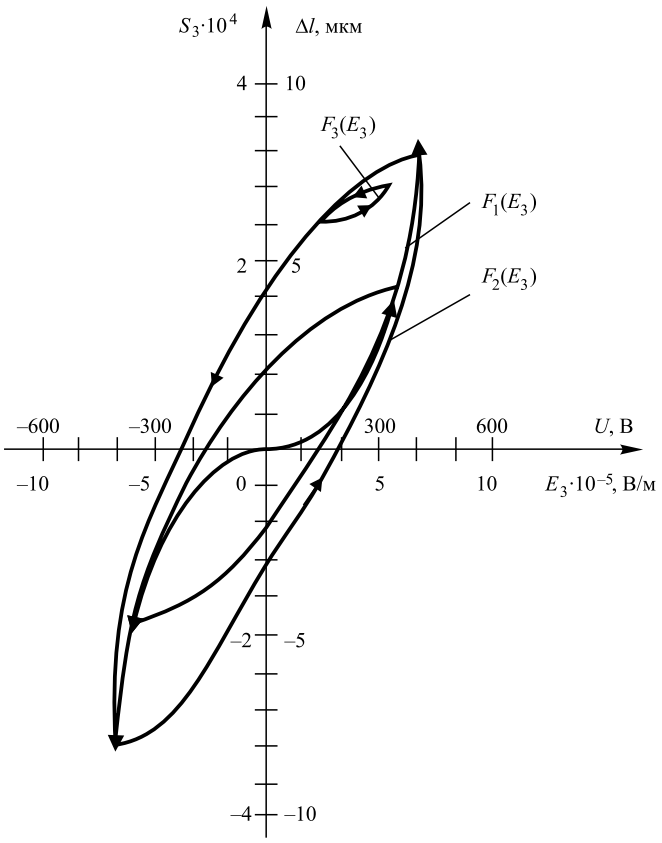


Рис. 1. Характеристика с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте

гистерезисных циклов, основные гистерезисные петли при симметричном относительно нуля изменении напряжения на обкладках многослойного пьезоактюатора и частные циклы при несимметричном относительно нуля изменении напряжения.

Следовательно, статические характеристики деформации многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте (см. рис. 1) записываются в виде трех функций:

$$S_3(E_3) = \begin{cases} F_1(E_3); \\ F_2(E_3); \\ F_3(E_3), \end{cases} \quad (1)$$

где $S_3 = \Delta l/l$ — относительное перемещение многослойного пьезоактюатора по оси 3, Δl — абсолютное перемещение многослойного пьезоактюатора; $F_1(E_3)$ — функция, описывающая начальную кривую; $F_2(E_3)$ — функция, описывающая основную гистерезисную петлю; $F_3(E_3)$ — функция, описывающая частный цикл; $E_3 = U/\delta$ — напряженность электрического поля по оси 3, U — напряжение на обкладках многослойного пьезоактюатора, δ — толщина пьезопластины.

С использованием метода наименьших квадратов получаем для функции $F_1(E_3)$ в выражении (1) следую-

щий аппроксимирующий степенной полином, ограничившись первыми тремя нечетными членами:

$$F_1(E_3) = d_{33}^0 E_3 + a_{33} E_3^3 + b_{33} E_3^5, \qquad (2)$$

где d^0_{33} — начальное значение пьезомодуля; a_{33}, b_{33} — коэффициенты степенного полинома.

При d^0_{33} = 0,4 нм/В, a_{33} = 3,1·10^{-22} м^3/В^3, b_{33} = = –5·10^{-35} м^5/В^5 для многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики марки ЦТС-19 относительное среднее квадратичное отклонение аппроксимирующей кривой от экспериментальной не превышает 5 %.

Аналогично с использованием метода наименьших квадратов получаем функцию $F_2(E_3)$, описывающую основной цикл (рис. 2) при продольном пьезоэффекте и симметричном относительно нуля изменении напряжения на электродах многослойного пьезоактюатора с учетом сухого трения при перемещении доменных границ в сегнетоэлектрике, в виде

$$\begin{aligned} S_3 &= d_{33} E_3 - \gamma_{33}^0 E_{3m} \left(1 - E_3^2 / E_{3m}^2\right)^n \operatorname{sgn} \dot{E}_3; \\ d_{33} &= \left(d_{33}^0 E_{3m} + a_{33} E_{3m}^3 + b_{33} E_{3m}^5\right) / E_{3m} = S_{3m} / E_{3m}, \end{aligned} \qquad (3)$$

где d_{33} — продольный пьезомодуль, значение которого зависит от амплитуды напряженности электрического поля; E_{3m} — амплитуда напряженности электрического

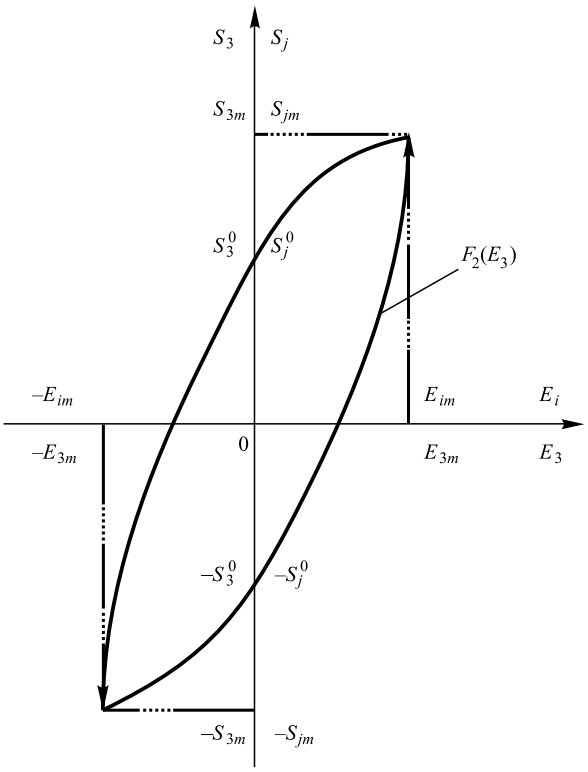


Рис. 2. Основной цикл гистерезисной характеристики многослойного пьезоактюатора

поля в многослойном пьезоактюаторе; S_{3m} — максимальное относительное перемещение многослойного пьезоактюатора при $E_3 = E_{3m}$; $\gamma_{33}^0 = S_3^0 / E_{3m}$ — статический коэффициент гистерезиса (остаточный продольный пьезомодуль), S_3^0 — остаточная относительная величина статической характеристики при E_3 = 0; n = 1, 2, 3, 4, ... — степенной коэффициент, определяемый формой гистерезисной кривой; $\dot{E}_3$ — скорость изменения напряженности электрического поля по оси 3.

Уточним при продольном пьезоэффекте описание основной гистерезисной петли (см. рис. 2) деформации многослойного пьезоактюатора с учетом ее расширения в динамике из-за вязкого трения при перемещении доменных границ, которое пропорционально модулю скорости изменения электрического поля:

$$S_3 = d_{33} E_3 - \gamma_{33} E_{3m} \left(1 - E_3^2 / E_{3m}^2\right)^n \operatorname{sgn} \dot{E}_3, \qquad (4)$$

где $\gamma_{33} = \gamma_{33}^0 \left(1 + k_\gamma \left|\dot{E}_3\right|\right)$ — динамический коэффициент гистерезиса (остаточный продольный пьезомодуль в динамике), γ^0_{33} — статический коэффициент гистерезиса (остаточный продольный пьезомодуль в статике), k_γ — коэффициент вязкого трения при перемещении доменных границ в сегнетоэлектрике, $|\dot{E}_3|$ — модуль скорости изменения напряженности электрического поля по оси 3.

Выражения для гистерезисной петли в статике (3) и динамике (4) аналогичны, причем в динамике при описании гистерезисной петли статический коэффициент гистерезиса заменен динамическим коэффициентом гистерезиса. Замена коэффициентов осуществляется в рабочем частотном диапазоне для пьезокерамики марок ЦТС или PZT до 1 кГц, т. е. до насыщения коэффициента гистерезиса.

После преобразования динамический коэффициент гистерезиса принимает вид

$$\gamma_{33} = \gamma_{33}^0 \left(1 + k_\gamma \dot{E}_3 \operatorname{sgn} \dot{E}_3\right). \qquad (5)$$

Соответственно, получаем следующее выражение для основной гистерезисной петли деформации многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с учетом сухого и вязкого трения:

$$\begin{aligned} S_3 = d_{33} E_3 - \gamma_{33}^0 E_{3m} \left(1 - E_3^2 / E_{3m}^2\right)^n \operatorname{sgn} \dot{E}_3 - \\ - \gamma_{33}^0 k_\gamma \dot{E}_3 E_{3m} \left(1 - E_3^2 / E_{3m}^2\right)^n. \end{aligned} \qquad (6)$$

Обобщенное уравнение обратного пьезоэффекта [1, 3, 5] при управлении по напряжению с учетом компонент механических напряжений многослойного пьезоактюатора по соответствующим осям и свойств

симметрии поляризованной сегнетокерамики типа ЦТС или PZT записывается в виде

$$S_j = d_{ij}E_i + s_{jk}^E T_k, \qquad (7)$$

где индексы $j = 1, 2, ..., 6$; $k = 1, 2, ..., 6$; $i = 1, 2, 3$, причем $S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3$ при продольных колебаниях по оси 3 и продольном пьезоэффекте; $S_1 = d_{31}E_3 + s_{11}^E T_1$ при поперечных колебаниях по оси 1 и поперечном пьезоэффекте; $S_5 = d_{15}E_1 + s_{55}^E T_5$ при сдвиговых колебаниях; $S_j = S_1, ..., S_6$ — относительные деформации пьезоактюатора; $d_{ij} = d_{15}, d_{31}, d_{33}$ — пьезомодули; $E_i = E_1, E_2, E_3$ — напряженности электрического поля в пьезоактюаторе; $s_{jk}^E = s_{11}^E, s_{12}^E, s_{13}^E, s_{33}^E, s_{55}^E$ — упругие податливости; $T_k = T_1, ..., T_6$ — механические напряжения; соответственно, с учетом симметрии электромеханических характеристик сегнетокерамики имеем $d_{31} = d_{32}$ и $s^E_{55} = s^E_{44}$.

Рассматривая гистерезис, уточним первое слагаемое правой части выражения (7), соответствующее обратному пьезоэффекту. С учетом экспериментальных данных и выражений (3) и (7) аналитическое описание обобщенной основной гистерезисной петли (см. рис. 2) многослойного пьезоактюатора с учетом сухого трения при $T_k = 0$ получаем в виде

$$S_j = d_{ij}E_i - \gamma_{ij}^0 E_{im}\left(1 - E_i^2 / E_{im}^2\right)^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i, \qquad (8)$$

где d_{ij} — пьезомодуль; E_i — напряженность электрического поля в многослойном пьезоактюаторе; E_{im} — амплитуда напряженности электрического поля в многослойном пьезоактюаторе; $\dot{E}_i$ — скорость изменения напряженности электрического поля в многослойном пьезоактюаторе по оси i; γ^0_{ij} — статический коэффициент гистерезиса (остаточный пьезомодуль в статике).

Аналогично получаем описание основной гистерезисной петли (см. рис. 2) деформации многослойного пьезоактюатора с учетом ее расширения в динамике из-за вязкого трения при перемещении доменных границ в сегнетоэлектрике

$$S_j = d_{ij}E_i - \gamma_{ij}E_{im}\left(1 - E_i^2 / E_{im}^2\right)^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i, \qquad (9)$$

где $\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^0\left(1 + k_\gamma\left|\dot{E}_i\right|\right)$ — динамический коэффициент гистерезиса (остаточный пьезомодуль в динамике), k_γ — коэффициент вязкого трения, $|\dot{E}_i|$ — модуль скорости изменения напряженности электрического поля по оси i.

Выражение для динамического коэффициента гистерезиса принимает вид

$$\gamma_{ij} = \gamma_{ij}^0\left(1 + k_\gamma \dot{E}_i \operatorname{sgn}\dot{E}_i\right). \qquad (10)$$

Следовательно, получаем следующее выражение для основной гистерезисной петли (см. рис. 2) деформации многослойного пьезоактюатора с учетом сухого и вязкого трения при перемещении доменных границ в сегнетоэлектрике:

$$S_j = d_{ij}E_i - \gamma_{ij}^0 E_{im}\left(1 - E_i / E_{im}^2\right)^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i - \\ - \gamma_{ij}^0 k_\gamma \dot{E}_i E_{im}\left(1 - E_i^2 / E_{im}^2\right)^n. \qquad (11)$$

Соответственно, параметрическую структурную схему многослойного пьезоактюатора [5] уточняем путем замены линейного звена $S_j = d_{ij}F_i$ на нелинейное звено $S_j = F(E_i)$.

При несимметричном относительно нуля изменении напряжения на электродах многослойного пьезоактюатора в статических характеристиках с гистерезисными петлями (см. рис. 1) наблюдаются частные циклы. В основе образования основных и частных циклов лежит доменная переориентация в сегнетокерамике. По аналогии с аппроксимацией основного цикла (3) с учетом сухого трения при продольном пьезоэффекте получаем аппроксимацию частного цикла $F_3(E_3)$ (рис. 3) многослойного пьезоактюатора в виде следующего аналитического выражения:

$$S_3 = S_{3b} + d_{33}\left(E_3 - E_{3b}\right) - \\ - \gamma_{33}^0 E_{3m}\left\{1 - \left[E_3 - \left(E_{3b} + E_{3m}\right)\right]^2 / E_{3m}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_3, \qquad (12)$$

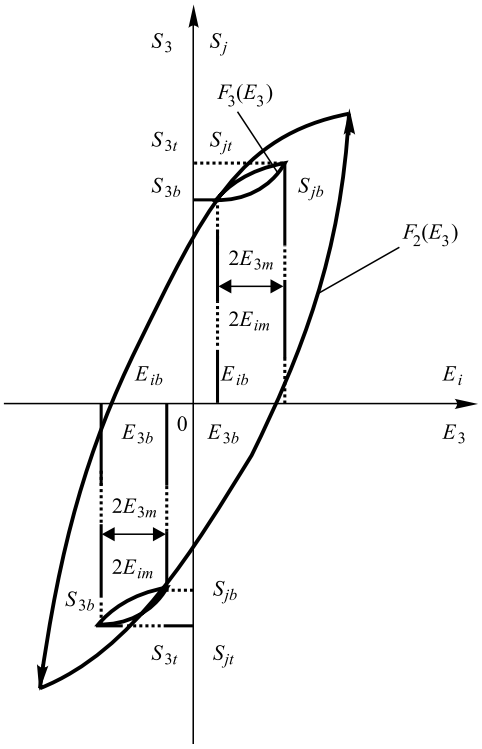


Рис. 3. Частные циклы гистерезисной характеристики многослойного пьезоактюатора

$$d_{33} = (S_{3t} - S_{3b})/(2E_{3m}),$$

где d_{33} — продольный пьезомодуль; S_{3b} — относительное перемещение многослойного пьезоактюатора в начальной точке частного цикла; S_{3t} — относительное перемещение многослойного пьезоактюатора в вершине частного цикла; E_{3m} — амплитуда напряженности электрического поля; E_{3b} — напряженность электрического поля в начальной точке частного цикла.

Среднее квадратичное отклонение аппроксимирующих кривых от экспериментальных основного и частного циклов составляет 5 %. При $E_{3b} = -E_{3m}$ и $S_{3b} = -d_{33}E_{3m}$ частный цикл преобразуется в основной цикл. Соответственно, с учетом (8) и сухого трения получаем аппроксимацию обобщенного частного цикла (см. рис. 3) многослойного пьезоактюатора в виде следующего аналитического выражения:

$$S_j = S_{jb} + d_{ij}\left(E_i - E_{ib}\right) - \\ - \gamma_{ij}^0 E_{im}\left\{1 - \left[E_j - \left(E_{ib} + E_{im}\right)\right]^2 / E_{im}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i, \qquad (13)$$

$$d_{ij} = (s_{jt} - s_{jb})/(2E_{im}),$$

где d_{ij} — пьезомодуль; S_{jb} — относительное перемещение многослойного пьезоактюатора в начальной точке частного цикла; S_{jt} — относительное перемещение многослойного пьезоактюатора в вершине частного цикла; E_{im} — амплитуда напряженности электрического поля; E_{ib} — напряженность электрического поля в начальной точке частного цикла.

При $E_{ib} = -E_{im}$ и $S_{jb} = -d_{ij}E_{im}$ частный цикл преобразуется в основной цикл. Аналогично с учетом динамического коэффициента гистерезиса записываем следующее выражение при продольном пьезоэффекте для частного цикла (см. рис. 3) деформации многослойного пьезоактюатора с учетом сухого и вязкого трения:

$$S_3 = S_{3b} + d_{33}\left(E_3 - E_{3b}\right) - \\ - \gamma_{33} E_{3m}\left\{1 - \left[E_3 - \left(E_{3b} + E_{3m}\right)\right]^2 / E_{3m}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_3$$

или

$$S_3 = S_{3b} + d_{33}\left(E_3 - E_{3b}\right) - \\ - \gamma_{33}^0 E_{3m}\left\{1 - \left[E_3 - \left(E_{3b} + E_{3m}\right)\right]^2 / E_{3m}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_3 - \\ - \gamma_{33}^0 k_\gamma \dot{E}_3 E_{3m}\left\{1 - \left[E_3 - \left(E_{3b} + E_{3m}\right)\right]^2 / E_{3m}^2\right\}^n. \qquad (14)$$

Следовательно, имеем выражение для обобщенного частного цикла (рис. 3) деформации многослойного пьезоактюатора с учетом сухого и вязкого трения

$$S_j = S_{jb} + d_{ij}\left(E_i - E_{ib}\right) - \\ - \gamma_{ij} E_{im}\left\{1 - \left[E_j - \left(E_{ib} + E_{im}\right)\right]^2 / E_{im}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i$$

или

$$S_j = S_{jb} + d_{ij}\left(E_i - E_{ib}\right) - \\ - \gamma_{ij}^0 E_{im}\left\{1 - \left[E_j - \left(E_{ib} + E_{im}\right)\right]^2 / E_{im}^2\right\}^n \operatorname{sgn}\dot{E}_i - \\ - \gamma_{ij}^0 k_\gamma \dot{E}_i E_{im}\left\{1 - \left[E_j - \left(E_{ib} + E_{im}\right)\right]^2 / E_{im}^2\right\}^n. \qquad (15)$$

Найденные аналитические выражения для гистерезисных характеристик многослойного пьезоактюатора позволяют оценивать устойчивость и рассчитывать характеристики системы управления многослойного пьезоактюатора.

Передаточные функции многослойного пьезоактюатора

Динамические характеристики многослойного пьезоактюатора рассчитывают на основе совместного решения волнового уравнения, уравнения пьезоэффекта при нулевых начальных и соответствующих граничных условиях. При расчете пьезоактюатора используется волновое уравнение [3, 4], описывающее распространение волны с затуханием без искажений:

$$\frac{1}{\left(c^E\right)^2}\frac{\partial^2\xi}{\partial t^2} + \frac{2\alpha}{c^E}\frac{\partial\xi}{\partial t} + \alpha^2\xi = \frac{\partial^2\xi}{\partial x^2}, \qquad (16)$$

где $\xi(x, t)$ — смещение сечения пьезоактюатора; x — координата; t — время; c^E — скорость звука при $E = \text{const}$; α — коэффициент затухания.

При одном закрепленном торце пьезоактюатора, например при $x = 0$, получим $\xi(x, t) = 0$, а при упругоинерционной нагрузке на пьезоактюатор при $x = l$ получим $\xi(l, t) = \xi(t)$ и с учетом граничных условий уравнение сил, действующих на другом его торце,

$$T_3(t)S_0\big|_{x=l} = -M\frac{\partial^2\xi(t)}{\partial t^2} - C_e\xi(t), \qquad (17)$$

где T_3 — механическое напряжение по оси 3; M — масса нагрузки; C_e — жесткость нагрузки.

Для многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте из уравнения обратного пьезоэффекта (7) с учетом волнового уравнения (16) и сил (17), действующих на торец пьезоактюатора, при управлении по напряжению записываем выражение

$$\left.\frac{d\Xi(x,p)}{dx}\right|_{x=l} = d_{33}E_3(p) - \frac{s_{33}^E Mp^2\Xi(p)}{S_0} - \frac{s_{33}^E C_e\Xi(p)}{S_0}, \quad (18)$$

причем

$$\Xi(x,p) = L\{\xi(x,t)\} = \int_0^\infty \xi(x,t)\mathrm{e}^{-pt}dt,$$

где $\Xi(x,p)$ — преобразование Лапласа деформации (перемещения) пьезоактюатора; p — параметр преобразования.

Учитывая, что один торец пьезоактюатора жестко закреплен при $x = 0$ и $\Xi(0, p) = 0$, получаем при $x = l$ выражения

$$\Xi(x,p) = \frac{\Xi(p)\mathrm{sh}(x\gamma)}{\mathrm{sh}(l\gamma)}; \quad \left.\frac{d\Xi(x,p)}{dx}\right|_{x=l} = \frac{\Xi(p)\gamma}{\mathrm{th}(l\gamma)}; \quad \gamma = \frac{p}{c^E} + \alpha, \quad (19)$$

где γ — коэффициент распространения; c^E — скорость звука при $E = \mathrm{const}$; α — коэффициент затухания волны. Следовательно, исходя из (18) и (19) запишем выражение

$$\frac{\Xi(p)\gamma}{\mathrm{th}(l\gamma)} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E Mp^2}{S_0} + \frac{\Xi(p)s_{33}^E C_e}{S_0} = d_{33}E_3. \quad (20)$$

Из (20) определяем передаточную функцию пьезоактюатора в виде

$$W_1(p) = \frac{\Xi(p)}{E_3(p)} = \frac{d_{33}}{\frac{s_{33}^E Mp^2}{S_0} + \frac{\gamma}{\mathrm{th}(l\gamma)} + \frac{s_{33}^E C_e}{S_0}}.$$

Отсюда получим передаточную функцию многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке как электромеханической системы с распределенными параметрами:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}\,n}{Mp^2/C_{33} + l\gamma\,\mathrm{ct\,h}(l\gamma) + C_e/C_{33}}, \quad (21)$$

где $\Xi(p)$ — преобразование Лапласа перемещения торца многослойного пьезоактюатора по оси 3; $U(p)$ — преобразование Лапласа напряжения на обкладках многослойного пьезоактюатора при нулевых начальных условиях; $C_{33} = S_0/(s^E_{33}l)$ — жесткость многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте.

Из (21) определим выражение для статического перемещения n-слойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в установившемся режиме при подаче ступенчатого напряжения $U(t) = U_0\,1(t)$ в виде

$$\xi(\infty) = \lim_{t\to\infty}\xi(t) = \lim_{p\to 0} pW(p)\frac{U_0}{p} =$$
$$= \lim_{\substack{p\to 0\\ \alpha\to 0}} \frac{d_{33}nU_0}{l\left(p/c^E + \alpha/\mathrm{th}\left[l\left(p/c^E + \alpha\right)\right] + C_e/C_{33}\right)} = \frac{d_{33}nU_0}{1 + C_e/C_{33}},$$

где U_0 — амплитуда ступенчатого напряжения.

Тогда передаточную функцию (21) многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте после разложения в ряд гиперболического котангенса (учитываем два члена ряда) на рабочих частотах при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m << M$, где m — масса многослойного пьезоактюатора; M — масса нагрузки, в диапазоне рабочих частот $0 < \omega < 0{,}01c^E/l$ как электромеханической системы с сосредоточенными параметрами можно записать в виде

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{(1 + C_e/C_{33})(T_{33}^2p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)}, \quad (22)$$

где $T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33}}}$ и $\xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}}{3c^E\sqrt{M(C_e + C_{33})}}$ — постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке.

Гармоническая линеаризация характеристик с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора

При гармонической линеаризации [8, 9] для основного гистерезисного цикла многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте (см. рис. 2) определяем следующее выражение:

$$S_3(E_{3m}) = [q_{33}(E_{3m}) + q'_{33}(E_{3m})p/\omega]E_3(E_{3m}), \quad (23)$$

где p — оператор Лапласа; ω — частота; $q_{33}(E_{3m})$, $q'_{33}(E_{3m})$ — коэффициенты гармонической линеаризации.

Из выражения (23) имеем передаточную функцию нелинейного звена с гистерезисной характеристикой в виде основного гистерезисного цикла для многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте в виде

$$W_{33_g}(E_{3m}) = S_3(E_{3m})/E_3(E_{3m}) = q_{33}(E_{3m}) + q'_{33}(E_{3m}), \quad (24)$$

где j — мнимая единица. Соответственно, в выражении (24) рассчитываем коэффициенты гармонической ли-

неаризации характеристики с гистерезисными петлями при продольном пьезоэффекте:

$$q_{33}\left(E_{3m}\right)=\frac{1}{\pi E_{3m}}\int_0^{2\pi}S_3\left(E_{3m}\sin\psi\right)\sin\psi d\psi;$$
$$q_{33}^{'}\left(E_{3m}\right)=\frac{1}{\pi E_{3m}}\int_0^{2\pi}S_3\left(E_{3m}\sin\psi\right)\cos\psi d\psi. \quad (25)$$

Найдем числовые значения этих коэффициентов гармонической линеаризации характеристики с гистерезисными петлями с учетом прохождения синусоидального сигнала через звено с характеристикой в виде основной гистерезисной петли (см. рис. 2), причем имеем выходной сигнал с запаздыванием по фазе относительно входного сигнала. При увеличении угла ψ от 0 до 2π выходной сигнал S изменяется следующим образом: sgn $\dot{E}_3 > 0$ от 0 до $\pi/2$, sgn $\dot{E}_3 < 0$ от $\pi/2$ до $3\pi/2$, sgn $\dot{E}_3 > 0$ от $3\pi/2$ до 2π. Следовательно, для пьезокерамики марок ЦТС или PZT из выражений основной гистерезисной петли (4) при $n = 1$ и (25) получаем следующие выражения для коэффициентов гармонической линеаризации характеристики с гистерезисными петлями многослойного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте:

$$q_{33}\left(E_{3m}\right)=\frac{1}{\pi E_{3m}}\times$$
$$\times\int_0^{2\pi}\left[d_{33}E_{3m}\sin\psi-\gamma_{33}E_{3m}\left(1-\sin^2\psi\right)\operatorname{sgn}\dot{E}_3\right]\sin\psi d\psi=d_{33};$$
$$q_{33}^{'}\left(E_{3m}\right)=\frac{1}{\pi E_{3m}}\times \quad (26)$$
$$\times\int_0^{2\pi}\left[d_{33}E_{3m}\sin\psi-\gamma_{33}E_{3m}\left(1-\sin^2\psi\right)\operatorname{sgn}\dot{E}_3\right]\cos\psi d\psi=$$
$$=-\frac{8\gamma_{33}}{3\pi}.$$

Так как для многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики марок ЦТС или PZT начальная кривая $F_1(E_3)$, на которой лежат основные гистерезисные петли $F_2(E_3)$ (см. рис. 1), имеет вид степенной функции с нечетными степенями аргумента, то с использованием метода наименьших квадратов получаем с погрешностью менее 5 % для функции S_3 при продольном пьезоэффекте аппроксимирующий степенной полином (2), ограничиваясь первыми тремя нечетными членами степенного ряда. Следовательно, в зависимости от амплитуды пьезомодуль при продольном пьезоэффекте [4] имеет вид

$$q_{33}\left(E_{3m}\right)=d_{33}\left(E_{3m}\right)=d_{33}^0+a_{33}E_{3m}^2+b_{33}E_{3m}^4. \quad (27)$$

Аналогично (23) находим следующее обобщенное выражение:

$$S_j(E_{im}) = [q_{ij}(E_{im}) + q'_{ij}(E_{im})p/\omega]E_i(E_{im}). \quad (28)$$

Из (28) определяем обобщенную частотную передаточную функцию нелинейного звена с гистерезисной характеристикой в виде основного гистерезисного цикла (см. рис. 2) многослойного пьезоактюатора:

$$W_{ij_g}\left(E_{im}\right)=S_j\left(E_{im}\right)/E_i\left(E_{im}\right)=q_{ij}\left(E_{im}\right)+jq_{ji}^{'}\left(E_{im}\right). \quad (29)$$

Следовательно, для (29) имеем выражения для коэффициентов гармонической линеаризации обобщенной основной гистерезисной характеристики

$$q_{ij}\left(E_{im}\right)=\frac{1}{\pi E_{im}}\int_0^{2\pi}S_j\left(E_{im}\sin\psi\right)\sin\psi d\psi;$$
$$q'_{ij}\left(E_{im}\right)=\frac{1}{\pi E_{im}}\int_0^{2\pi}S_j\left(E_{im}\sin\psi\right)\cos\psi d\psi. \quad (30)$$

Определим числовые значения коэффициентов (30) с учетом прохождения гармонического сигнала через звено с характеристикой в виде обобщенной основной гистерезисной петли (см. рис. 2) многослойного пьезоактюатора.

Для многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики марок ЦТС или PZT при $n = 1$ из выражений для основного цикла (9), (30) имеем аналогично (26) следующий вид выражений для коэффициентов гармонической линеаризации:

$$q_{ij}\left(E_{im}\right)=\frac{1}{\pi E_{im}}\int_0^{2\pi}\left[d_{ij}E_{im}\sin\psi-\gamma_{ij}E_{im}\left(1-\sin^2\psi\right)\operatorname{sgn}\dot{E}_i\right]\times$$
$$\times\sin\psi d\psi=d_{ij}; \quad (31)$$
$$q'_{ij}\left(E_{im}\right)=\frac{1}{\pi E_{im}}\int_0^{2\pi}\left[d_{ij}E_{im}\sin\psi-\gamma_{ij}E_{im}\left(1-\sin^2\psi\right)\operatorname{sgn}\dot{E}_i\right]\times$$
$$\times\cos\psi d\psi=-\frac{4\cdot 2\gamma_{ij}}{\pi\cdot 3}=-\frac{8\gamma_{ij}}{3\pi},$$
$$d_{ij}\left(E_{im}\right)=q_{ij}\left(E_{im}\right)=d_{ij}^0+a_{ij}E_{im}^2+b_{ij}E_{im}^4.$$

Определим коэффициенты гармонической линеаризации для основной гистерезисной петли многослойного пьезоактюатора из различных марок пьезокерамики с учетом различных степенных коэффициентов n — целых чисел:

для $n = 2$

$$q_{ij}(E_{im}) = d_{ij};$$
$$q_{ij}^{'}\left(E_{im}\right)=-\frac{4\cdot 2\cdot 4\gamma_{ij}}{\pi\cdot 3\cdot 5}=-\frac{32\gamma_{ij}}{15\pi}; \quad (32)$$

для $n = 3$

$$q_{ij}(E_{im}) = d_{ij};$$
$$q'_{ij}\left(E_{im}\right) = -\frac{4\cdot 2\cdot 4\cdot 6\gamma_{ij}}{\pi\cdot 3\cdot 5\cdot 7} = -\frac{192\gamma_{ij}}{105\pi}. \quad (33)$$

С учетом (31)...(33), переходя от n к $n + 1$, определяем соотношения для коэффициентов гармонической линеаризации обобщенной гистерезисной характеристики (основной гистерезисной петли) многослойного пьезоактюатора:

$$q_{ij}(E_{im}) = d_{ij};$$
$$q'_{ij_n}\left(E_{im}\right) = \frac{2n}{2n+1} q'_{ij_{n-1}}\left(E_{im}\right). \quad (34)$$

Соответственно, находим выражение

$$q'_{ij_n}\left(E_{im}\right) = -\frac{4\cdot 2\cdot 4\cdot 6\cdot \ldots \cdot 2n\gamma_{ij}}{\pi\cdot 3\cdot 5\cdot 7\cdot \ldots \cdot (2n+1)}. \quad (35)$$

Рассмотрим в обобщенном виде систему управления деформацией многослойного пьезоактюатора [8, 9] с нелинейным гистерезисным элементом и линейной частью системы. Передаточная функция линейной части системы $W_{ij_l}\left(p\right)$ при упругоинерционной нагрузке многослойного пьезоактюатора (22) записывается в виде

$$W_{ij_l}\left(p\right) = \frac{k_l}{T_t^2 p^2 + 2T_t\xi_t p + 1}, \quad (36)$$

где k_l — коэффициент передачи линейной части системы; p — оператор Лапласа; T_t — постоянная колебательного звена пьезоактюатора.

Для системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора имеем условие существования автоколебаний [8, 9]

$$1 + W_{ij_l}\left(j\Omega\right) W_{ij_g}\left(E_{im}\right) = 0, \quad (37)$$

где $W_{ij_l}\left(E_{im}\right)$ — передаточная функция нелинейного гистерезисного элемента; в скобках j — мнимая единица, Ω — частота автоколебаний; E_{im} — амплитуда автоколебаний напряженности электрического поля по оси i. Условие существования автоколебаний [8] — критерий Гольдфарба:

$$W_{ij_l}\left(j\Omega\right) = -\frac{1}{W_{ij_g}\left(E_{im}\right)}. \quad (38)$$

С учетом полученных коэффициентов гармонической линеаризации (26), (27) для гистерезисной характеристики (см. рис. 2) многослойного пьезоактюатора из (38) определяем условие существования автоколебаний для системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора в следующем виде:

$$\frac{k_l}{T_t^2\left(j\Omega\right)^2 + 2T_t\xi_t\left(j\Omega\right) + 1} = -\frac{1}{d_{ij}^0 + a_{ij}E_{im}^2 + b_{ij}E_{im}^4 - j\dfrac{8\gamma_{ij}}{3\pi}}. \quad (39)$$

Следовательно, имеем равенство

$$\frac{1}{\dfrac{1 - T_t^2\Omega^2}{k_l} + j\dfrac{2T_t\xi_t\Omega}{k_l}} = \frac{1}{-\left(d_{ij}^0 + a_{ij}E_{im}^2 + b_{ij}E_{im}^4\right) + j\dfrac{8\gamma_{ij}}{3\pi}}. \quad (40)$$

Из выражения (40) находим два уравнения: для мнимых и вещественных частей для определения частоты Ω и амплитуды E_{im} автоколебаний. Соответственно, первое уравнение — для определения частоты автоколебаний

$$\Omega = \frac{4\gamma_{ij}k_l}{3\pi T_t\xi_t},$$

а второе биквадратное уравнение — для расчета амплитуды автоколебаний

$$b_{ij}E_{im}^4 + a_{ij}E_{im}^2 + d_{ij}^0 + \frac{1 - \dfrac{16\gamma_{ij}^2 k_l^2}{9\pi^2\xi_t^2}}{k_l} = 0.$$

Следовательно, в системе управления деформацией многослойного пьезоактюатора из пьезокерамики промышленной марки ЦТС-19 с продольным пьезоэффектом для пьезодефлектора [10] при $k_l = 3{,}13\cdot 10^8$ В/м; $T_t = 10^{-3}$ с; $\xi_t = 10^{-2}$; $d^0{}_{33} = 4\cdot 10^{-10}$ м/В; $a_{33} = 3{,}1\cdot 10^{-22}$ м^3/В^3; $b_{33} = -5\cdot 10^{-35}$ м^5/В^5; $\gamma_{33} = 0{,}8\cdot 10^{-10}$ м/В имеем частоту автоколебаний $\Omega = 4\gamma_{33}k_l/(3\pi T_t\xi_t) = 1060$ с$^{-1}$ и амплитуду автоколебаний $E_{3m} = 2{,}3\cdot 10^5$ В/м с погрешностью 5 %.

В ряде систем управления деформацией многослойного пьезоактюатора в микроэлектронике, нанотехнологии, адаптивной оптике автоколебания недопустимы, следовательно, необходимо вводить в систему корректирующее устройство компенсации гистерезиса или корректирующее устройство, надлежащим образом деформирующее амплитудную частотную характеристику линейной части системы, для обеспечения устойчивости системы управления деформацией.

Заключение

Получены коэффициенты гармонической линеаризации характеристики с гистерезисными петлями деформации многослойного пьезоактюатора и условие существования автоколебаний для системы управления деформацией многослойного пьезоактюатора. Автоколебания в системе управления деформацией многослойного пьезоактюатора используются в пьезодефлекторах для управления оптическим лучом в лазерных системах, устройствах оптической памяти и оптических вычислительных приборах.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.

2. **Некоторые** физико-механические проблемы пьезоэлектрических актюаторов и области их применения / В.А. Акопьян, А.Е. Панич, А.Н. Соловьев и др. // Нано- и микросистемная техника. 2006. № 10. С. 35—40.

3. **Физическая** акустика. Т. 1. Ч. А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.

4. **Афонин С.М.** Исследование и расчет статических и динамических характеристик пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Нано- и микросистемная техника. 2008. № 3. С. 34—41.

5. **Афонин С.М.** Структурно-параметрическая модель многослойного электромагнитоупругого актюатора нано- и микроперемещений // Наноинженерия. 2014. № 10. С. 27—34.

6. **Многослойные** пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения / В.К. Казаков, В.М. Климашин, В.Г. Никифоров и др. // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 62—65.

7. **Актюаторы** для оптических затворов и методы измерений их характеристик / В.К. Казаков, В.Г. Никифоров, А.Я. Сафронов, В.А. Чернов // Нано- и микросистемная техника. 2007. № 10. С. 52—55.

8. **Теория** автоматического управления. Ч. 2. Теория нелинейных и специальных систем автоматического управления // Н.А. Бабаков, А.А. Воронов, А.А. Воронова и др.; под ред. А.А. Воронова. М.: Высш. шк., 1977. 288 с.

9. **Бесекерский В.А., Попов Е.П**. Теория систем автоматического регулирования. М.: Профессия, 2004. 752 с.

10. **Ребрин Ю.К.** Управление оптическим лучом в пространстве. М.: Сов. радио, 1977. 336 с.

УДК 681.2

С.А. Билоконь
(Черкасский государственный технологический университет, Украина)
E-mail: marsana001@gmail.ru

Исследование электрических свойств и восстановление поврежденных участков элементов памяти

Проанализирована необходимость исследования запоминающих устройств в целях выявления причин их неработоспособности. На примере элементов памяти типа DDR2 SDRAM показано, что причиной выхода из рабочего состояния элементов памяти является разрушение проводящей дорожки, или зоны металлизации. Это со временем приводит к уменьшению электрического заряда, хранящегося в ячейке, что может привести к потере данных. Предлагается методика восстановления металлизации путем применения зонда атомно-силового микроскопа в качестве коллоидного датчика.

Ключевые слова: *атомно-силовая микроскопия, ячейки памяти, распределение заряда, коллоидный датчик.*

The paper analyzed the necessity of the study of memory devices in order to identify the causes of their inoperability. It is shown that the cause of the working out of the state of the memory elements in the example of the elements of memory type DDR2 SDRAM is the destruction of the conductive paths, or zone of metalization. Eventually it leads to a reduction in electric charge stored in the cell, which can cause data loss. The author proposes a methodology of recovery metallization by applying a probe of an atomic force microscope as colloidal probe.

Keywords: *atomic force microscopy, memory cell, charge distribution, colloidal probe.*

Введение

Современные наука и техника предъявляют все более жесткие требования к надежности и долговечности компьютеризированных систем и их компонентов. Сегодня практически во все отрасли техники активно внедряются средства с полупроводниковыми запоминающими устройствами. Согласно существующим стандартам на системы критического применения [1] такие устройства должны иметь высокие надежность, быстродействие и точность функционирования системы в целом. Однако длительное использование таких элементов памяти неизбежно ведет к появлению ошибок и сбоев в работе системы. При этом активное использование диагностических

тестовых программ для выявления неработоспособных ячеек памяти не позволяет спрогнозировать время выхода из строя, а также выявить причины поломки.

Ученые Г. Рябцев, В.И. Хаханов, Г.Ф. Кривуля, В.С. Харченко, В.М. Рудницкий, П. Тарасенко, A.J. Van de Goor, Y. Zorian и др. [1—5] сделали значительный вклад в формирование теоретических и практических основ неразрушающего контроля и диагностирования предельного срока эксплуатации, наработок на отказ и вероятность безотказной работы разнообразных полупроводниковых элементов памяти с помощью тестовых методов. Обзор литературных источников показал, что работы по повышению помехоустойчивости и надежности эксплуатации элементов памяти направлены на разработку и реализацию процесса диагностирования и контроля этих устройств, которое проводится путем комплексной верификации и позволяет прогнозировать предельный срок их эксплуатации. Однако результаты таких испытаний не принесли ожидаемых результатов по прогнозированию срока надежной эксплуатации.

В данной работе предлагаются методика и результаты исследования элементов полупроводниковой памяти методом атомно-силовой микроскопии после предварительной эксплуатации в критических условиях. Это позволит прогнозировать срок надежной работы памяти при различных внешних условиях.

Порядок проведения эксперимента и обсуждение его результатов

В качестве исследуемого образца использовали элемент памяти типа DDR2 SDRAM, который пред-

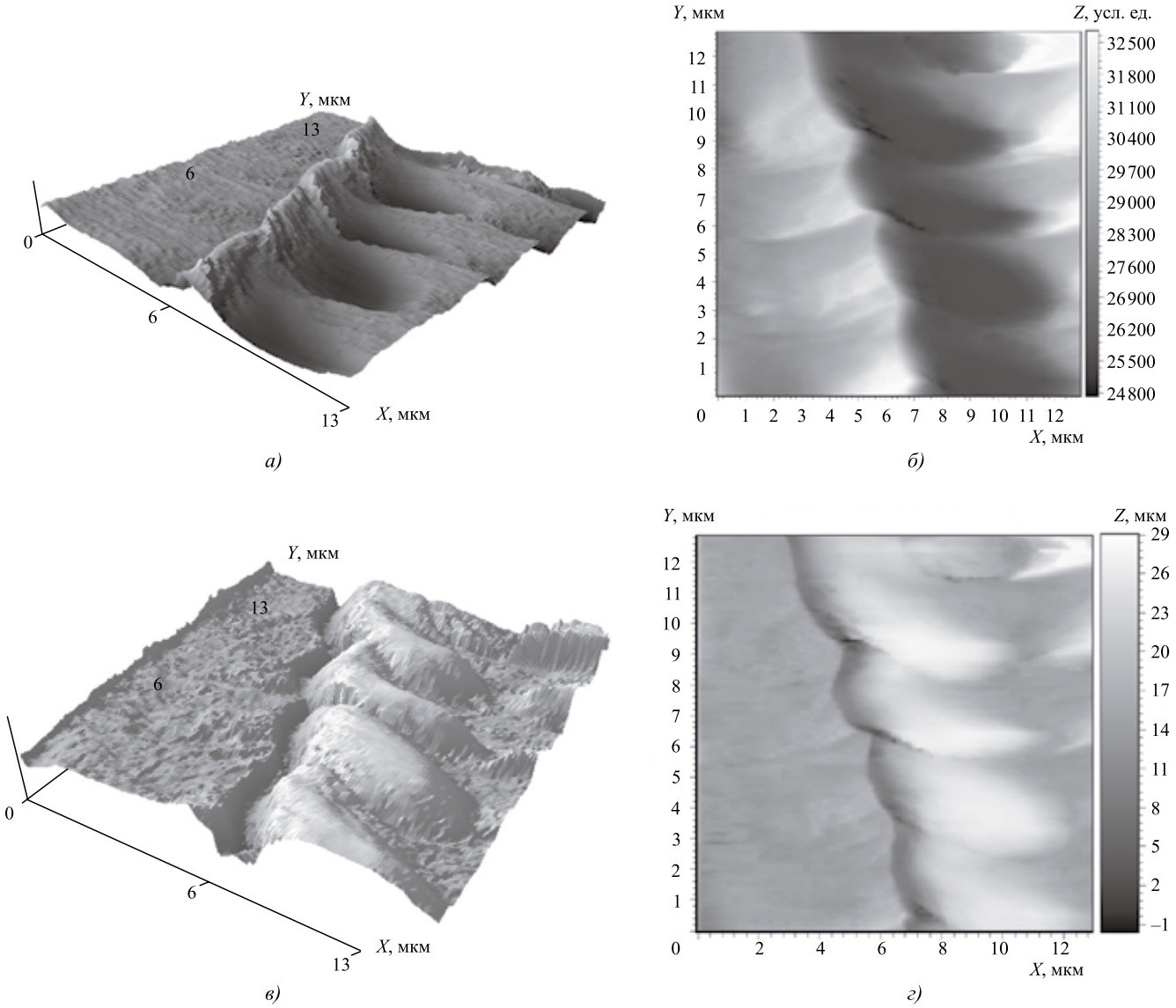


Рис. 1. Аксонометрия (*а*, *в*) и топография (*б*, *г*) рельефа (*а*, *б*) и карты распределения электрических зарядов (*в*, *г*) по поверхности кристалла ячейки памяти

варительно готовили согласно методике, описанной в [5]. Это позволило очистить микросхему памяти от защитного слоя, сохранив при этом ее работоспособность. Для определения рельефа (рис. 1, *а*, *б*) и карты распределения электрических зарядов по поверхности образца (рис. 1, *в*, *г*) образец сканировали методом АСМ по методике двухпроходного сканирования [6].

Проведенное сканирование позволило получить изображение, на котором наблюдаются как ячейки памяти, так и зоны металлизации самой микросхемы.

На рис. 1, *а*, *б* показаны четко выраженные ячейки памяти на аксонометрическом изображении фрагмента кристалла элемента запоминающего устройства, которые расположены вдоль "гребня" — электрического проводника. В то же время на карте распределения электрических зарядов в ячейке памяти на этом же участке (рис. 1, *в*, *г*) наблюдается различная интенсивность накопления электрических зарядов для отдельных фрагментов. Так, наибольшая интенсивность распределения электрического заряда наблюдается именно в ячейках памяти, тогда как в зоне металлизации — электрического проводника, напротив, имеет место "провал" в распределении электрического заряда (по нему электрический заряд полностью "стекает" на заземляющий электрод).

Для определения расходов заряда в ячейках памяти проводили их многократное (порядка 20 раз) исследование в момент подачи питания, через 5 мин и через 60 мин после начала работы микросхемы памяти (рис. 2). В результате такого исследования получили зависимость уменьшения распределения электрического заряда с течением времени (рис. 2), которая позволяет определить уровень уменьшения электрического заряда в ячейках памяти со временем, установить причины такого уменьшения и дать рекомендации по повышению надежности хранения данных в полупроводниковых элементах памяти.

Так, через 5 мин после начала подачи питания происходит незначительное (на 1,5...2 %) уменьшение накопленного в ячейке памяти заряда, которое, по мнению автора, связано с расходами электрического поля ячейки под действием внешних факторов (ультрафиолетового излучения, частичной поляризации микрочастиц из окружающей среды — пыли, влаги и т. д.) и с методическими погрешностями самого метода исследования с использованием атомно-силового микроскопа (АСМ).

Через 60 мин наблюдается уже существенное (до 80 %) уменьшение накопленного в ячейке памяти заряда. Особенно оно отчетливо видно для крайних к металлизации ячеек памяти. Это может происходить из-за утечки заряда через металлизированный слой на заземлитель, что связано с уменьшением накопительной способности кристалла (влиянием внешней среды, временной усталости материала кристалла, его микро- и макродефектов).

Из изложенного можно сделать вывод, что во избежание сбоев при накоплении и сохранении информации, для надежного сохранения данных в оперативной памяти следует периодически (но не реже, чем раз в 60 мин) перезаписывать информацию во всех ячейках памяти, даже в тех, которые предназначены для длительного хранения оперативной информации.

Проводили также исследование участков шины обмена данными ячейки памяти, поврежденных вследствие механического воздействия или электрического пробоя, и мероприятия по восстановлению таких участков.

Исследование нерабочего участка памяти методом атомно-силовой микроскопии показало, что в месте, где происходит утечка заряда, наблюдается механическое повреждение участка шины обмена данными запоминающего устройства (обрыв шины обмена данными показан на рис. 3).

Восстановление поврежденного участка шины обмена данными проводили с использованием уникальной функции метода атомно-силовой микроскопии, которая заключается в возможности использования его рабочего инструмента — зонда в режиме коллоидного датчика. Данный режим позволяет не только выявлять нарушения структуры ячеек памяти запоминающего устройства, но и восстанавливать их. Это осуществляется путем захвата острием зонда свободной молекулы с участка металлизации и переноса ее на поврежденный участок (рис. 4). Многократный повтор та-

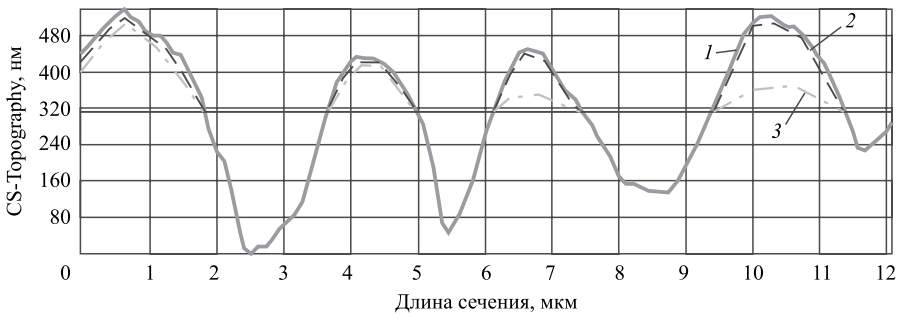


Рис. 2. Профилограмма распределения заряда по поверхности элемента памяти:
1 — в момент подачи питания; *2* — через 5 мин; *3* — через 60 мин; CS-Topography — режим, при котором снимается качественная характеристика распределения заряда путем поддерживания между зондом и образцом постоянной силы взаимодействия и отслеживания при этом расстояния до поверхности образца

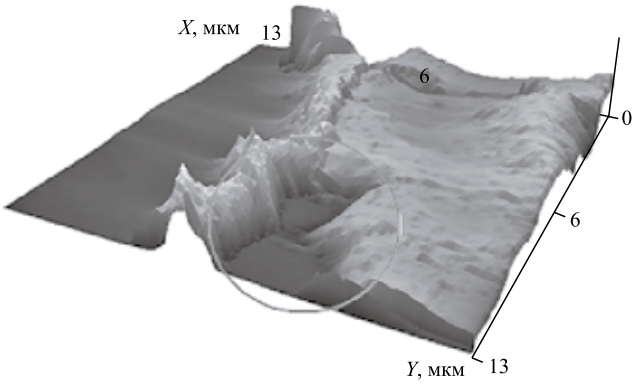


Рис. 3. Трехмерное изображение элемента памяти с поврежденным участком шины обмена данными (выделено кругом)

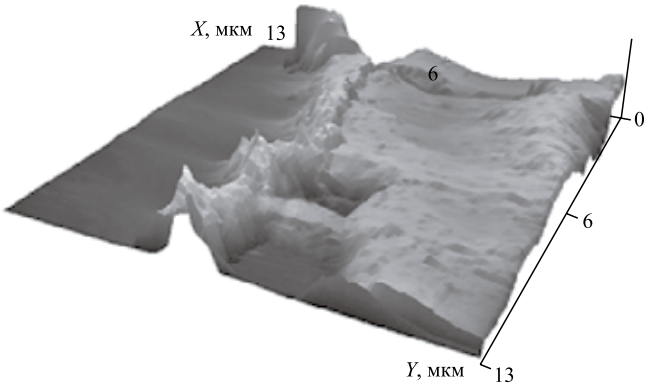


Рис. 4. Трехмерное изображение структуры ячейки памяти, восстановленной с использованием режима коллоидного датчика атомно-силового микроскопа

кой процедуры позволит полностью восстановить поврежденный участок.

Заключение

Проведенные исследования показали, что во избежание сбоев из-за утечки заряда через металлизированный слой на заземлитель следует периодически (но не реже, чем раз в 60 мин) перезаписывать информацию во всех ячейках памяти.

Кроме того, с помощью метода атомно-силовой микроскопии возможно не только выявление поврежденного участка запоминающего устройства, но и его восстановление с помощью зонда, работающего в режиме коллоидного датчика. Это позволяет повысить надежность и время работы элементов памяти, а также, при создании условий критического использования, прогнозировать время надежной эксплуатации таких элементов. Кроме того, такая уникальная возможность методики коллоидного датчика позволяет в перспективе рассматривать АСМ как основной инструмент для восстановления элементов микро- и наноэлектроники, микромеханики, фотоники и т. п.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Андриенко В.А.** Влияние внешней среды на работоспособность запоминающих устройств в условиях критического применения // Scientific-technical conference "Innovations in engineering" 9—12 September, 2015, Burgas, Bulgaria. P. 94—95.

2. **Хаханов В.И.** Техническая диагностика цифровых и микропроцессорных структур: учеб. пособие / Киев, ИСИО, 1995. 242 с.

3. **Хаханов В.И.** Контроль и диагностика вычислительных устройств и систем: учеб. пособие. Харьков, ХВУ, 1997. 304 с.

4. **Zorian Y., Shoukourian S.** Embedded-Memory Test and Repair: Infrastructure IP for SoC Yield // IEEE Design and Test of Computers. 2003. Iss. 3. P. 58—66.

5. **Ryabtsev V.G., Andrienko V.A., Kolpakov I.A.** A lot of the versions for diagnosing microcircuits memory devices of critical computer control systems // East-West Design & Test Workshop: IEEE Symposium 2005, September 15—19, 2005, Proceeding of Symposium. Odessa, 2005. P. 115—118.

6. **Андриенко В.А., Уткина Т.Ю.** Средства диагностирования запоминающих устройств на всех этапах жизненного цикла // Наукові вісті. 2007. № 1 (11). С. 11—14.

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 подрисуночную подпись. Подрисуночные 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 ред. совета без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются

Плата за публикацию статей не взимается

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 *Беликова Е.И.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 01.08.2016 г. Подписано в печать 14.09.16 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**