ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 5 (173)
май

Издается с января 2005 г.

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

**Председатель редакционного совета**
д.т.н., проф., заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**
д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**
д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
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.П. КУЗНЕЦОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.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:**
О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

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

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

## СОДЕРЖАНИЕ

### ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В., Чубаров Д.А.** Разработка теплозащитного покрытия для охлаждаемых лопаток турбины высокого давления из никелевого монокристаллического сплава ВЖМ5У ..... 195

**Гадалов В.Н., Алымов Д.С., Макарова И.А., Ельников Е.А.** Изучение порошков титановых сплавов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов металлообработки ..... 201

**Лебедев В.А., Штынь С.Ю., Чернега Ю.Г., Занин А.А.** Энергетическая модель обеспечения качества покрытий в вибрационных технологических системах ..... 205

### МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Хлыбов А.А., Кувшинов М.О., Камаев М.С.** Повышение физико-механических характеристик поверхностного слоя титанового сплава ВТ16 методом ультразвуковой ударной обработки ..... 209

### ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

**Коновалов С.В., Иванов Ю.Ф., Комиссарова И.А., Косинов Д.А., Громов В.Е.** Повышение многоцикловой усталости титанового сплава при токовом воздействии ..... 213

### ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

**Балакай В.И., Шпанова К.А., Ковалева А.О., Гривенко А.В.** Повышение сцепления серебряных покрытий с никелевой основой ..... 219

### ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

**Табаков В.П., Аль Кадхими М.Ф.Д., Сагитов Д.И.** Повышение эффективности спиральных сверл путем применения многослойных покрытий ..... 225

### ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

**Смоленцев В.П., Широкожухова А.А., Сафонов С.В., Салтанаева Е.А.** Комбинированная обработка каналов в керамических деталях ..... 229

**Щедрин А.В., Бекаев А.А., Чихачева Н.Ю., Бурлакова Т.А.** Инновационные методы комбинированной обработки ..... 233

### ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

**Афонин С.М.** Статические и динамические характеристики секционного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте ..... 237

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

**Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней по группам научных специальностей: 05.02.00 — Машиностроение и машиноведение; 05.05.00 — Транспортное, горное и строительное машиностроение; 05.16.00 — Металлургия и материаловедение, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science**

**© Издательство "Инновационное машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2019**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15
2019
№ 5 (173)
May

Since 2005, January

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

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

**Editorial Assistant**
Dr. of Phys.-Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

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

**Editorial council:**
Yu.P. ANKUDIMOV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.E. GROMOV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
N.K. KRIONI
V.P. KUZNETSOV
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAKHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
G.A. SUKHOCHEV
V.P. TABAKOV
V.A. SHULOV
M.L. KHEIFETS

**Edition:**
O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

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

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

## CONTENTS

**GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING**

**Budinovsky S.A., Smirnov A.A., Matveev P.V., Chubarov D.A.** Development of thermal barrier coating for cooled blades of high-pressure turbine from single-crystal nickel VZhM5U alloy ..... 195

**Gadalov V.N., Alymov D.S., Makarova I.A., El'nikov E.A.** Study of titanium alloys powders obtained by electric discharge dispersion of metal working waste ..... 201

**Lebedev V.A., Shtyn' S.Yu., Chernega Yu.G., Zanin A.A.** Energy model of coatings quality assurance in vibration technological systems ..... 205

**MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING**

**Khlybov A.A., Kuvshinov M.O., Kamaev M.S.** Increase of physical and mechanical characteristics of surface layer of titanium VT16 alloy by ultrasonic shock processing ... 209

**PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY**

**Konovalov S.V., Ivanov Yu.F., Komissarova I.A., Kosinov D.A., Gromov V.E.** Increase of multicycle fatigue of titanium alloy at current exposure ..... 213

**CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING**

**Balakay V.I., Shpanova K.A., Kovaleva A.O., Grivenko A.V.** Increase of adhesion of silver coatings with nickel base ..... 219

**POLYMER AND COMPOSITE COATINGS**

**Tabakov V.P., Al' Kadkhimi M.F.D., Sagitov D.I.** Increase of efficiency of twist bits by applying of multilayer coatings ..... 225

**PROCESSING BY COMBINED METHODS**

**Smolentsev V.P., Shirokozhukhova A.A., Safonov S.V., Saltanaeva E.A.** Combined treatment of channels in ceramic parts ..... 229

**Shchedrin A.V., Bekaev A.A., Chikhacheva N.Yu., Burlakova T.A.** Innovative methods of combined treatment ..... 233

**PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS**

**Afonin S.M.** Static and dynamic characteristics of sectional piezoactuator of nano- and microdisplacements at longitudinal piezoeffect ..... 237

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

**Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.00 — Mechanical engineering and machinery science; 05.05.00 — Transport, mining and building mechanical engineering; 05.16.00 — Metallurgy and materials science, Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform**

**© "Innovative mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2019**

УДК 629.7.023

**С.А. Будиновский, А.А. Смирнов, П.В. Матвеев, Д.А. Чубаров**
*(ФГУП "ВИАМ", г. Москва)*
*E-mail: bbssaa55@mail.ru*

# Разработка теплозащитного покрытия для охлаждаемых лопаток турбины высокого давления из никелевого монокристаллического сплава ВЖМ5У

*Проведены исследования образцов из никелевого монокристаллического сплава ВЖМ5У для охлаждаемых лопаток турбины высокого давления (ТВД) с теплозащитными покрытиями (ТЗП) при температурах 1200 и 1150 °С в течение 100 и 500 ч. Приведены результаты металлографических исследований образцов в исходном виде и после испытаний. Изучено влияние ТЗП на механические характеристики прочности сплава ВЖМ5У.*

***Ключевые слова:*** *теплозащитные покрытия, ионно-плазменная технология, магнетронное распыление, жаростойкость, защита жаропрочных сплавов, покрытия для лопаток турбины.*

*The samples from nickel single-crystal VZhM5U alloy for cooled blades of high-pressure turbine with thermal barrier coatings (TBC) at temperatures of 1200 and 1150 °C for 100 and 500 hours are studied. The results of metallographic studies of samples in their original form and after testing are presented. The effect of TBC on the mechanical characteristics of the strength of the VZhM5U alloy is studied.*

***Keywords:*** *thermal barrier coatings, ion-plasma technology, magnetron sputtering, heat resistance, protection of high-temperature alloys, coatings for turbine blades.*

## Введение

Лопаточный аппарат газотурбинных двигателей (ГТД) подвергается воздействию интенсивных тепловых и механических нагрузок в условиях высокотемпературного коррозионного разрушения поверхности агрессивной внешней средой. В то же время необходимость повышения эффективности ГТД различного назначения требует увеличения температуры рабочего газа турбины, которая ограничена рабочей температурой материала лопаток, изготавливаемых из жаропрочных сплавов на основе никеля [1—4]. На сегодняшний день частично разрешить это противоречие позволяет применение для защиты поверхности пера лопаток ГТД многослойных теплозащитных покрытий (ТЗП). Наличие в их конструкции внешнего керамического слоя (КС) на основе оксида циркония, легированного 7...8 % оксида иттрия (YSZ), значительно (до 100 °С и более) позволяет снизить рабочую температуру поверхности пера лопатки до допустимого для жаропрочного сплава уровня (1100...1150 °С) и поднять температуру рабочего газа турбины [5—10]. Однако следует особо отметить, что попытки использовать ТЗП в качестве основного средства обеспечения работоспособности лопаток при экстремально высоких температурах без разработки новых конструкционных материалов с рабочей температурой 1200...1300 °С могут привести к катастрофическому разрушению лопатки турбины из никелевого сплава. При эксплуатации ТЗП всегда существует вероятность скола внешнего керамического слоя с поверхности пера, а при указанных выше температурах существующие никелевые сплавы и жаростойкие покрытия неработоспособны.

Применение ТЗП на ГТД самолетов ведущих зарубежных производителей, несмотря на его высокую стоимость и удорожание производства лопатки турбины на 10...12 %, обеспечивает уве-

личение ресурса работы двигателей в 1,5...2,5 раза без замены лопаток турбины высокого давления (ТВД) из дорогостоящих жаропрочных никелевых сплавов и существенно снижает эксплуатационные расходы. В течение более чем 30 лет за рубежом применяют ТЗП двух систем: с диффузионным платино-алюминидным жаростойким подслоем NiPtA + YSZ и конденсированным многокомпонентным NiCoCrAlY + YSZ.

Опыт эксплуатации и многочисленных лабораторных испытаний существующих ТЗП показал, что определяющим фактором для работоспособности ТЗП в целом является максимальная температура испытаний. При температурах свыше 1200...1250 °С срок службы ТЗП с внешним YSZ-слоем не превышает нескольких десятков часов независимо от типа и технологии нанесения. При высоких температурах происходит спекание керамики, снижается ее пористость и количество трещин или вертикальных каналов роста. Это приводит к уменьшению теплозащитного эффекта от применения ТЗП, росту термических напряжений и сколу керамики. Поэтому в последнее десятилетие значительные усилия материаловедов были направлены на создание новых более высокотемпературных керамических материалов для ТЗП.

На сегодняшний день в качестве наиболее перспективных материалов для ТЗП рассматриваются керамики на основе цирконатов редкоземельных металлов типа $Me_2Zr_2O_7$, где Me — Gd, Nd, Sm, La, Ce, имеющие теплопроводность менее 2 Вт/(м·К) при рабочих температурах до 1500 °С и не склонные к спеканию. Агентством NASA (США) предложено использовать для ТЗП материал системы ($ZrO_2$—$Y_2O_3$)—$Nd_2O_3$($Gd_2O_3$, $Sm_2O_3$)—$Yb_2O_3$($Sc_2O_3$). Материал при температурах до 1300 °С имеет уникально низкую теплопроводность около 1,0...1,2 Вт/(м·К), которая слабо зависит от продолжительности высокотемпературной выдержки. Высокие свойства такой керамики авторы связывают с образованием в структуре КС наноразмерных кластеров оксидов $Nd_2O_3$—$Yb_2O_3$ или $Gd_2O_3$—$Yb_2O_3$. Уже разработаны серийные керамические покрытия, легированные оксидами редкоземельных металлов, например, RT-35 Low k (Chromalloy, США) и Metco 206A, Metco 6041 (Oerlikon Metco, Швейцария) [11—15].

ФГУП "ВИАМ" провел работы по разработке керамического слоя ТЗП с низкой теплопроводностью на рабочую температуру 1150 °С (с забросами до 1200 °С) и технологии его нанесения методом магнетронного среднечастотного распыления металлических мишеней из циркониевых сплавов для рабочих лопаток турбин из сплава ВЖМ5У серийных и перспективных ГТД.

## Объекты и методы исследования

Исследования были проведены на дисковидных образцах ∅25×3 мм с монокристаллической структурой из жаропрочного никелевого сплава ВЖМ5У (Ni6Co6Al4Cr4W4TiMoTaRe). Для нанесения жаростойкого слоя ТЗП использовали серийные сплавы для ионно-плазменных покрытий — ВСДП-41 (NiCrAlTaReYHf), ВДСП-4 (NiAlCrHf), ВСДП-3 (NiCrAlReYHf), ВСДП-16 (AlNiY). Жаростойкие соединительные слои ТЗП были нанесены на промышленной ионно-плазменной установке МАП-2. Покрытия получали по двухстадийной технологии. На первой стадии на поверхность образцов наносили слой никелевого сплава толщиной 75...80 мкм, на второй — слой алюминиевого сплава до получения на покрываемой поверхности удельного привеса 60...65 г/м$^2$, а затем проводили их термическую обработку в вакууме при температуре 1050 °С и времени выдержки 3 ч для формирования двухслойного жаростойкого покрытия и релаксации напряжений.

Керамический слой ТЗП наносили на установке среднечастотного магнетронного распыления УОКС-2 из мишеней, изготовленных на основе циркониевого сплава системы ВЦС-4 (ZrGdY) в среде рабочего газа аргона и кислорода. Рабочий газ обеспечивает распыление мишени и генерацию потока атомов металла, направленного к поверхности покрываемых деталей. Формирование КС на поверхности деталей происходит в процессе плазмохимического взаимодействия атомов металла с атомами кислорода, которые вступают в реакцию, образуя химическое соединение [16—20].

Испытания на изотермическую жаростойкость образцов из сплава ВЖМ5У с ТЗП проводили в камерной электропечи Nabertherm при температурах 1150 °С в течение 500 ч и 1200 °С в течение 100 ч.

Микроструктуры композиций сплав—покрытие исследовали на растровом электронном микроскопе JCMA-733.

Рентгеноструктурные исследования керамического слоя ТЗП образцов выполнены на дифрактометре D/MAX-2500, RIGAKU, с монохроматическим Cu $K_\alpha$-излучением. Диапазон сканирования в интервале углов $2\theta$ = 10...90°. Рабочий режим дифрактометра: напряжение 40 кВ, ток 200 мА, время экспозиции 2 с. Расшифровка дифрактограмм проведена с помощью специализированной программы Jade5 и базы данных PDF2.

Характеристики длительной прочности определяли на установке ZST2/3-ВИЭТ в соответствии с требованиями ГОСТ 10145 в течение испытаний до 500 ч на образцах с диаметром рабочей части

5 мм; сопротивление усталости — на испытательной машине МВИ-611М по ГОСТ 25.502 при 900 °С на базе испытаний $2 \cdot 10^7$ циклов на "корсетных" образцах с минимальным диаметром рабочей части 7 мм при симметричном знакопеременном цикле нагружения.

## Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 1 показаны образцы из сплава ВЖМ5У с ТЗП после различной выдержки в процессе испытаний на изотермическую жаростойкость. Видно, что повреждения КС ТЗП, нанесенного на все образцы в одной технологической садке на установке УОКС-2, различны в зависимости от типа внутреннего жаростойкого слоя ТЗП. Минимальные повреждения керамического слоя имеет покрытие ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4; ВСДП-4 + ВСДП-16 + ВЦС-4.

Микроструктуры покрытий в исходном состоянии и после испытаний представлены на рис. 2. Видно, что магнетронный способ позволил получить керамические слои со столбчатой структурой, схожей со структурой электронно-лучевых покрытий, наносимых методом осаждения из паровой фазы (EB-PVD), которая является оптимальной для ТЗП, так как она обладает необходимой термостойкостью в условиях интенсивных теплосмен, характерных для работы авиационных ГТД. Керамический слой по всей толщине состоит из очень тонких (порядка 1 мкм) кристаллитов (см. рис. 2, *а—в*), плотно прилегающих друг к другу. Вертикальные, сквозные каналы в структуре покрытия также имеют малый поперечный размер и практически совмещены с границами кристаллитов. Керамический слой сохраняет столбчатое строение (см. рис. 2, *г—е*) после испытаний при температуре 1150 °С. Но слой фрагментируется с образованием "раскрытых" сквозных вертикальных каналов, что частично компенсирует термические напряжения, связанные с различием коэффициентов термического линейного расширения керамики и металлической подложки. Образование продольной трещины приблизительно в середине КС, по-видимому, связано с увеличением плотности керамики с ростом ее толщины. Этот эффект имеет место и для электронно-лучевых КС.

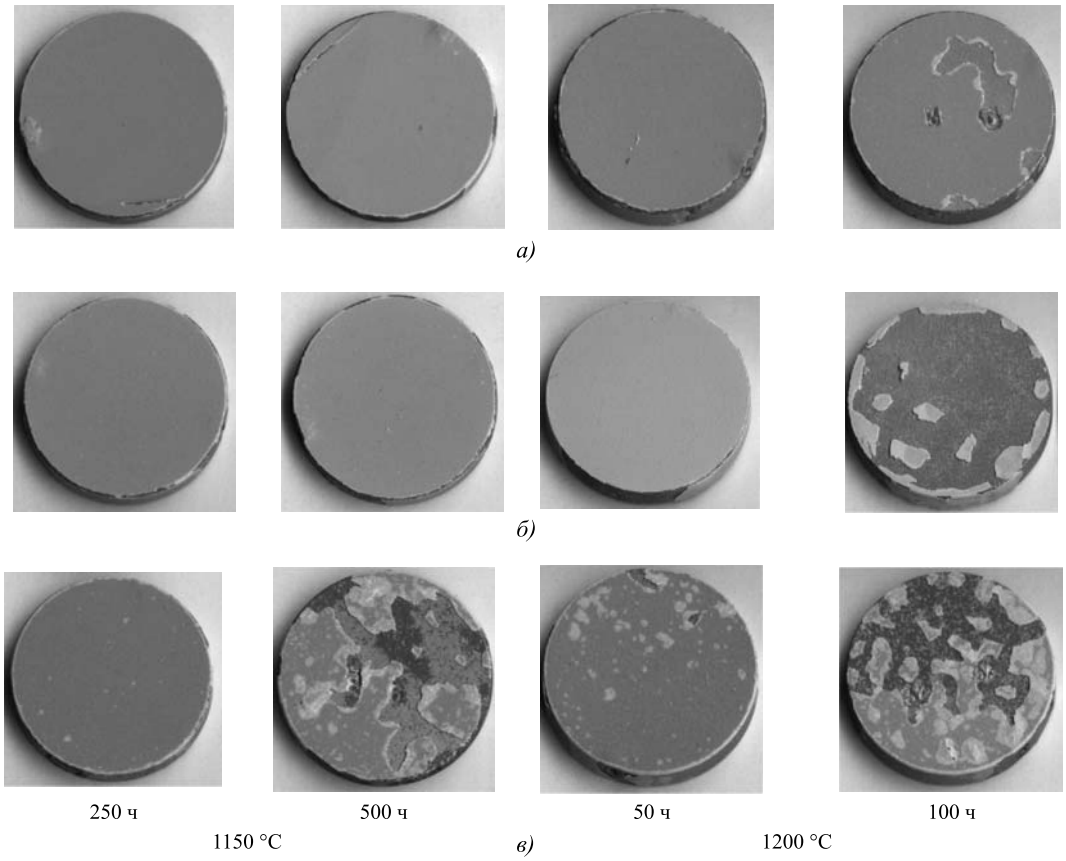



**Рис. 1. Изменение внешнего вида образцов из сплава ВЖМ5У с ТЗП в процессе испытаний на жаростойкость:** *а* — ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4; *б* — ВСДП-3 + ВСДП-16 + ВЦС-4; *в* — ВСДП-4 + ВСДП-16 + ВЦС-4

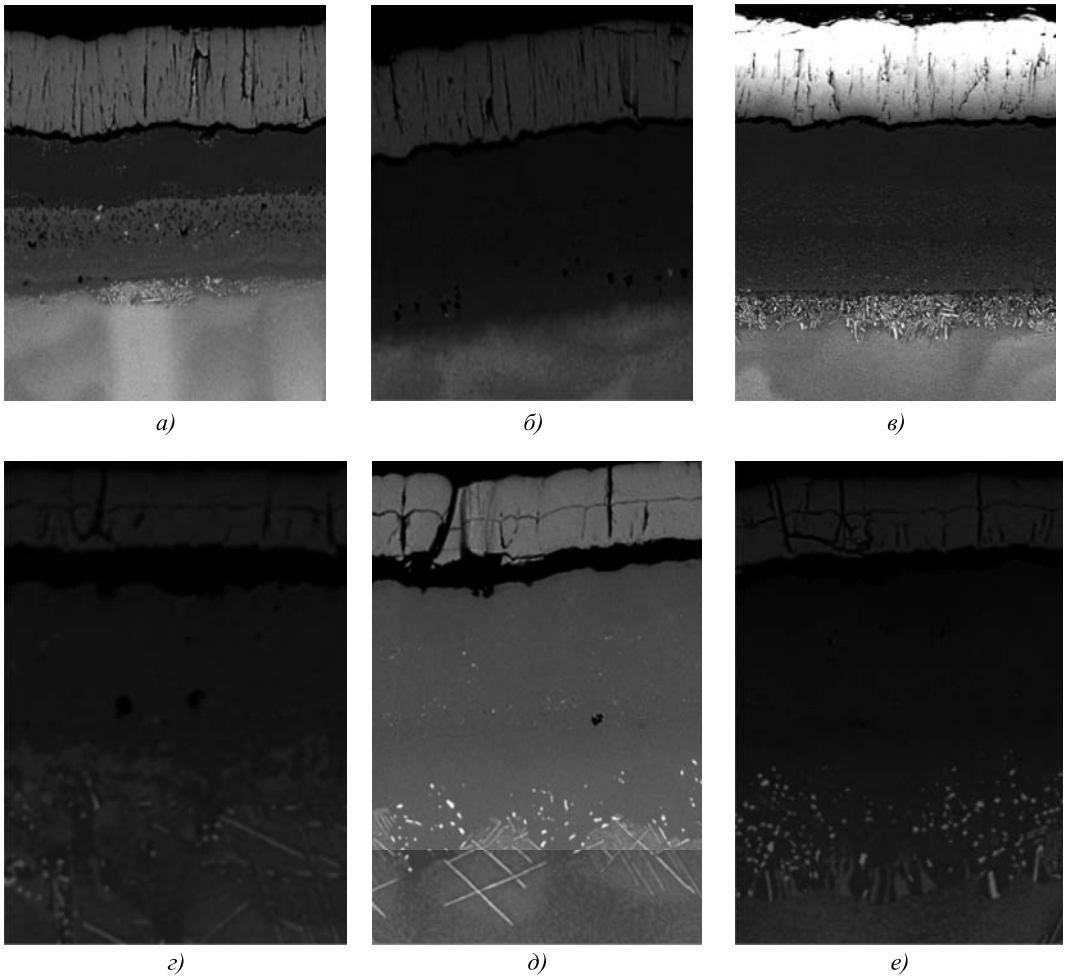



**Рис. 2. Микроструктура ТЗП на образцах из сплава ВЖМ5У в исходном состоянии (*а—в*) и после испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150 °С в течение 500 ч (*г—е*) (×300):**
*а*, *г* — ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4; *б*, *д* — ВСДП-3 + ВСДП-16 + ВЦС-4; *в*, *е* — ВСДП-4 + ВСДП-16 + ВЦС-4

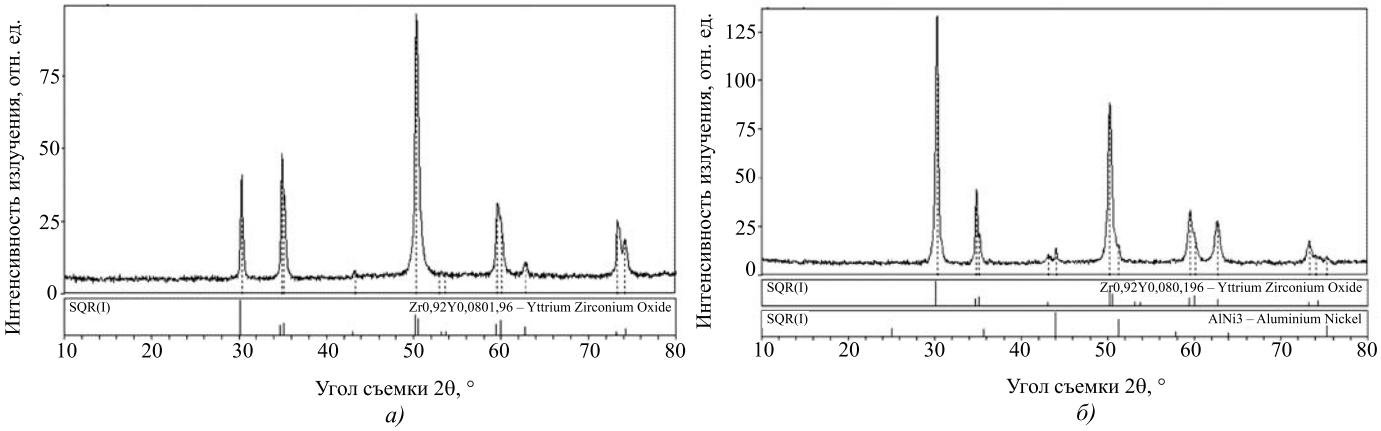



**Рис. 3. Дифрактограмма керамического покрытия ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4 в исходном состоянии (*а*) и после высокотемпературных испытаний (*б*)**

Результаты фазового анализа (рис. 3) показали, что основной фазой КС ТЗП независимо от типа жаростойкого подслоя до и после высокотемпературных испытаний является тетрагональный оксид $Zr_{0,92}Y_{0,08}O_{1,96}$. В образцах после испытаний также присутствуют следы фазы $Ni_3Al$ (от подложки).

Жаростойкие внутренние слои рассмотренных ТЗП имеют различия в структуре уже в исходном

состоянии, что связано с особенностями элементного состава никелевых сплавов. Для нанесения внутренних жаростойких слоев ТЗП, превосходящих по жаростойкости существующие серийные конденсационно-диффузионные покрытия, были выбраны никелевые сплавы, дополнительно легированные рением и танталом для повышения фазовой стабильности β(NiAl) и γ'($Ni_3Al$) — двух основных жаростойких фаз алюминидных жаростойких покрытий для рабочих лопаток турбин в области высоких температур 1150...1200 °С, а также гафнием, улучшающим адгезию защитной оксидной пленки к защищаемой поверхности. В сплавах ВСДП-41 и ВСДП-4 было снижено содержание хрома (~ 6...12 % мас.) по сравнению со сплавом ВСДП-3 (~ 20 % мас.) для исключения из структуры покрытий частиц твердого раствора на основе хрома, которые образуются во внешнем слое покрытия при формировании β-фазы, растворимость хрома в которой не превышает 2...3 %. Наличие таких включений снижает жаростойкость покрытия при температурах выше 1100 °С, так как оксид хрома нарушает сплошность защитной пленки на основе оксида алюминия, образующегося на поверхности β-фазы и обеспечивающего удовлетворительную адгезию КС ТЗП с подслоем. Различия в содержании хрома заметно влияют на структуру покрытий уже в исходном состоянии после стабилизирующей структуру вакуумной обработки ТЗП.

После испытаний на изотермическую жаростойкость при температуре 1150 °С керамический слой многослойного ТЗП сохраняет столбчатую структуру, но в результате высокотемпературной выдержки под керамическим слоем образуется оксидный слой (TGO — thermal growth oxide layer) толщиной 8...12 мкм (см. рис. 2, *г—е*). Структура жаростойкого соединительного слоя изменяется в связи с диффузией алюминия из покрытия в основу. Толщина жаростойкого слоя после испытаний составляет 90...100 мкм. С ростом толщины TGO-слоя на границе КС с жаростойким подслоем ТЗП возрастают нормальные напряжения, отрывающие керамику от подложки, и происходит скол КС (см. рис. 1). С ростом температуры испытаний от 1150 до 1200 °С интенсивность процесса

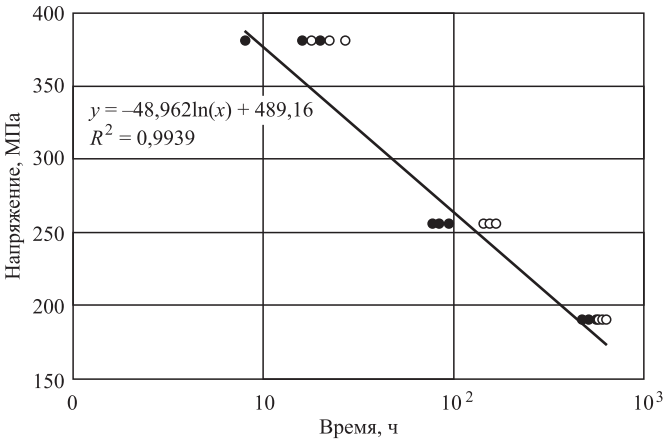



**Рис. 4. Долговечность образцов из сплава ВЖМ5У с ТЗП ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4 (○) и ВСДП-4 + ВСДП-16 + ВЦС-4 (●) при испытаниях на длительную прочность при температуре 1000 °С в сравнении с паспортными характеристиками сплава (сплошная линия)**

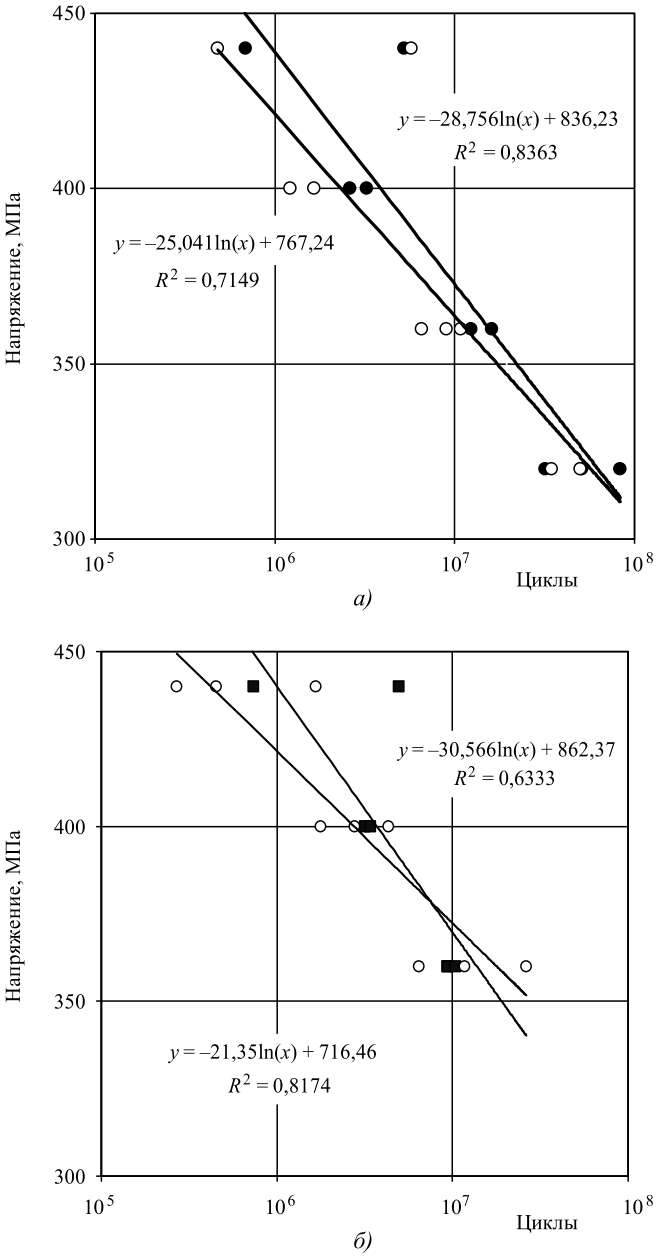



**Рис. 5. Результаты испытаний на усталость при температуре 900 °С образцов из сплава ВЖМ5У без покрытия (○) и с ТЗП:**
*а* — ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4 (●); *б* — ВСДП-4 + ВСДП-16 + ВЦС-4 (■)

окисления жаростойкого металлического подслоя возрастает и время до скола керамики сокращается с 500 до 100 ч.

Результаты испытаний на длительную прочность образцов из сплава ВЖМ5У с ТЗП при температуре 1000 °С в течение 10, 100 и 500 ч представлены на рис. 4, а исследований многоцикловой усталости при температуре 900 °С — на рис. 5.

Видно, что выбранные теплозащитные покрытия не оказывают отрицательного влияния на паспортные характеристики длительной прочности и сопротивления усталости сплава ВЖМ5У.

## Выводы

1. С использованием ионно-плазменной и магнетронной технологий получены теплозащитные покрытия с внутренним жаростойким слоем на основе конденсационно-диффузионных покрытий из никелевых сплавов системы NiCrAlTaReYHf, NiAlCrHf, NiCrAlReYHf и алюминиевого сплава AlNiY и внешним керамическим слоем системы ZrGdY, имеющим столбчатую структуру.

2. Проведены испытания на изотермическую жаростойкость образцов из сплавов ВЖМ5У с ТЗП при температурах 1150 и 1200 °С, и показано, что покрытие с жаростойким подслоем ВСДП-41 + ВСДП-16 с содержанием хрома 12 %, легированное рением, танталом, гафнием, сохраняет керамический слой $Zr_{0,92}Y_{0,08}O_{1,96}$ из циркониевого сплава ВЦС-4 в течение соответственно 500 и 100 ч.

3. Покрытие ВСДП-41 + ВСДП-16 + ВЦС-4 не оказывает отрицательного влияния на длительную прочность сплава ВЖМ5У при температуре 1000 °С в течение до 500 ч и на предел выносливости при температуре 900 °С на базе $2 \cdot 10^7$ циклов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Каблов Е.Н., Петрушин Н.В., Светлов И.Л., Демонис И.М.** Никелевые литейные жаропрочные сплавы нового поколения // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 36—52.
2. **Пат. 2402624 РФ.** Жаропрочный сплав на основе никеля / Е.Н. Каблов. Опубл. 16.06.2009.
3. **Пат. 2365656 РФ.** Жаропрочный литейный сплав на основе никеля и изделие, выполненное из него / Е.Н. Каблов. Опубл. 30.01.2008.
4. **Петрушин Н.В., Оспенникова О.Г., Висик Е.М. и др.** Жаропрочные никелевые сплавы низкой плотности // Литейное производство. 2012. № 6. С. 5—11.
5. **Каблов Е.Н., Мубояджян С.А.** Жаростойкие и теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2012. № S. С. 60—70.
6. **Kablov E.N., Muboyadzhyan S.A.** Heat-resistant coatings for the high-pressure turbine blades of promising gtes // Russian metallurgy (Metally). 2012. № 1. P. 1—7.
7. **Будиновский С.А., Матвеев П.В., Смирнов А.А.** Исследование жаростойкости литейных жаропрочных никелевых сплавов в области температур 1000—1200 °С // Авиационная промышленность. 2014. № 2. С. 48—52.
8. **Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Луценко А.Н.** Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Металлы. 2007. № 5. С. 23—34.
9. **Muboyadzhyan S.A., Kablov E.N.** Vacuum plasma technique of protective coatings production of complex alloys // МиТОМ. 1995. № 2. С. 15—18.
10. **Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Матвеев П.В.** Высокотемпературные жаростойкие покрытия и жаростойкие слои для теплозащитных покрытий // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 1. С. 17—20.
11. **Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М., Косьмин А.А.** Жаростойкие ионно-плазменные покрытия для лопаток турбин из никелевых сплавов, легированных рением // МиТОМ. 2008. № 6. С. 31—36.
12. **Гаямов А.М., Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Косьмин А.А.** Выбор жаростойкого покрытия для жаропрочного никелевого рений-рутений содержащего сплава марки ВЖМ4 // Труды ВИАМ. 2014. № 1.
13. **Чубаров Д.А., Будиновский С.А.** Выбор керамического материала для теплозащитных покрытий лопаток авиационных турбин на рабочие температуры до 1400 °С // Труды ВИАМ. 2015. № 4.
14. **Чубаров Д.А., Матвеев П.В.** Новые керамические материалы для теплозащитных покрытий рабочих лопаток ГТД // Авиационные материалы и технологии. 2013. № 4. С. 43—46.
15. **Каблов Е.Н., Мубояджян С.А.** Теплозащитные покрытия для лопаток турбины высокого давления перспективных ГТД // Металлы. 2012. № 1. С. 5—13.
16. **Каблов Е.Н., Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А.** Ионно-плазменные защитные покрытия для лопаток газотурбинных двигателей // Конверсия в машиностроении. 1999. № 2. С. 42—47.
17. **Мубояджян С.А., Будиновский С.А., Гаямов А.М., Смирнов А.А.** Получение керамических теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД магнетронным методом // Авиационные материалы и технологии. 2012. № 4. С. 3—8.
18. **Будиновский С.А., Мубояджян С.А., Гаямов А.М.** Современное состояние и основные тенденции развития высокотемпературных теплозащитных покрытий для рабочих лопаток турбин авиационных ГТД // Авиационная промышленность. 2008. № 4. С. 33—37.
19. **Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В.** Технология получения ионно-плазменных жаростойких подслоев с повышенным содержанием алюминия для перспективных ТЗП // Авиационные материалы и технологии. 2014. № 5. С. 56—60.
20. **Будиновский С.А., Чубаров Д.А., Матвеев П.В.** Современные способы нанесения теплозащитных покрытий на лопатки газотурбинных двигателей (обзор) // Авиационные материалы и технологии. 2014. № S5. С. 38—44.

УДК 621.792(075.4)

**В.Н. Гадалов, Д.С. Алымов, И.А. Макарова, Е.А. Ельников**
*(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)*
*E-mail: gadalov-vn@yandex.ru*

# Изучение порошков титановых сплавов, полученных электроэрозионным диспергированием отходов металлообработки

*Исследован порошок титанового сплава ОТ4, полученный электроэрозионным диспергированием отходов металлообработки. В исходном состоянии сплав имеет структуру α-твердого раствора. Порошок сплава, полученный электроэрозионным диспергированием в керосине, имеет мелкокристаллическую структуру с неразвитыми осями дендритов второго порядка. Обнаружены также частицы с полостью внутри. Получены частицы размером от 0,2 до 0,00001 мм с максимумом распределения 3 мкм.*

***Ключевые слова:*** *порошок, титан, сплав, электроэрозионное диспергирование.*

*The titanium OT-4 alloy powder obtained by electric discharge dispersion of the metal working waste is studied. In the initial state the alloy has α-solid solution structure. The powder-alloy obtained by electric discharge dispersion in kerosene has fine-grained structure with undeveloped two-fold dendrites axes. The cavity inside particles are also found. Particles from 0.2 to 0.00001 mm in size with distribution maximum of 3 μm are obtained.*

***Keywords:*** *powder, titanium alloy, electric discharge dispersion.*

Широкое применение порошковой металлургии титановых сплавов сдерживается нестабильностью свойств получаемых изделий. Один из недостаточно изученных этапов получения изделий — процесс получения быстрой кристаллизацией порошков на основе твердых растворов. Это не позволяет разработать законченные технологические процессы изготовления порошков и изделий из них [1].

Получение легированных спеченных сплавов на основе титана путем смешивания чистых порошков титана и легирующих элементов, с последующим прессованием и спеканием, имеющих такие же уровни прочности и ударную вязкость, как и литые деформируемые сплавы, легированные алюминием и тугоплавкими β-стабилизирующими элементами, имеет несколько научных проблем. Одна из них — это проблема жидкофазного спекания смесей порошков алюминия и титана с другими компонентами. Вторая проблема связана с растворением тугоплавких легирующих элементов и распределением их по фазам в спеченном сплаве, третья заключается в повышении содержания примесных элементов (особенно кислорода) в спеченном сплаве.

Принципиально отличается от способа смешивания чистых порошков способ получения гранул из расплава нужного стехиометрического состава, что позволяет частично решить ряд проблем классической порошковой технологии и получить после спекания отдельные свойства, более высокие, чем у литых исходных материалов.

Широкий диапазон размеров частиц (от 630 до 150 мкм), получаемый при разбрызгивании сплава по гранульной технологии, создает условия для возникновения различных структурных состояний от дендритной структуры для гранул размером 200...350 мкм, до микрокристаллической структуры для гранул размером 150...200 мкм. Различие микроструктур в гранулах различных размеров объясняется разной скоростью охлаждения. При этом охлаждение выше некоторой критической скорости приводит к неоднородности твердого раствора, которая близка к неоднородности расплава перед кристаллизацией.

Неразвитость дендритной структуры (дендриты имеют только ось первого порядка, причем небольшой протяженности) в титановых сплавах, легированных только алюминием или оловом, указывает на влияние химического состава при быстрой кристаллизации. Выделение второй фазы из твердого раствора настолько дисперсное, что обнаруживается только методами электронной микроскопии. Рентгеноструктурный анализ не обнаруживает присутствие β-фазы, но обнаруживает α′- и α″-фазы. Гранулы, имеющие размер 630 мкм, не содержат дендритных ячеек и в них не обнаруживается α′-фаза.

Гранулирование титановых сплавов создает высокие скорости охлаждения из жидкого со-

стояния, обеспечивает формирование различных структур гранул со значительной химической микронеоднородностью и большими микроискажениями, которая может вызывать рекристаллизацию без предварительной деформации. В связи с этим представляет большой интерес исследование возможностей получения термически упрочняемых псевдо α′-сплавов путем их диспергирования до более мелких частиц порядка нескольких микрометров или долей микрометра, когда достигается более высокая скорость охлаждения, чем при технологии гранулирования.

Для частиц размерами от нескольких микрометров и менее микрометра, полученных быстрой кристаллизацией, могут наблюдаться аномальные свойства. Также представляют интерес специфические свойства ультрадисперсной среды, в которой должны учитываться не только свойства частиц, но и характер их взаимодействия друг с другом. Один из важных показателей — средний размер частиц и функция распределения размеров. Характер распределения частиц по размерам определяется условиями получения частиц и зависит от способа получения порошка. При любом способе получения важными являются исследования факторов, влияющих на средний размер частиц, среднеквадратическое отклонение и коэффициент вариации распределения. Распределение частиц по размерам чаще всего характеризуется нормальным или логарифмически нормальным распределением. При более упрощенном подходе к оценке свойств ансамбля частиц можно просто учитывать вклад каждой частицы определенного размера в виде простой суммы вкладов.

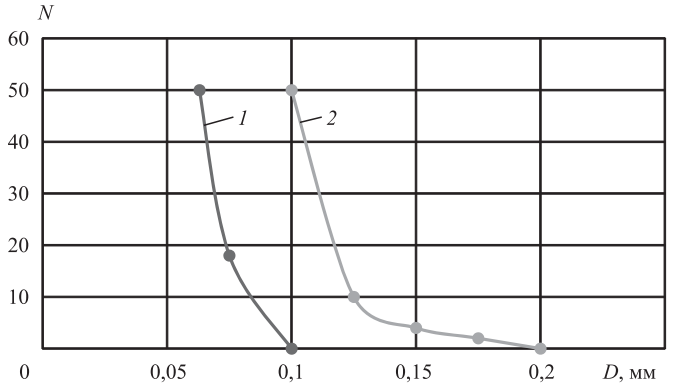



**Рис. 1. Распределение частиц в порошке сплава ОТ4, полученных электроэрозионным диспергированием, для фракции, мм:**
*1* — 0,1...0,063; *2* — 0,2...0,1

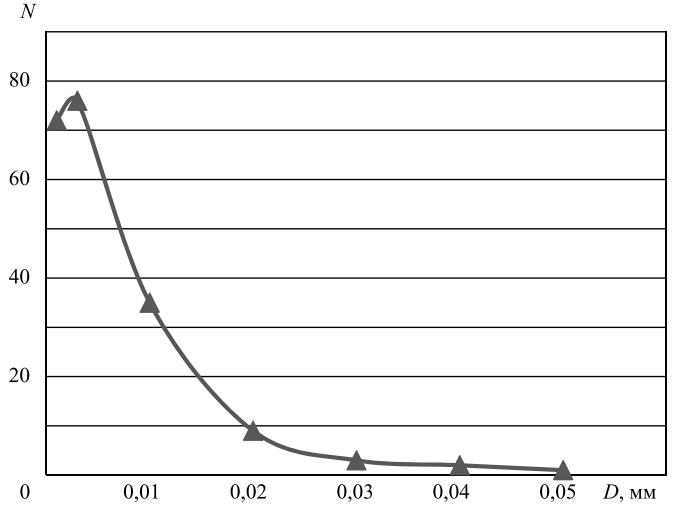



**Рис. 2. Распределение частиц по размерам в порошке сплава ОТ4, полученного электроэрозионным диспергированием, для фракции менее 0,05 мм**

В настоящей работе исследовали сплав ОТ4, содержащий 3,5 % алюминия и 1,5 % марганца, который подвергли электроэрозионному диспергированию в среде керосина. Электроэрозионное диспергирование, как способ получения порошков-сплавов, позволяет получать быстрозакристаллизованные частицы сплава различного размера в воде, спиртах, углеродсодержащих жидкостях. В исходном состоянии сплав состоит из α-твердого раствора. Механическими свойствами сплава можно управлять измельчением зерна при фазовой перекристаллизации, что повышает пластические свойства сплава. Управление размером и свойствами зерна этого сплава перспективно для технологий порошковой металлургии.

С помощью электрической эрозии в среде керосина был получен порошок-сплав с диапазоном частиц 0,2...0,00001 мм. В процентном отношении вклад каждой фракции составил: 0,2...0,1 мм — 2,5 %; 0,1...0,063 мм — 4,2 %; 0,063...0,05 мм — 6,3 %; менее 0,05 мм — 87 %. Используя методику [2] определения распределения частиц по параметрам в пределах фракций, составляющих 2,5; 4,2; 6,3; 87 %, были проведены расчеты и определены значения основных параметров, характеризующих распределение. Кривые распределения приведены на рис. 1.

Анализ фракционного состава показал, что в интервалах размеров частиц 0,2...0,1 и 0,1...0,063 мм нет заметного максимума на кривой зависимости числа частиц *N* от их размера *D*. Это, возможно, обусловлено как незначительной долей этих частиц в общем объеме, так и характерным для данного способа получения смещением максимума распределения в область размеров частиц менее 1 мкм. Этот вывод подтверждается видом кривой распределения для фракции менее 0,05 мм. Как видно из зависимости, показанной на рис. 2, для

этой фракции максимум распределения по размерам приходится на $D = 3$ мкм. На характер этого распределения, по-видимому, влияет способ очистки порошка от остатков жидкости среды диспергирования и продуктов пиролиза, при котором жидкость с продуктами эрозии разбавляют чистым бензином, отстаивают и сливают, сливают растворимые продукты эрозии и частицы сажи. Поэтому частицы сплава, имеющие минимальные размеры во взвешенном состоянии, уходят вместе с частицами сажи.

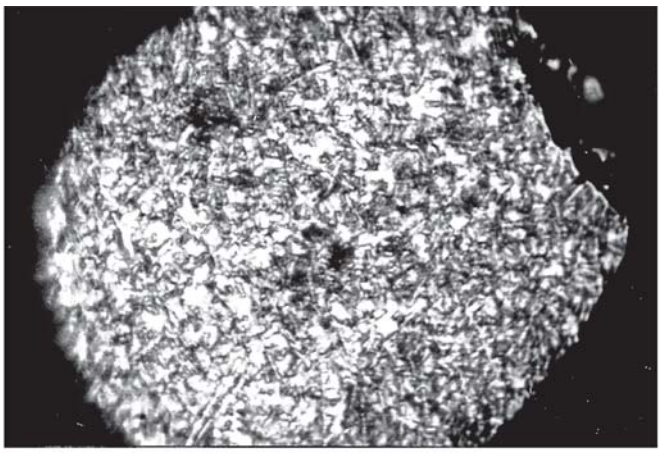
Таким образом, реальное распределение размеров частиц при данном способе получения порошка должно иметь максимум, смещенный в сторону меньших размеров, т.е. получаемые порошки являются ультрадисперсными.

Существенное влияние на распределение частиц порошка по размерам вносит процесс коагуляции ультрадисперсных частиц на стадии образования продуктов эрозии. Исследование проб порошков самых тонких отстоев на электронном микроскопе теневым методом показывает, что характерной формой образующихся частиц, имеющих размеры в несколько сотен нанометров, является шарообразная форма, возможно даже ограненная. Но так как именно частицы таких размеров при высоких температурах, близких к температурам плавления сплава, наиболее активны к взаимодействию между собой, то значительная их часть образует более крупные неправильной формы частицы. Эти укрупненные частицы при температурах их образования уже обладают пониженной свободной энергией в сравнении с составляющими их частицами и менее активны. Но при комнатных температурах эти частицы, полученные в результате коагуляции, обладают еще достаточной избыточной энергией, так как в них реализуются неравновесные состояния, обуславливаемые высокими скоростями охлаждения и температур образования.

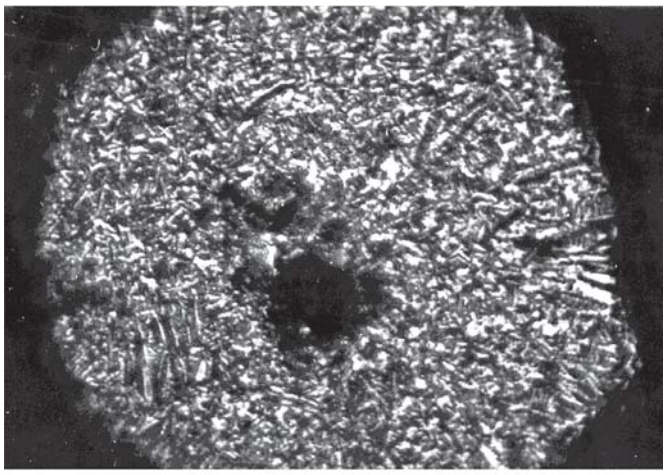
Таким образом, кривые частиц распределения по размерам несут информацию не только геометрической статистики, но и характеризуют степень неравномерности состояния частиц, степень активности к взаимодействию частиц между собой при различных температурных условиях и в целом весь процесс диспергирования сплава данным способом.

Изменения условий образования частиц приведет к изменению вида кривых распределения. Исследование морфологии частиц подтверждает зависимость параметров распределения от условий образования частиц.

Частицы крупных фракций, образованные из жидкой фазы, имеют сферическую форму (рис. 3, *а*) и иногда встречаются пустотелые или с центральной порой (рис. 3, *б*), но среди них нет скоагулированных. Частицы дисперсной фракции представлены скоагулированными и сферическими. Причем скоагулированые частицы составляют незначительную долю в объеме всей фракции. Об этом свидетельствуют крутой характер падения кривой в сторону максимума в сторону больших размеров частиц и пологий характер падения кривой в сторону ультрадисперсных частиц. Процесс коагуляции имеет наибольшую вероятность протекания в парогазовой фазе. При изоляции жидкостью частичек расплава, сконденсированных из паровой фазы, активность их к взаимодействию между собой резко снижается, а сферическая форма может быть обусловлена действием всестороннего давления жидкости и высокой пластичности частиц при переходе из жидкого состояния в твер-



*а)*



*б)*

**Рис. 3. Микроструктура частиц (0,1 мм) порошка сплава ОТ4, полученного электроэрозионным диспергированием (×125):**
*а* — безпористая; *б* — с внутренней порой

дое при температуре кристаллизации и затвердевания. Этим объясняется морфология дисперсных и ультрадисперсных фракций порошка-сплава.

Например, совсем иной вид зависимости числа частиц от их размеров в пробе порошка титана, полученного восстановлением гидридно-кальциевым способом. Так как в случае получения порошка сплава ОТ4 в основу метода положен физический процесс, а порошок титана был получен в результате восстановления хлорида титана гидридом кальция химическим путем.

Полученное в данной работе распределение частиц по размерам присуще вполне конкретному режиму диспергирования сплава ОТ4 и не отражает в полной мере всех возможностей этого метода. Прерывистый характер эрозии позволяет вести процесс с варьированием в широком диапазоне длительности импульсов и энергии импульса. Требование достаточной проводимости у электродов обеспечивает возможность применения в качестве диспергируемых сплавов как идентичных по химическому составу, так и имеющих различный химический состав при одинаковой или различной основе. Это открывает возможности получения оригинальных составов порошков сплавов.

Возможность ведения процесса с униполярным характером эрозии или с одновременной эрозией на обоих электродах создает предпосылки к увеличению производительности процесса диспергирования.

Разработка методов интенсификации процесса порошкообразования и диспергирования жидкой фазы позволит значительно сместить максимум на кривой распределения и сузить ширину распределения размеров частиц в ультрадисперсной области.

Для этой цели перспективными могут оказаться установки, в которых используется циркуляция изолирующей жидкости с достаточно высокими скоростями потока через эрозионную зону реактора. Также перспективно применение кавитирующего режима проточной изолирующей жидкости, так как при кавитационных явлениях в жидкости она сама обладает высокими диспергирующими свойствами [1]. При возникновении кавитации в изолирующей жидкости диспергированию будут подвержены частицы скоагулированные и крупные, находящиеся в жидком состоянии. Дробление этих частиц на более мелкие, имеющие размеры несколько сотен нанометров, приведет к качественным изменениям в структуре частиц в результате увеличения скорости охлаждения и кристаллизации сплава. Таким образом, повысится степень микронеоднородности при сужении интервала гранулометрического состава, что приведет к интенсификации процессов массопереноса и спекания в таких системах.

Наряду с технологическими свойствами ультрадисперсных порошков, имеющих большое значение при разработке технологического процесса получения изделий с заданными свойствами, необходимо изучить все превращения, происходящие в частицах порошка при изменении температур процесса.

Применение термографии для исследования характеристик процессов фазовых превращений в частицах порошка может быть оправдано тем, что по характерным изменениям термографической кривой в большинстве случаев легко определить природу того или иного эффекта. Возможности данного метода в сочетании, например, с рентгеноструктурным анализом и электронной микроскопией, позволяют следить за всеми изменениями, происходящими в веществах в любом интервале температур, и наиболее достоверно выяснить природу превращений [4—7].

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Исследование** быстрозакристалллизованных порошков на основе титана и никеля, полученных электроэрозионным диспергированием: возможности их компактирования / В.Н. Гадалов, С.В. Сафонов, А.А. Толкушев и др. М.: АРГАМАК-МЕДИЯ, 2015. 119 с.

2. **Чернявский К.С.** Стереалогия в металловедении. М.: Металлургия, 1997. 280 с.

3. **Металлография** металлов, порошковых материалов и покрытий, полученных электроискровым способом / В.Н. Гадалов, В.Г. Сальников, Е.В. Агеев и др. М.: Инфа-М, 2011. 468 с.

4. **Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Семенихин Б.А.** Рентгеноструктурный анализ порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердых сплавов // Заготовительные производства в машиностроении. 2011. № 2. С. 42—44.

5. **Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Серебровский В.И.** Исследование гранулометрического состава порошков, получаемых электроэрозионным диспергированием твердого сплава и используемых при восстановлении и упрочнении деталей автотракторной техники // Вестник Курской гос. сельхоз. академии. 2010. № 4. С. 76—79.

6. **Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Семенихин Б.А.** Рентгеноспектральный микроанализ частиц порошков, полученных электроэрозионным диспегированием твердого спалава // Упрочняющие технологии и материалы. 2011. № 2. С. 13—16.

7. **Агеев Е.В., Гадалов В.Н., Романенко Д.Н.** Исследование физико-технологических свойств порошков, полученных электроэрозионным диспергированием твердого сплава // Вестник Воронежского гос. тех. ун-та. 2011. Т. 7. № 3. С. 101—106.

УДК 66.084.2

**В.А. Лебедев, С.Ю. Штынь, Ю.Г. Чернега, А.А. Занин**
*(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)*
*E-mail: va.lebidev@yandex.ru*

# Энергетическая модель обеспечения качества покрытий в вибрационных технологических системах

*Представлены результаты экспериментального обоснования энергетической модели обеспечения качества покрытий в вибрационных технологических системах. Установлена приемлемость модели для практического применения на стадии технологической подготовки производства для управления механохимическим синтезом процесса в целях решения ряда оптимизационных технологических задач, направленных на повышение качества и эксплуатационных свойств поверхности деталей.*

***Ключевые слова:*** *вибрационная технологическая система, покрытие, энергия, адгезионная прочность, индентор, технологическая среда, качество.*

*The results of experimental study of the energy model for ensuring of coatings quality in vibration technological systems are presented. The acceptability of the model for practical application at the stage of technological preparation of production for controlling of the mechanochemical synthesis of the process is established for solving of optimization technological problems aimed to improvement of the quality and service properties of the parts surface.*

***Keywords:*** *vibration technological system, coating, energy, adhesive strength, indenter, technological environment, quality.*

## Введение

Опыт, накопленный в области нанесения вибрационных механохимических покрытий (ВиМХП) [1, 2], показал, что механическая активация химических процессов путем ударно-импульсного воздействия свободно движущимися инденторами позволяет повысить эффективность процесса формирования покрытий и получить дополнительные технико-экономические преимущества за счет возможности обработки большого количества деталей, равномерного и всестороннего воздействия на поверхности различной кривизны, широкого спектра изменения (регулирования) режимов обработки, применения менее агрессивных составов технологических сред (жидких, твердых, газообразных и пастообразных и т.п.), относительно несложной конструкции технологического оборудования.

Основным показателем качества любого покрытия, наносимого на поверхность металла, является адгезия, которая характеризует прочность сцепления между двумя материалами, возникновение связи между поверхностными слоями двух разнородных веществ, приведенных в соприкосновение.

В работе [2] предложена зависимость, раскрывающая механизм механохимического синтеза формирования покрытий в условиях вибрационных технологических систем и определяющая энергетическое состояние локальных микрообъемов на границе покрытие—подложка. Эта зависимость учитывает вклад в процесс формирования ВиМХП повышения связанной энергии за счет роста энтропии, увеличения энергии упруго-пластических искажений кристаллической решетки в результате механического воздействия инденторов рабочей среды, изменения внутренней энергии поверхностного слоя, модифицированного в результате химического взаимодействия контактирующих сред.

Используя эту зависимость и приравняв мольную энергию, обеспечивающую условия образования модифицированного локального микрообъема на границе раздела покрытие—подложка, к средней энергии единицы связи, определяющей его адгезию, предложена энергетическая модель технологической системы вибрационной механохимической обработки, обеспечивающей получение покрытия на поверхности материала требуемой по условиям эксплуатации прочности:

$$TR\ln\left(\frac{t}{\tau_0}\right)+V_m\cdot 10^{-6}\left(\frac{\sigma^2}{2E}+k_a\sigma d/D\right)-\Delta\mu^0=G, \quad (1)$$

где $T$ — абсолютная температура;

$R$ — универсальная газовая постоянная, $R$ = = 8,31 Дж/(моль·К);

$t$ — время пребывания системы в состоянии механохимического синтеза;

$\tau_0$ — период тепловых колебаний атомов;

$V_m$ — молярный объем, мм$^3$/моль;

σ — эффективное напряжение, МПа;

$E$ — модуль упругости, МПа;

$k_a$ — коэффициент аккумулирования механической энергии, который показывает долю запасаемой энергии относительно всей затраченной работы ($k_{ам}$ = 0,7);

$d$ — диаметр пластического отпечатка, формируемый на поверхности при соударении индентора рабочей среды диаметром $D$;

$\Delta\mu^0$ — изменение свободной энергии Гиббса в процессе химического взаимодействия среды покрытия с металлом, кДж/моль;

$G$ — адгезионная прочность связи покрытие—подложка, Дж/моль.

Левая часть уравнения (1), представленная в виде функции времени, является кинетическим уравнением вибрационной механохимической обработки, которое описывает процесс роста внутренней энергии поверхностного слоя, модифицированного в процессе нанесения покрытия.

**Цель работы** — экспериментальная проверка адекватности энергетической модели для оценки качества покрытий, полученных в вибрационных технологических системах.

## Методика экспериментальных исследований

Для экспериментальных исследований был выбран процесс нанесения цинкового покрытия для повышения коррозионной стойкости поверхности деталей. Покрытия наносили на цилиндрические образцы, изготовленные из сталей 25, 35, 45, диаметром 10 мм, толщиной 5 мм и с параметром шероховатости поверхности $Ra$ = 1,25 мкм.

В качестве технологической среды покрытия использована цинковая суспензия, состоящая из воды, порошка Zn марки ПЦ-2 (ГОСТ 3640—94), содержащего, %: Zn — 99,95; Pb — 0,036; Cd — 0,01; Sn — 0,004. Приготовление цинковой суспензии предусматривало растворение в 1 л воды 50...150 г порошка хлористого цинка $ZnCl_2$ и 50...250 г порошка Zn марки ПЦ-2, при этом вязкость получаемого раствора должна быть в пределах $\geqslant 8{,}94 \cdot 10^{-4}$ Па·с.

Для активации процесса формирования покрытия поверхности металлических образцов использовали инденторы в виде металлических шариков диаметром 2...6 мм и фарфоровых шариков диаметром 6...9 мм.

Нанесение вибрационных механохимических покрытий проводили в цилиндрической рабочей камере объемом 0,5 л. Рабочую камеру устанавливали на виброплатформе опытно-экспериментальной вибрационной установки УВГ 4×10, имеющей следующие технические характеристики: вибросистема — деболансно-пружинная; диапазон частоты колебаний — 15...33 Гц; диапазон амплитуды колебаний — 0...5 мм. Время обработки составляло 10...20 мин.

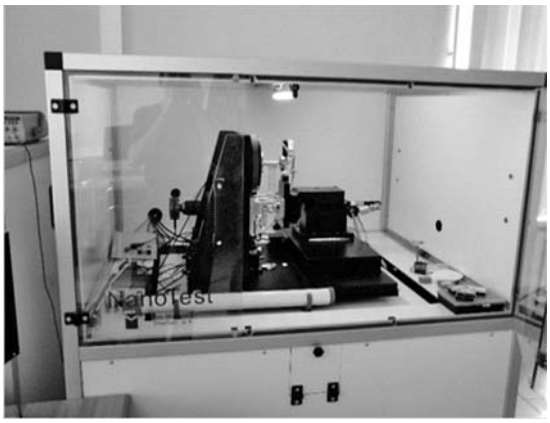



**Рис. 1. Установка Nanotest 600 platform**

Адгезионную прочность вибрационного механохимического покрытия определяли на установке Nanotest 600 platform (рис. 1). Данный измерительный комплекс позволяет определять на образцах и покрытиях толщиной от 20 нм твердость, модуль Юнга, адгезию и износостойкость покрытия.

Для измерения адгезии образец с покрытием размещали под индентором (рис. 2), задавали скорость перемещения столика, начальную и конечную нагрузку. В процессе испытания образец перемещался с постоянной скоростью, нагрузка на алмазный индентор увеличивалась линейно. В качестве индентора использовали геометрически и физически аттестованную пирамиду Берковича с углом при вершине 65° и радиусом закругления 200 нм. Тест заканчивался при достижении заданной конечной нагрузки, в конце теста происходило автоматическое снятие нагрузки.

О нагрузке, при которой происходит разрушение покрытия, свидетельствует резкий рост силы трения (отображается графически). Для подт-

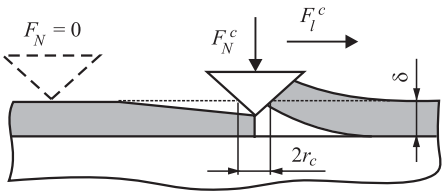



**Рис. 2. Схема определения адгезии пленки к подложке методом приложения комбинированной нормальной и латеральной нагрузки**

верждения результата испытания образец исследуют под оптическим микроскопом.

Прочность адгезии при использовании метода NI рассчитывается по зависимости, связывающей ее с критической латеральной нагрузкой $F_l^c$ начала отрыва пленки от подложки следующим образом:

$$G = \frac{(F_l^c)^2 \delta}{\pi r_c^4 E_f}, \qquad (2)$$

где δ — толщина покрытия; $r_c$ — радиус пятна контакта в момент начала отслаивания покрытия; $E_f$ — модуль Юнга покрытия.

Экспериментальные значения адгезии сравнивали с расчетными, определяемыми по формуле (1) для соответствующих условий нанесения покрытий.

## Результаты исследований и их обсуждение

Основными технологическими параметрами, определяющими уровень механической активации процесса нанесения покрытий, являются: амплитуда, частота вибрации рабочей камеры, а также гранулометрические характеристики и вид инденторов, обеспечивающих ударно-импульсное воздействие на поверхность.

*Таблица 1*

**Изменения адгезионной прочности *G*, Дж/моль, цинкового покрытия на стали 35 в зависимости от частоты колебаний рабочей камеры и материала инденторов при амплитуде колебаний *A* = 2,5 мм и *t* = 45 мин**

| Номер образца | Фарфоровые инденторы | | | Стальные инденторы | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Частота колебаний, Гц | | | | | |
| | 25 | 33 | 45 | 25 | 33 | 45 |
| 1 | 63,0 | 65,5 | 66,50 | 66,0 | 68,2 | 69,0 |
| 2 | 63,1 | 65,8 | 66,80 | 66,2 | 68,3 | 69,2 |
| 3 | 62,7 | 67,0 | 67,00 | 66,1 | 68,0 | 69,0 |
| 4 | 63,5 | 67,2 | 67,50 | 66,3 | 67,7 | 69,0 |
| 5 | 63,7 | 66,4 | 68,00 | 66,5 | 67,8 | 68,0 |
| 6 | 63,9 | 66,6 | 67,20 | 66,9 | 67,9 | 68,2 |
| 7 | 64,1 | 66,2 | 66,90 | 67,0 | 67,7 | 68,6 |
| 8 | 64,3 | 66,0 | 66,30 | 66,8 | 68,1 | 68,7 |
| 9 | 64,5 | 66,2 | 65,95 | 66,3 | 67,6 | 68,9 |
| 10 | 64,2 | 66,5 | 66,55 | 66,9 | 67,4 | 68,5 |

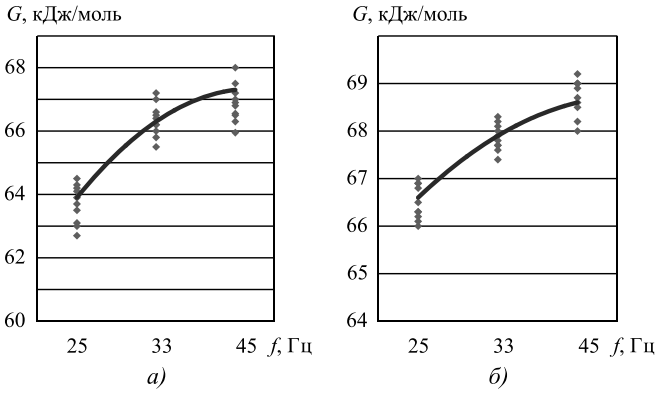



**Рис. 3. Зависимость адгезионной прочности покрытия сталь 35—Zn от частоты колебания рабочей камеры и материала инденторов:**
*а* — фарфор; *б* — сталь

Результаты влияния уровня механической активации процесса на адгезионную прочность покрытия приведены в табл. 1, а характерная для них закономерность показана на рис. 3.

В табл. 2 представлены результаты исследований влияния концентрации химического состава технологической среды на адгезионную прочность покрытия, а на рис. 4 — характерная для них закономерность.

*Таблица 2*

**Изменения адгезионной прочности *G*, Дж/моль, цинкового покрытия на сталях 25 и 35 в зависимости от концентрации цинкового раствора в условиях ВиМХО, инденторы — фарфоровые, *A* = 2,5 мм, *f* = 33 Гц, *t* = 45 мин**

| Номер образца | Сталь 25 | | | Сталь 35 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | Концентрация порошка цинка, г/л | | | | | |
| | 50 | 150 | 250 | 50 | 150 | 250 |
| 1 | 64,0 | 70,0 | 70,5 | 65,2 | 70,4 | 70,6 |
| 2 | 64,8 | 70,4 | 70,9 | 65,5 | 70,2 | 70,5 |
| 3 | 64,7 | 70,3 | 71,0 | 65,5 | 70,4 | 70,9 |
| 4 | 64,9 | 70,2 | 71,2 | 65,3 | 70,5 | 71,0 |
| 5 | 64,6 | 69,9 | 70,9 | 65,6 | 70,5 | 71,0 |
| 6 | 64,2 | 69,7 | 70,8 | 65,3 | 70,3 | 70,9 |
| 7 | 64,3 | 70,0 | 71,3 | 65,4 | 70,2 | 70,9 |
| 8 | 64,1 | 70,5 | 71,0 | 65,6 | 70,5 | 70,9 |
| 9 | 64,2 | 70,2 | 70,6 | 65,6 | 70,3 | 70,8 |
| 10 | 64,6 | 70,1 | 70,5 | 65,5 | 70,1 | 70,8 |

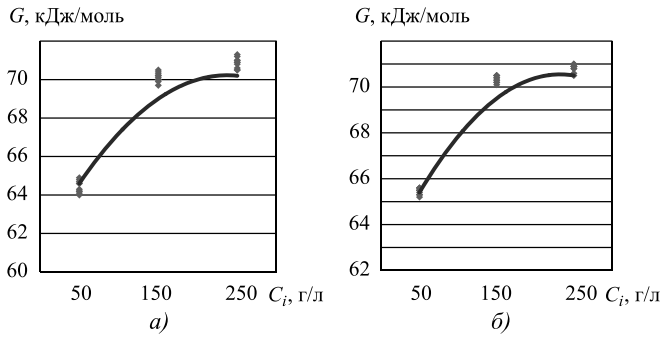



**Рис. 4. Зависимость адгезионной прочности цинкового покрытия от концентрации цинкового раствора для образцов из стали марок 25 (*а*) и 35 (*б*)**

Результаты проведенных экспериментальных исследований показали, что адгезионная прочность цинкового ВиМХП при увеличении частоты вибрации рабочей камеры, обуславливающей механическую активацию процесса, монотонно увеличивается с переходом в неубывающую функцию. Это подтверждает тот факт, что при повышении уровня механического воздействия инденторов на обрабатываемую поверхность детали растет плотность внутренней энергии в поверхностном слое, что ведет к повышению уровня энергии взаимодействия материала детали и частиц наносимого покрытия и, соответственно, к увеличению адгезионной прочности между ними, обусловленной ростом плотности дефектов структуры материала.

Уменьшение адгезионной прочности при дальнейшем увеличении уровня механического воздействия объясняется тем, что уровень энергетического состояния поверхности образца приближается к предельному значению материала.

Использование в качестве инденторов шаров из стали позволило достичь прироста адгезионной прочности в среднем от 0,5 до 3 % по отношению к обработке с фарфоровыми шарами. Это объясняется тем, что при воздействии стальными шарами уровень механической активации поверхности детали повышается за счет большей массы стальных инденторов. Также установлено, что при увеличении механического воздействия на 80 % рост адгезионной прочности составляет от 1,06 до 1,10 раза.

Повышение концентрации цинка в технологической среде от 50 до 250 г/л также способствует увеличению адгезионной прочности покрытия, что объясняется ростом числа химических связей с обрабатываемой поверхностью образцов. Снижение роста адгезионной прочности при дальнейшем увеличении концентрации технологической среды вызвано уменьшением свободных для образования химических связей частиц, число которых ограничено площадью поверхности образцов.

Из результатов исследований следует, что экспериментальные значения адгезионной прочности расходятся с расчетными значениями. Это свидетельствует о том, что используемая для оценки адгезионной прочности модель учитывает некоторые входящие параметры процесса с постоянной величиной, без учета их возможной нестабильности в реальном производстве, а также не учитывает дополнительные факторы, оказывающие влияние на химическое взаимодействие компонентов технологической среды с поверхностью детали. Вместе с тем близость величин в пределах 6...16 % подтверждает целесообразность использования энергетической модели (1) для оценки адгезионной прочности наносимого покрытия.

## Заключение

Полученная энергетическая модель технологической системы нанесения покрытий при вибрационной механохимической обработке позволяет на стадии технологической подготовки производства путем управления механохимическим синтезом процесса решить ряд оптимизационных технологических задач по обеспечению качества и эксплуатационных свойств поверхности деталей.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Иванов В.В., Худалей С.Н. и др.** Вибрационная механохимия в процессах отделочно-упрочняющей обработки и покрытий деталей машин. Ростов н/Д.: Издательский центр ДГТУ, 2012. 204 с.

2. **Энергетическое** условие формирования вибрационных механохимических покрытий и оценка их адгезионной прочности / В.А. Лебедев, В.В. Иванов, С.Ю. Штынь, И.В. Давыдова // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 8. С. 34—39.

УДК 621.9.048

**[1]А.А. Хлыбов, [2]М.О. Кувшинов, [1]М.С. Камаев**
*([1]Нижегородский государственный технический университет, г. Н. Новгород,*
*[2]ФГУП "Российский Федеральный Ядерный Центр —*
*Всероссийский научно-исследовательский институт экспериментальной физики", г. Саров)*
*E-mail: hlybov_52@mail.ru*

# Повышение физико-механических характеристик поверхностного слоя титанового сплава ВТ16 методом ультразвуковой ударной обработки*

*Исследованы закономерности пластической деформации при ультразвуковой ударной обработке (УУО) на примере титанового сплава ВТ16. Показано, что при УУО происходит изменение физико-механических характеристик поверхностного слоя.*

***Ключевые слова:*** *поверхностное пластическое деформирование, титановый сплав, микроструктура, нанокристаллическая структура, фазовый состав, микротвердость, шероховатость, сжимающие остаточные напряжения.*

*The laws of plastic deformation during ultrasonic shock processing on the example of the titanium VT16 alloy are investigated. It is shown that during the ultrasonic shock processing there is change in the physical and mechanical characteristics of the surface layer.*

***Keywords:*** *surface plastic deformation, titanium alloy, microstructure, nanocrystalline structure, phase composition, microhardness, roughness, compressive residual stresses.*

## Введение

Титан и его сплавы нашли широкое применение в авиационной, ракетной и морской судостроительной технике ввиду своих высоких механических свойств. Высокая стоимость титана и его сплавов во многих случаях компенсируется их большей работоспособностью, а в некоторых случаях они являются единственным материалом, из которого можно изготовить оборудование или конструкции, способные работать в конкретных условиях. Для придания ряда функциональных свойств таким сплавам необходима модификация существующих или разработка новых технологий обработки их поверхности.

Работоспособность и надежность деталей, узлов, изделий во многом определяются свойствами и состоянием их поверхностного слоя. Схематично поверхностный слой показан на рис. 1 [1—3].

Одно из перспективных научных направлений в области создания новых материалов с уникальными свойствами — разработка специальных технологий получения материалов, имеющих субмикрокристаллическую и нанокристаллическую структуру.

Для формирования в поверхностных и приповерхностных слоях субмикрокристаллической и нанокристаллической структуры, а также требу-

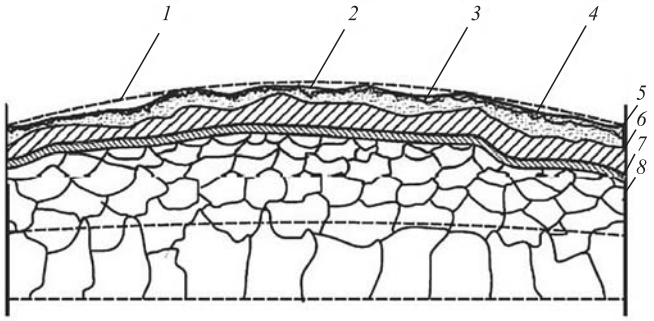



**Рис. 1. Поверхностный слой детали:**
*1* — макроотклонение; *2* — волнистость; *3* — шероховатость; *4* — субшероховатость; *5* — адсорбированная зона; *6* — зона оксидов; *7* — граничная зона; *8* — зона с измененными физико-механическими свойствами

*Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (грант 18-48-690001).

емых физико-механических характеристик, применяют различные методы модифицирования поверхностного слоя, одним из которых является технология ультразвуковой ударной обработки (УУО). Данный метод поверхностного упрочнения обеспечивает существенное изменение дислокационной структуры в поверхностном слое обрабатываемого материала, измельчение зерен до наноразмера, увеличение углов разориентировки дислокационных фрагментов и др.

УУО является относительно новым методом динамического поверхностного пластического деформирования. Сущность процесса заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность изделия деформирующего элемента, прижатого к ней с постоянной силой и вибрирующего с высокой частотой. В результате ультразвукового воздействия в зоне контакта могут развиваться высокие локальные напряжения.

При наложении ультразвуковых колебаний возникают сложные процессы: наложение знакопеременных нагрузок на статические нагрузки, локальное поглощение ультразвуковой энергии и, как результат этого, изменение условий течения металла и облегчение пластического деформирования. Сложение статического напряжения с амплитудным значением знакопеременного напряжения делает суммарное напряжение достаточным для преодоления дислокациями потенциальных барьеров, т.е. для начала более раннего появления пластических деформаций. Активация дислокаций происходит в основном за счет поглощения акустической энергии в местах дефектов кристаллической решетки и других структурных несовершенств. За время, исчисляемое миллисекундами, происходят локальный нагрев вокруг источников поглощения, снятие напряжений, разблокировка дислокации, увеличение их подвижности. Все это обеспечивает более интенсивный ход пластической деформации [4—6].

В рамках данной работы модификацию поверхностного слоя образцов из титанового сплава ВТ16 осуществляли с помощью комплекса для УУО, который включает в себя: генератор типа ИЛ, предназначенный для выработки тока частотой ~25 кГц, мощностью 630 Вт и рабочий инструмент, преобразующий электрические колебания в механические и осуществляющий с помощью деформирующего элемента обработку поверхности.

## Материал и методы исследования

Материал исследования — титановый сплав ВТ16 системы Ti—Al—Mo—V, по фазовому составу относящийся к мартенситной ($\alpha + \beta$)-группе в термообработанном состоянии. Химический состав сплава ВТ16 представлен в таблице.

**Химический состав титанового сплава ВТ16, % мас.**

| Fe | C | Si | V | Mo | Al | Ti |
|---|---|---|---|---|---|---|
| До 0,25 | До 0,10 | До 0,15 | 4,0...5,0 | 4,5...5,5 | 1,8...3,8 | Основа |

Технологические параметры УУО:

— постоянные: частота — 22 кГц, амплитуда — 10 мкм;

— варьируемые: статическая нагрузка ~50, 100, 150 Н.

Таким образом, УУО проводили по трем режимам: режим 1 при статической нагрузке 50 Н, режим 2 при статической нагрузке 100 Н, режим 3 при статической нагрузке 150 Н и при постоянных частоте и амплитуде.

Для контроля шероховатости поверхности после УУО использовали цифровой контактный профилометр TR220. Измерение микротвердости выполняли на приборе ПМТ-3 при нагрузке 0,981 Н (100 гс) по ГОСТ 9450—76. Для оценки изменения микротвердости на различном удалении от обрабатываемой поверхности образцов после обработки изготавливали поперечные шлифы, которые подготавливали для исследования по традиционной методике.

Микроструктуру поверхностного слоя и основного металла изучали на оптическом инвертированном микроскопе Olympus GX53 с системой анализа изображений Siams 800. Химическое травление проводили реактивом состава: 10 мл плавиковой кислоты (HF), 20 мл азотной кислоты ($HNO_3$), 70 мл глицерина ($C_3H_5(OH)_3$).

Для исследования тонкой структуры использовали электронный микроскоп типа JEOL при ускоряющем напряжении 200 кВ.

Остаточные макронапряжения поверхностного слоя измеряли при помощи многофункционального рентгеновского дифрактометра общего назначения типа ДРОН.

## Результаты исследований и их обсуждение

При базовой длине 0,8 мм исходные значения параметров шероховатости поверхности всех исследуемых образцов составляли: $Ra$ = 0,680 мкм; $Rz$ = 3,795 мкм; $R_{max}$ = 4,550 мкм. На рис. 2 представлена профилограмма поверхности образца с исходным параметром шероховатости.

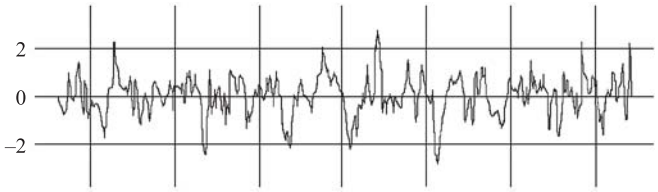



**Рис. 2. Профилограмма исходной поверхности образца, *Ra* = 0,680 мкм**

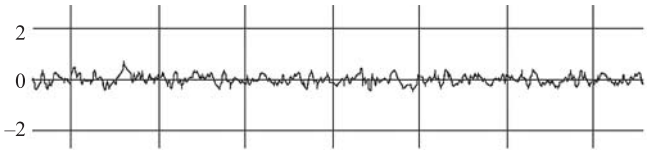



**Рис. 3. Профилограмма поверхности образца после УУО, *Ra* = 0,069 мкм**

После УУО образцов значения параметров шероховатости поверхности (рис. 3) снизились и составляли:

| Режим обработки | Режим 1 | Режим 2 | Режим 3 |
|---|---|---|---|
| Параметры шероховатости | $Ra$ = = 0,069 мкм | $Ra$ = = 0,082 мкм | $Ra$ = = 0,136 мкм |
| | $Rz$ = = 0,558 мкм | $Rz$ = = 0,847 мкм | $Rz$ = = 1,028 мкм |
| | $R_{max}$ = = 0,768 мкм | $R_{max}$ = = 1,152 мкм | $R_{max}$ = = 1,582 мкм |

На рис. 4, *а* приведена микроструктура титанового сплава ВТ16 в исходном состоянии, а на рис. 4, *б* — после УУО. Микроструктура поверхностного слоя после обработки имеет одинаковый характер и поэтому представлена в виде одной фотографии.

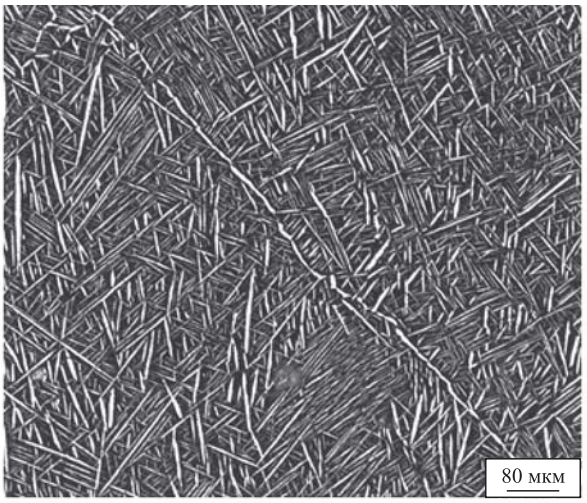
Микроструктуру можно отнести к структуре преимущественно "корзиночного плетения", которая отличается от пластинчатой менее грубым строением колоний α-фазы, которые растут не только от границ исходных зерен, но и внутри зерен β-фазы. Крупные зерна исходной β-фазы видны по оторочкам новой α-фазы, расположенной по границам β-кристаллов, α-пластины разделены промежутками β-фазы. Средняя длина α-пластин порядка 70 мкм.

УУО привела к деформированию элементов структуры, их уплотнению и образованию текстуры деформации в поверхностном слое на глубину порядка 80 мкм, что хорошо согласуется со многими литературными данными по данному вопросу.

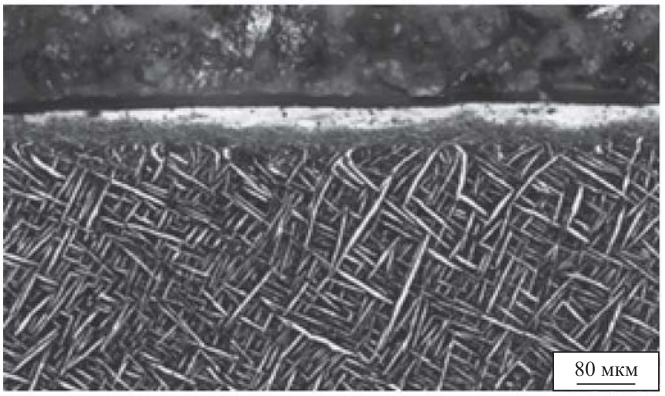
Выявить особенности структуры поверхностных слоев только металлографическим методом достаточно сложно, поэтому для более детального рассмотрения использовали электронную микроскопию.

Исходная микротвердость титанового сплава ВТ16 имела значение 376 HV0,1. После УУО образцов микротвердость поверхностного слоя повысилась и достигла своего максимума на поверхности: после обработки по режиму 1 — 437 HV0,1, по режиму 2 — 478 HV0,1, по режиму 3 — 525,5 HV0,1.

Анализ изменения микротвердости по глубине (рис. 5) поверхностного слоя показывает, что при удалении от поверхности значения микротвердости уменьшаются и достигают исходного значения на глубине 120...150 мкм.




*а)*




*б)*

**Рис. 4. Микроструктура титанового сплава ВТ16 в исходном состоянии (*а*) и после УУО (*б*). ×500**

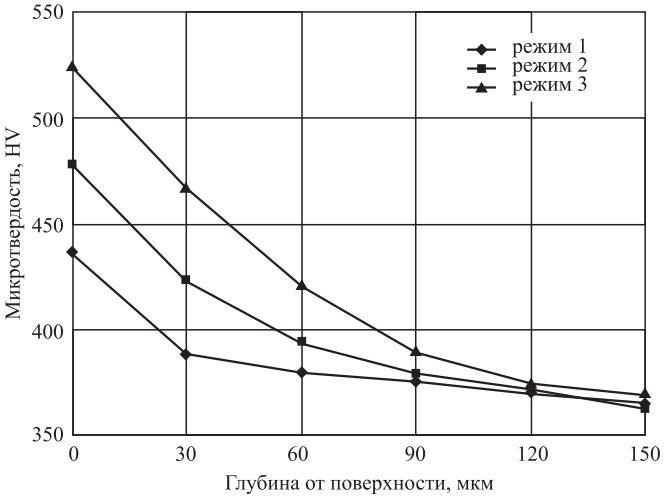



**Рис. 5. Результаты измерения микротвердости по глубине**

Увеличение значений микротвердости свидетельствует как об измельчении элементов микроструктуры, повышении дефектности структуры, так и о формировании напряжений сжатия в по-

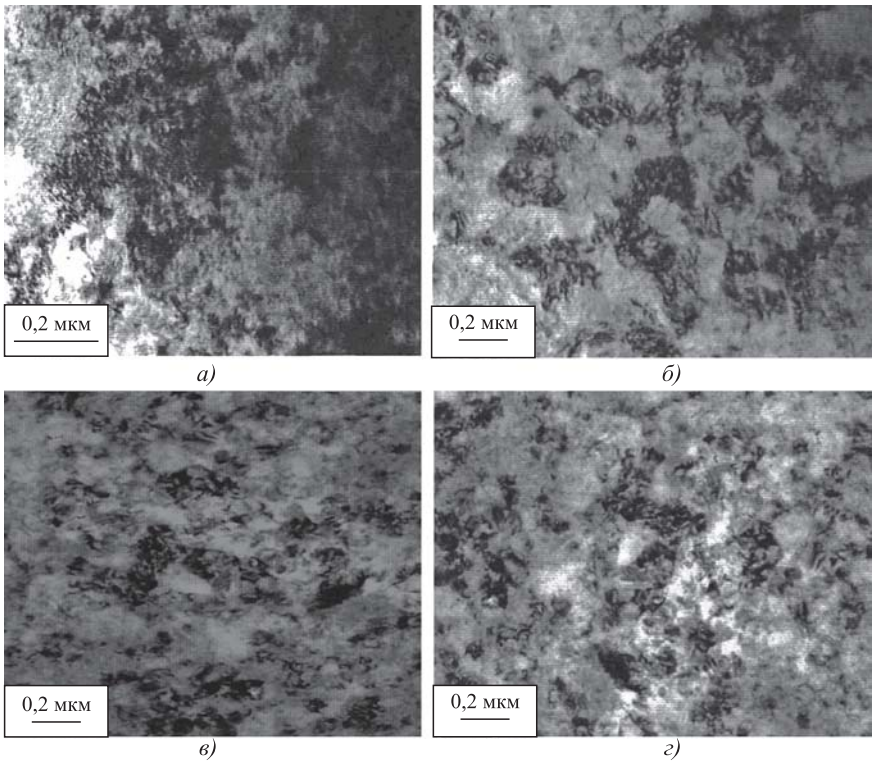



**Рис. 6. Нанокристаллическая структура поверхностного слоя титанового сплава ВТ16 (×230 000):**
*а* — исходная; *б* — режим 1; *в* — режим 2; *г* — режим 3

верхностных слоях. Об увеличении степени дисперсности структуры с повышением микротвердости также свидетельствуют результаты изучения тонкой структуры, представленные на рис. 6.

Средний размер элементов субзеренной структуры образца составляет ~200 нм, после УУО средний размер элементов структуры уменьшился, достигнув следующих значений: режим 1 — 130 нм, режим 2 — 110 нм, режим 3 — 50 нм.

В результате УУО также увеличилась плотность дислокаций. В исходном образце плотность дислокаций составляла ~$5 \cdot 10^{10}$ см$^{-2}$, а в результате обработки плотность дислокаций возросла до значений: режим 1 — $4{,}5 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, режим 2 — $7{,}1 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$, режим 3 — $9 \cdot 10^{11}$ см$^{-2}$.

В исходном состоянии остаточные напряжения поверхностного слоя имели значения −90...50 МПа. После УУО в поверхностном слое сформировались сжимающие остаточные напряжения, имеющие максимум на поверхности по режиму 1 — −360 МПа, по режиму 2 — −410 МПа, по режиму 3 — −480 МПа.

## Выводы

1. Микрогеометрия обрабатываемой поверхности улучшается при уменьшении силы статического прижима. Это объясняется тем, что при увеличении силы статического прижима перед деформирующим элементом начинает формироваться передняя внеконтактная зона и увеличивается контактная зона под деформирующим элементом.

2. Микротвердость имеет максимальное значение на поверхности образца, уменьшается по удалению вглубь материала и в итоге возвращается к исходным значениям.

3. Происходит деформирование элементов структуры, их уплотнение и образование текстуры деформации.

4. Плотность дислокаций увеличивается, а размер элементов субзеренной структуры уменьшается с увеличением силы статического прижима деформирующего элемента к образцу.

5. Происходит формирование остаточных сжимающих напряжений, имеющих максимум на поверхности. Значение остаточных сжимающих напряжений возрастает при увеличении силы статического прижима деформирующего элемента к образцу.

Проведенные экспериментальные исследования показывают достоинства УУО и возможность применения для повышения физико-механических характеристик поверхностных слоев титанового сплава ВТ16 и модифицирования поверхностного слоя с формированием наноструктуры.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

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

3. **Суслов А.Г.** Инженерия поверхности деталей / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2008. 320 с.

4. **Абрамов О.В., Кулемин А.В., Манегин Ю.В.** Применение ультразвука при прессовании металлов // Применение новых физических методов для интенсификации металлургических процессов. М.: Металлургия. 1974. С. 203—208.

5. **Кулемин А.В.** Поглощение ультразвука в металлах в процессе их пластической деформации // Акуст. журн. 1980. Т. 26. № 5. С. 735—740.

6. **Севереденко В.П., Скрипниченко А.Л., Тявловский М.Д.** Ультразвук и прочность. Мн.: Наука и техника, 1979. 214 с.

УДК 669.295

**[1] С.В. Коновалов, [2] Ю.Ф. Иванов, [3] И.А. Комиссарова, [3] Д.А. Косинов, [3] В.Е. Громов**
*([1]Самарский национальный исследовательский университет имени академика С.П. Королева,*
*[2] Институт сильноточной электроники СО РАН, г. Томск,*
*[3]Сибирский государственный индустриальный университет, г. Новокузнецк)*
*E-mail: gromov@physics.sibsiu.ru*

# Повышение многоцикловой усталости титанового сплава при токовом воздействии*

*Токовая импульсная обработка титанового сплава ВТ1-0 повышает его усталостную долговечность в ~1,3 раза. Методами сканирующей электронной микроскопии выполнен анализ поверхности разрушения образцов, подвергнутых токовой импульсной обработке и многоцикловым усталостным испытаниям до разрушения. Установлено, что зона роста усталостной трещины имеет структуру преимущественно ямок вязкого разрушения, фасетки квазискола выявлены в структуре поверхности разрушения зоны долома. Анализ усталостных бороздок показал, что среднее расстояние между ними меньше в 2 раза в случае исследования образцов, подвергнутых токовой импульсной обработке.*

***Ключевые слова:*** *титановый сплав ВТ1-0, токовая импульсная обработка, многоцикловая усталость, усталостный ресурс, структура.*

*Pulse current treatment of titanium VT1-0 alloy increases its fatigue life by ~1.3 times. Scanning electron microscopy methods are used to analyze of the fracture surface of samples subjected to current pulse treatment and high-cycle fatigue tests to failure. The fatigue crack growth area has structure mainly of ductile failure pits, the facets of the quasi-spalling are revealed in the structure of the failure surface of the rupture zone. Analysis of the fatigue grooves showed that the average distance between them is less than 2 times in the case of the study of current pulse treatment samples.*

***Keywords:*** *titanium VT1-0 alloy, current pulse treatment, high-cycle fatigue, fatigue life, structure.*

## Введение

Вопросы усталости и прочности — предмет самого тщательного рассмотрения с точки зрения как научных исследований, так и опытно-конструкторских и технологических разработок. Сопротивление усталости и долговечность являются важными критериями оценки работоспособности и ресурса деталей и конструкций. В общем случае процесс усталости связан с постепенным накоплением и взаимодействием дефектов кристаллической решетки и, как следствие этого, с развитием усталостных повреждений в виде образования и распространения микро- и макроскопических трещин [1—4].

Для повышения усталостной долговечности металлических материалов используют различные способы упрочняющей обработки. Перспективны работы, направленные на создание, изучение, совершенствование и практическое внедрение технологических методов поверхностного упрочнения, использующих высококонцентрированные источники энергии, включающие ионные, плазменные, лазерные и электронные пучки, обеспечивающие формирование в поверхностном слое высокопрочных наноструктур. Еще один перспективный метод направленной модификации структурно-фазового состояния металлических материалов — воздействие мощными импульсными токами. Такое воздействие обладает широкими возможностями

* Работа выполнена при поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 16-32-60048_мол_а_дк и № 16-58-00075-Бел-а).

контроля и регулирования количества подводимой энергии, создания большой площади воздействия на обрабатываемый материал, высокой концентрацией энергии в единице объема материала и большими возможностями перевода материала в высоконеравновесное состояние [5—9].

Выяснение физических механизмов формирования и эволюции структурно-фазовых состояний и дислокационной субструктуры в металлах и сплавах при токовом воздействии — одна из важных задач физики конденсированного состояния. При этом получение необходимого комплекса высоких прочностных и пластических свойств требует понимания физических механизмов и природы структурно-фазовых изменений на всех масштабных условиях: от макро- до наноуровня [10, 11].

Учеными исследовано влияние токовых импульсов при разных способах деформирования образцов: при холодной и горячей прокатке, холодном волочении, растяжении, штамповке и др. В качестве изменяющегося параметра использованы: плотность и амплитуда тока, длительность воздействия, периодичность воздействия токовыми импульсами и др. [12—18].

Сплавы на основе титана широко используются в качестве конструкционного материала благодаря высоким термостойкости, удельной прочности, коррозионной стойкости и биосовместимости [19, 20].

**Цель работы**, продолжающей исследования, начатые в работах [21—24], — исследование влияния токовой импульсной обработки титанового сплава ВТ1-0 на изменение его усталостного ресурса и проведение сравнительного анализа поверхности разрушения.

## Материал и методика исследований

В качестве материала для исследований были использованы образцы технически чистого титана марки ВТ1-0. Многоцикловые усталостные испытания проводили на специальной установке по схеме асимметричного консольного изгиба. Образцы размерами 12×4×130 мм с концентратором напряжений были выполнены по ГОСТ 25.502—79. Трещину имитировали надрезом в виде полукруглого выреза радиусом 20 мм. Температура испытаний — 300 К, частота нагружения образцов изгибом — 10 Гц. Многоцикловые испытания проводили на двух партиях образцов: образцы в исходном состоянии и образцы, подвергавшиеся на стадии накопления усталостных повреждений (180 000 циклов нагружения) токовой импульсной обработке с помощью генератора токовых импульсов с амплитудой 2 кА, длительностью воздействия 2 мин и частотой следования токовых импульсов 70 Гц. В каждом состоянии было разрушено по 10 образцов. Такое воздействие привело к увеличению числа циклов до разрушения от 281 333 ± 274 00 до 359 532 ± 19 050. Отметим, что токовая импульсная обработка способствовала уменьшению разброса данных.

Исследование образцов, разрушенных в результате усталостных испытаний, осуществляли методами сканирующей электронной микроскопии (сканирующий электронный микроскоп SEM-515 Philips) [25—27].

## Результаты исследований и их обсуждение

Усталостное разрушение, как правило, является процессом, развивающимся во времени в локальных объемах деформируемого материала. При достижении критического состояния наступает разрушение образца в целом. На поверхности разрушения выявляются три характерные зоны — зона роста усталостной трещины, зона долома и разделяющая их зона ускоренного роста трещины [1—3, 28—32].

Деформационные процессы при усталостных испытаниях материала в полной мере развиваются в зоне роста усталостной трещины и, в существенно меньшей степени, в зоне долома. В большинстве случаев усталостное разрушение начинается с поверхности металлических материалов. Это приводит к интенсивной пластической деформации поверхностного слоя глубиной порядка размера зерна [28—32]. Характерное изображение структуры поверхностного слоя титана, формирующейся при усталостном разрушении, приведено на рис. 1. Отчетливо видно (рис. 1, *б*, *в*), что усталостное нагружение приводит к формированию в поверхностном слое толщиной 15...20 мкм структуры пластинчатого типа, поперечные размеры кристаллитов которой составляют 0,6...3,1 мкм (рис. 1, *г*).

Поверхность разрушения имеет сложное строение. В металлических материалах, как правило, наблюдается смешанный механизм усталостного разрушения [30, 31]. При анализе приведенных на рис. 2 электронно-микроскопических изображений выявляются ямки вязкого разрушения и фасетки квазискола. Ямки вязкого разрушения образуются в результате срезания микропор, через которые прошло разрушение зерен титана, и выявляются преимущественно в зоне усталостного роста трещины (рис. 2, *а*, *б*). Фасетки квазискола являются основным структурным элементом поверхности разрушения зоны долома (рис. 2, *в*, *г*).

Образцы, подвергнутые усталостному разрушению после токовой импульсной обработки, были

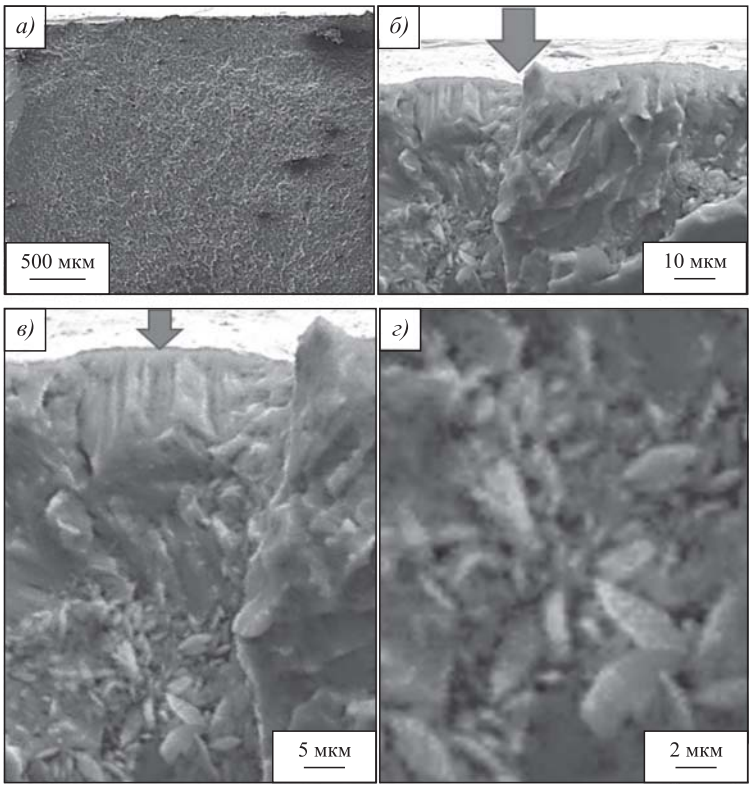



**Рис. 1. Структура поверхностного слоя титана, разрушенного в условиях многоцикловых усталостных испытаний. (Стрелкой указана поверхность образца)**

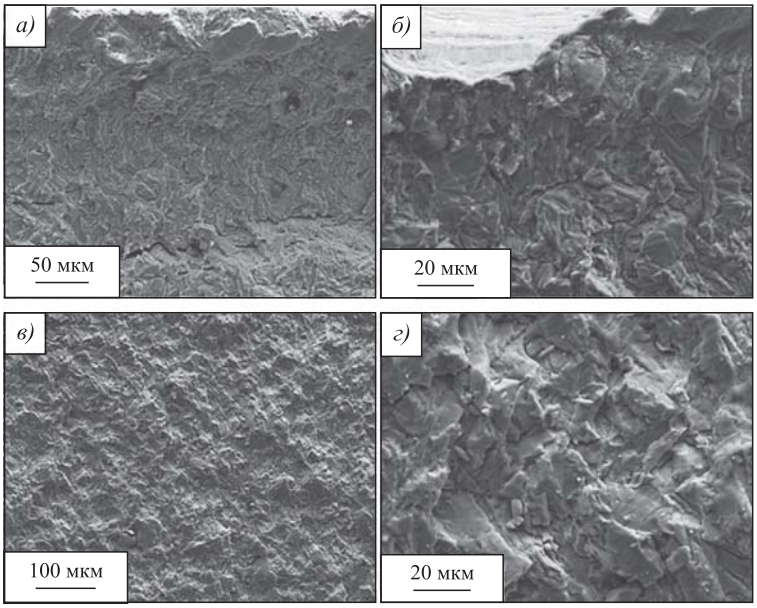



**Рис. 2. Поверхность усталостного разрушения титана:**
*а*, *б* — структура зоны усталостного роста трещины; *в*, *г* — структура зоны долома

разрушены в среднем при 359 532 циклах нагружения. Это означает, что токовое воздействие на титан привело к увеличению усталостной долговечности материала в ~1,3 раза по сравнению с образцами без токовой обработки. Характерное изображение поверхности разрушения титана, разрушенного после токовой импульсной обработки, представлено на рис. 3.

Характерные изображения структуры, формирующейся на поверхности образца вблизи зоны разрушения, приведены на рис. 4. Видно, что усталостные испытания сопровождаются формированием на поверхности образца характерных наплывов металла, а также микротрещин, расположенных параллельно поверхности разруше-

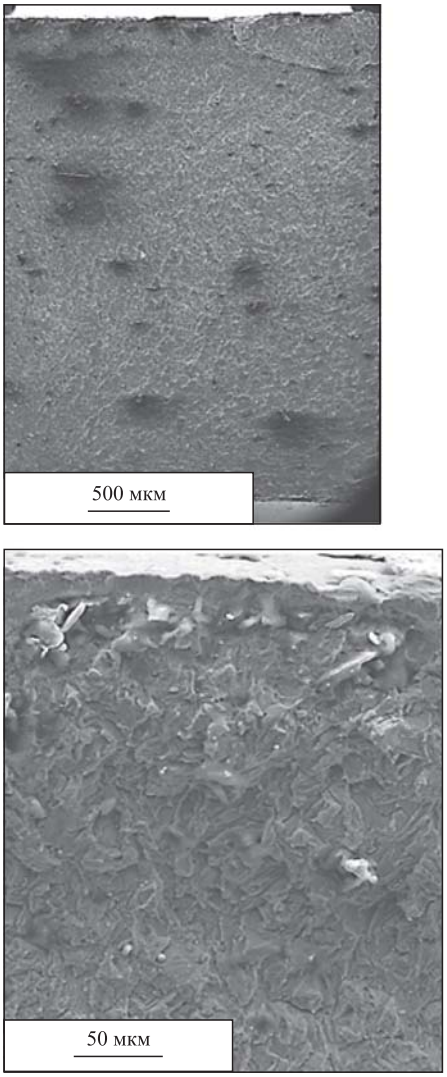



**Рис. 3. Структура поверхности разрушения титана, разрушенного после токовой импульсной обработки**

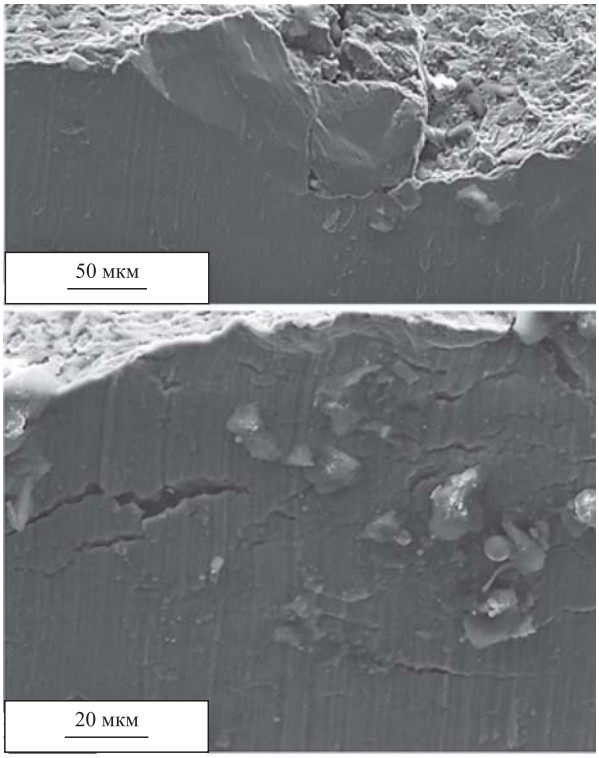



**Рис. 4. Структура поверхности образца титана, разрушенного при усталостных испытаниях в условиях токовой импульсной обработки**

ния. Практически всегда разрушение материала при усталостном нагружении развивается от концентратора напряжений, расположенного на поверхности образца.

При каждом цикле изменения нагрузки у вершины трещины имеет место значительная, но локализованная пластическая деформация.

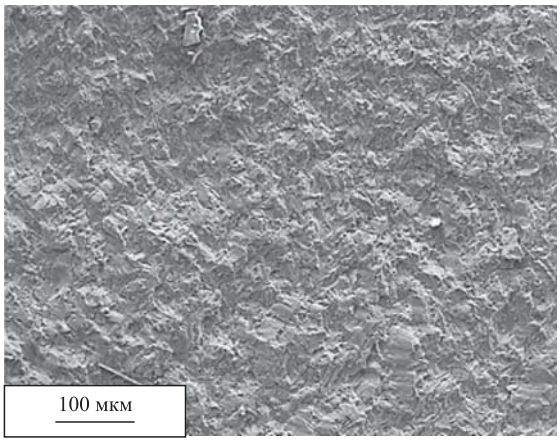



**Рис. 5. Структура титана, разрушенного при усталостных испытаниях после токовой импульсной обработки, демонстрирующая ветвление трещин на фронте разрушения материала**

Поликристаллический характер структуры титана приводит к многократному ветвлению фронта разрушения материала. Образуется большое число микроскопически видимых параллельно расположенных следов разрушения (рис. 5).

К важным признакам зоны усталостного разрушения материала относится присутствие усталостных бороздок [28—32]. Анализ усталостных бороздок образцов, разрушенных при токовой импульсной обработке, показал, что расстояние между ними изменяется от 1,2 до 3,6 мкм и в среднем составляет 1,8 мкм. В условиях разрушения образцов технически чистого титана без токовой обработки среднее расстояние между усталостными бороздками составляло 3,6 мкм. Расстояние между бороздками определяется способностью материала сопротивляться распространению усталостной трещины: чем меньше расстояние между бороздками, тем большей сопротивляемостью распространению трещины обладает материал. Эти факты коррелируют с результатами, полученными при усталостных испытаниях — усталостная долговечность электростимулированных образцов титана в ~1,3 раза выше усталостной долговечности образцов титана в исходном состоянии.

Анализ поверхности разрушения титана в условиях токовой импульсной обработки позволил выявить ямки вязкого разрушения и фасетки квазискола, характерное электронно-микроскопическое изображение которых приведено на рис. 6. Ямки вязкого разрушения образуются в результате срезания микропор, через которые прошло разрушение зерен титана, и выявляются преимущественно в зоне усталостного роста трещины (рис. 6, *а*, *б*). Фасетки квазискола чаще обнаруживаются на поверхности разрушения зоны долома (рис. 6, *в*).

## Заключение

Методами сканирующей электронной микроскопии выполнены исследования поверхности усталостного разрушения технически чистого титана марки ВТ1-0 в условиях токовой импульсной обработки и без нее, выявлено формирование тонкого поверхностного слоя, имеющего субмикрокристаллическую структуру, зону усталостного разрушения и зону долома.

Токовая импульсная обработка технически чистого титана марки ВТ1-0 привела к увеличению усталостной долговечности материала в ~1,3 раза по сравнению с материалом в исходном состоянии. Зона усталостного разрушения характеризуется наличием усталостных бороздок, среднее расстояние между которыми 1,8 мкм, что в 2 раза

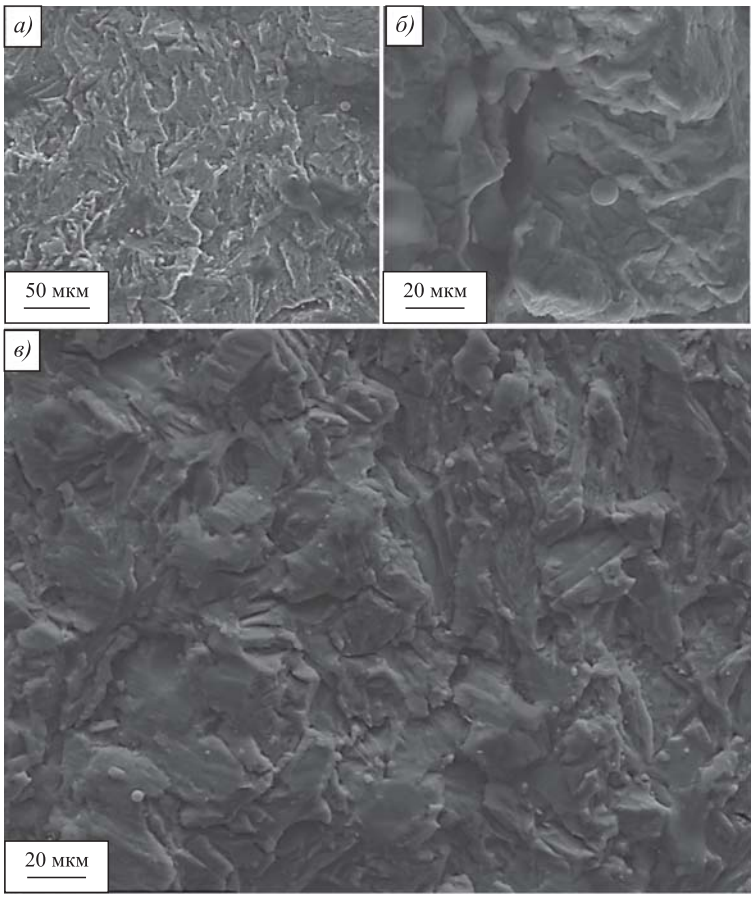



**Рис. 6. Поверхность усталостного разрушения титана после токовой импульсной обработки:**
*а*, *б* — структура зоны усталостного роста трещины; *в* — структура зоны долома

меньше расстояния между усталостными бороздками разрушенного материала в исходном состоянии. Установлено, что независимо от условий проведения экспериментов зона усталостного роста трещины имеет структуру преимущественно ямок вязкого разрушения, фасетки квазискола выявляются в основном в структуре поверхности разрушения зоны долома.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Терентьев В.Ф.** Усталостная прочность металлов и сплавов. М.: Интермет инжиниринг, 2002. 287 с.

2. **Ботвина Л.Р.** Кинетика разрушения конструкционных материалов. М.: Наука, 1989. 230 с.

3. **Кривцов В.С., Павленко В.Н., Волков И.В.** Факторы, влияющие на зарождение усталостных трещин в лопатках авиационных двигателей // Научный вестник ДГМА. 2011. № 1 (7Е). С. 65—72.

4. **Fatigue** of steels modified by high intensity electron beams / V.E. Gromov, Yu.F. Ivanov, S.V. Vorobiev et al. Cambridge: Cambridge International Science Publishing Ltd., 2015. 272 p.

5. **Баранов Ю.В., Троицкий О.А., Абрамов Ю.С.** и др. Физические основы электроимпульсной и электропластической обработок и новые материалы. М.: МГИУ, 2001. 844 с.

6. **Троицкий О.А., Баранов Ю.В., Аврамов Ю.С., Шляпин А.Д.** Физические основы и технологии обработки современных материалов. Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2004. 590 с.

7. **Юрьев В.А., Баранов Ю.В., Столяров В.В.** и др. Влияние электропластической обработки на структуру алюминий-литиевого сплава 1463 // Известия РАН. Серия физическая. 2008. Т. 72, № 9. С. 1317—1319.

8. **Столяров В.В.** Роль внешних воздействий в наноструктурных титановых сплавах // Известия РАН. Серия физическая. 2012. Т. 76. № 1. С. 108—113.

9. **Столяров В.В.** Влияние химического и фазового состава на проявление электропластического эффекта в титановых сплавах // Известия Российской академии наук. Серия физическая. 2014. Т. 78. № 3. С. 356—358.

10. **Соснин О.В., Громов В.Е., Козлов Э.В.** и др. Усталость сталей при импульсном токовом воздействии. Новокузнецк: СибГИУ, 2004. 464 с.

11. **Коновалов С.В., Громов В.Е., Иванов Ю.Ф.** Влияние электромагнитных полей и токов на пластическую деформацию металлов и сплавов. Новокузнецк: Интер-Кузбасс, 2013. 293 с.

12. **Guan L., Tang G., Chu P.K.** Recent advances and challenges in electroplastic manufacturing processing of metals // Journal of Materials Research. 2010. Vol. 25. P. 1215—1224.

13. **Guan L., Tang G., Jiang Y., Chu P.K.** Texture evolution in cold-rolled AZ31 magnesium alloy during electropulsing treatment // Journal of Alloys and Compounds. 2009. Vol. 487. P. 309—313.

14. **Lee T., Magargee J., Ng M.K., Cao J.** Constitutive analysis of electrically-assisted tensile deformation of CP—Ti based on non-uniform thermal expansion, plastic softening and dynamic strain aging // International Journal of Plasticity. 2017. Vol. 94. P. 44—56.

15. **Liu X., Lan S.H., Ni J.** Electrically assisted friction stir welding for joining al 6061 to trip 780 steel // Journal of Materials Processing Technology. 2015. Vol. 219. P. 112—123.

16. **Ye X.X., Tse Z.T.H., Tang G.Y.** Mechanical properties and tensile fracture of Ti—Al—V alloy strip under electropulsing-induced phase change // Journal of Materials Research. 2015. Vol. 30. P. 206—223.

17. **Ye X., Kuang J., Li X., Tang G.** Microstructure, properties and temperature evolution of electro-pulsing treated functionally graded Ti—6Al—4V alloy strip // Journal of Alloys and Compounds. 2014. Vol. 599. P. 1—9.

18. **Wang H., Song G., Tang G.** Evolution of surface mechanical properties and microstructure of Ti—6Al—4V alloy induced by electropulsing-assisted ultrasonic surface rolling process // Journal of Alloys and Compounds. 2016. Vol. 681. P. 146—156.

19. **Борисова Е.А., Бочвар Г.А., Брун М.Я.** и др. Титановые сплавы. Металлография титановых сплавов. М.: Металлургия, 1980. 464 с.

20. **Ильин А.А., Колачев Б.А., Полькин И.С.** Титановые сплавы. Состав, структура, свойства. М.: ВИЛС МАТИ, 2009. 520 с.

21. **Комиссарова И.А., Коновалов С.В., Косинов Д.А.** и др. Влияние токового импульсного воздействия на структуру титанового сплава при многоцикловой усталости // Фундаментальные проблемы современного материаловедения. 2018. Т. 15. № 3. С. 409—415.

22. **Комиссарова И.А., Косинов Д.А., Коновалов С.В.** и др. Изменение при многоцикловой усталости структуры титанового сплава ВТ1-0, подвергнутого токовому импульсному воздействию // Ползуновский вестник. 2018. № 3. С. 139—144.

23. **Konovalov S., Komissarova I., Chen X. et al.** The structure of the surface layer in titanium VT1-0 after high-cycle fatigue tests // IOP Conf. Series Science and Engineering. 2018. 447. 12075.

24. **Konovalov S.V., Komissarova I.A., Chen X. et al.** Research of Ti-Alloy subjected to electron beam treatment resulting in fatigue service life increase // Basic Problems of Material Science. 2018. P. 89—93.

25. **Ray F.** Egerton Physical Principles of Electron Microscopy. An Introduction to TEM, SEM, and AEM. Berlin: Springer Science + Business Media, Inc. 2005. 211 p.

26. **Kumar C.S.S.R.** (Ed.) Transmission Electron Microscopy Characterization of Nanomaterials. New York: Springer, 2014. 717 p.

27. **Barry Carter C., David B.** Transmission Electron Microscopy. Berlin: Springer International Publishing, 2016. 518 p.

28. **Иванова В.С., Шанявский А.А.** Количественная фрактография. Усталостное разрушение. Челябинск: Металлургия, 1988. 400 с.

29. **Фрактография** и атлас фрактограмм / под ред. Дж. Феллоуза. М.: Металлургия, 1982. 489 с.

30. **Энгеле Л., Клингеле Г.** Растровая электронная микроскопия. Разрушение: справочное изд. Пер. с нем. М.: Металлургия, 1986. 232 с.

31. **Коцаньда С.** Усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1976. 456 с.

32. **Горицкий В.М., Терентьев В.Ф.** Структура и усталостное разрушение металлов. М.: Металлургия, 1980. 208 с.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»

**СПРАВОЧНИК технолога-машиностроителя**

**в 2-х томах**

***Под ред. А.С. Васильева, А.А. Кутина***

Издание 6-е, переработанное и дополненное 2018 г. 1574 с.

*В справочнике использованы стандарты, действующие на 1 января 2018 г.*

**Цена 15 000 руб.**

**Том 1.** Приведены сведения по управлению качеством и точности изготовления деталей машин, рекомендации по выбору заготовок, припуски на механическую обработку, сведения по разработке различных технологических процессов изготовления деталей, по обработке деталей на станках с ЧПУ и агрегатных станках, даны рекомендации по оформлению технической документации.

**Том 2.** Приведены сведения о металлорежущих станках и инструментах, станочных приспособлениях, режимах резания, методах и средствах измерения, обработке поверхностей пластическим деформированием, электрофизикохимическим методам обработки и технологии сборки. Также дан технико-экономический расчет вариантов технологических процессов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г. под ред. А.Г. Косиловой, Р.К. Мещерякова и др.) переработано и дополнено в соответствии с новыми достижениями технологической науки и практики и действующими стандартами.

Для инженерно-технических работников всех отраслей машиностроения, может быть полезен преподавателям, аспирантам и студентам вузов.

***ПРИОБРЕСТИ КНИГУ ПО ЦЕНЕ ИЗДАТЕЛЯ МОЖНО, ПРИСЛАВ ЗАЯВКУ***
**по e-mail: realiz@mashin.ru**
**Дополнительная информация по телефону (495) 785-60-69 и на сайте WWW.MASHIN.RU**

УДК 621.357.7

**В.И. Балакай, К.А. Шпанова, А.О. Ковалева, А.В. Гривенко**
*(Южно-Российский государственный политехнический университет (НПИ)
имени М.И. Платова, г. Новочеркасск)*
*E-mail: balakaivi@rambler.ru*

# Повышение сцепления серебряных покрытий с никелевой основой

*Разработан и рекомендован способ непосредственного серебрения никеля из бесцианистого электролита, позволяющий получать хорошо сцепленные серебряные покрытия с никелевой основой, удовлетворяющие требованиям ГОСТ 9.302—88. Исследовано влияние состава и концентрации электролита, режимов электролиза, качества подготовки поверхности на сцепление серебряных покрытий с никелевым подслоем, осажденным на основу из меди и ее сплавов. Показано, что применение многослойных покрытий медь—никель—серебро и никель—серебро позволит экономить примерно 30 % серебра, а также увеличить надежность, срок службы электрических контактов, используемых в радиотехнике, приборостроении, машиностроении.*

***Ключевые слова:*** *покрытие, никелирование, серебрение, меднение, электролит, переходное сопротивление, сцепление, микротвердость, пористость, паяемость, электрический контакт, бесцианистый, гальванический.*

*Method of direct silver plating nickel from noncyanide electrolyte for production, which makes it possible to obtain well-coupled silver coatings with nickel base that satisfy the requirements of GOST 9.302—88 is developed and recommended. The effect of electrolyte composition and concentration, electrolysis modes and the quality of surface preparation on the adhesion of silver coatings to nickel sublayer deposited on copper base and its alloys is studied. It is shown that the use of multilayer coatings of copper—nickel—silver and nickel—silver will save silver by about 30 %, as well as increase the reliability and service life of electrical contacts used in radio engineering, instrument engineering, mechanical engineering.*

***Keywords:*** *coating, nickel plating, silver plating, copper plating, electrolyte, transient resistance, adhesion, microhardness, porosity, solderability, electrical contact, noncyanide, electroplating.*

## Введение

Основное требование к покрытиям для слаботочных скользящих электрических контактов — низкое и постоянное во времени значение переходного электрического сопротивления при различных токах через контакт и контактных нагрузках.

Медь и серебро образуют твердые растворы, что облегчает взаимную диффузию этих металлов. При работе контактной пары это может привести к существенному изменению характеристик контакта и даже к полному исчезновению верхнего слоя серебра с поверхности детали. В отличие от меди никель не образует с серебром твердых растворов, что уменьшает возможность взаимной диффузии.

При нанесении серебра не по меди, а по промежуточному подслою никеля постоянство значений переходного сопротивления во влажной атмосфере может обеспечиваться более тонким и, соответственно, более пористым слоем серебра. Однако для обоснования возможности применения новых многослойных покрытий необходимо установить постоянство характеристик контакта экспериментально.

Многослойное покрытие имеет перед однослойным и двухслойным покрытием преимущества: позволяет сократить или уменьшить число сквозных пор покрытия, выходящих на поверхность покрываемой детали, при уменьшении толщины верхнего слоя драгоценного серебра. Именно этот слой должен обеспечивать низкое

значение переходного сопротивления при контактировании и сохранение его во времени за счет высокой химической стойкости серебра.

Серебряные покрытия необходимо наносить на никелевый подслой, который должен быть эластичным, содержать как можно меньше водорода, иметь малые внутренние напряжения, а также быть практически беспористым для предотвращения образования сквозных пор серебряного покрытия и никелевого подслоя.

Технологический процесс нанесения многослойных покрытий не должен содержать токсичные и агрессивные электролиты.

**Цель работы** — повышение сцепления серебряных покрытий с никелевой основой, повышение надежности и срока службы электрических контактов.

## Методика эксперимента

Электролиты готовили из реактивов марки х.ч. и ч.д.а. на дистиллированной воде. Электроосаждение никеля и серебра проводили на детали из меди марки М1, латуни марки Л63, а также серебра на подслой никеля площадью 0,01 и 0,02 дм$^2$. Предварительную подготовку поверхности образцов осуществляли по известным методикам [1].

Защитную способность серебряных покрытий в атмосферных условиях определяли сравнительным методом ускоренных коррозионных испытаний (влажностный метод) [2]. При испытании влажностным методом изделия помещали в эксикатор и подвергали циклическому воздействию тепла и влаги по следующим режимам: 1) температура (40 ± 2) °С, относительная влажность 96...98 %, продолжительность 12 ч; 2) температура от 35 до 20 °С, относительная влажность 100 % (роса), продолжительность 5 ч. Время, оставшееся до конца суток, предусматривалось на переход от одного режима к другому. Режим 2 достигался за счет отключения источника подогрева. Для создания влажности использовали дистиллированную воду. Общая продолжительность испытаний составляет 4; 10; 21 и 56 суток для легких (Л), средних (С), жестких (Ж) и особо жестких (ОЖ) условий работы покрытых деталей соответственно.

Микротвердость покрытий определяли с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,196...0,981 Н (20...100 гс) по ГОСТ 2999—75. Покрытия осаждали на медную пластинку размерами 15×15×1 мм. Толщина покрытия не менее 20 мкм. Продолжительность выдержки образца под нагрузкой — 10 с, время опускания и подъема индентора не менее 15 с.

Для определения пористости серебряного покрытия, осажденного на никелевый подслой, использовали пасту, приготовленную по следующей методике. В 50 мл дистиллированной воды растворяли 0,035 г нитрата меди, 0,165 г хлористого железа и 1 г хлорида аммония. Порциями при интенсивном перемешивании стеклянной палочкой добавляли 30 г каолина. Полученную смесь наносили тонким слоем на покрытый образец размерами 25×25×1 мм. Высушивали в обычных условиях 0,5 ч. Погружали в эксикатор с водопроводной водой и нагревали до 30...40 °С, а затем выдерживали образцы при этой температуре в течение 1 ч. В местах пор на пасте появляются точки, окрашенные в синий цвет. Количество пор относили к единице покрытой поверхности.

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом неоднократного изгиба покрытого образца на 90° до полного излома по ГОСТ 9.302—88. Размеры образца 25×5×1 мм, толщина покрытия 20 мкм.

Измерение переходного электрического сопротивления проводили с помощью цифрового вольтметра типа TR 1652-2 и потенциостата ПЭБ, а также с помощью универсального измерительного прибора УПИП-60М и потенциостата ПЭБ. При измерении удельного электрического сопротивления использовали медные проволочки диаметром 0,1 мм и длиной около 200 мм.

Переходное электрическое сопротивление серебряных покрытий определяли по методике [2—4] при нагрузках на точечный контакт 0,049; 0,245; 0,490; 0,981; 1,962; 2,453 Н (5; 25; 50; 100; 200; 250 гс) и токах 20; 50; 100; 250; 500; 1000 мА.

Паяемость серебряных покрытий определяли на медных образцах размерами 40×40×1,5 мм по ГОСТ 20486—75. В качестве флюса использовали 5%-ный спиртовой раствор канифоли и припой марки ПОС-61 [5]. Для испытаний использовали навеску припоя объемом 64 мм$^2$, по форме близкую к кубу. Перед расплавлением припоя на поверхность образца наносили тонкий слой флюса. Образец с помещенной в центре навеской припоя на протяжении всего испытания располагали строго горизонтально. Для обеспечения нагрева образца до температуры пайки, т.е. 220...240 °С, и сохранения ее при испытании использовали муфельную печь. После охлаждения расплавленного припоя измеряли площадь растекания.

Критерием оценки паяемости является принятый условно коэффициент растекания, равный отношению площади, занятой припоем после расплавления, к площади, занимаемой дозой припоя в исходном состоянии до его расплавления. Если

коэффициент равен или больше 0,9, то паяемость считается удовлетворительной. Способность покрытий к перепайке определяли по качеству паяного соединения после шестикратного перепаивания.

## Результаты эксперимента и их обсуждение

Для увеличения надежности, срока службы, долговечности электрических контактов, покрытых серебром, и его экономии необходимо серебро наносить на подслой меди и никеля с минимальной пористостью.

Для получения практически беспористого никелевого подслоя необходимо наращивать его толщину, однако при этом увеличиваются внутренние напряжения в никелевых покрытиях и расход никеля. Поэтому важно правильно выбрать электролит никелирования.

Для нанесения никелевых покрытий с низкой пористостью и внутренними напряжениями использовали сульфаматный электролит состава, г/л: никель сульфаминовокислый — 300...400; никель хлористый шестиводный — 12...15; борная кислота — 25...40; сахарин — 0,5...1,5; pH = 3,0...4,2; температура электролита 20...60 °С; катодная плотность тока 5...12 А/дм$^2$ согласно ГОСТ 9.305—84.

При нанесении серебра на подслой никеля сцепление между ними не удовлетворяет требованиям ГОСТ 9.302—88. Непосредственное серебрение никеля в токсичных цианистых электролитах описано в работе [6], причем процесс серебрения двухстадийный. Никель при этом активируется непосредственно в электролите серебрения. Для изучения возможности непосредственного серебрения по никелю из бесцианистых электролитов с высокой адгезией предлагается предварительно активировать поверхность на основе никеля.

Перед электроосаждением серебра на подслой никеля изучали различные способы активирования поверхности никеля: травление в различных растворах на основе азотной кислоты, восстановление в сильных восстановителях (гидразине и гидроксиламине), активирование электролитическим путем в цианистых и аммонийных электролитах и т.д. Кроме того, применяли катодные "толчки" тока в электролитах серебрения в целях восстановления оксидной пленки на никелевой поверхности. Затем серебрение вели в этих же электролитах при обычных условиях. Такое активирование поверхности никеля непосредственно в электролитах серебрения должно быть более эффективным, поскольку при переносе никелевых образцов из электролитов активирования снова происходит окисление поверхности.

Однако во всех случаях, как с обработкой, так и без обработки никелевого подслоя, сцепление серебряного покрытия с ним не удовлетворяет требованиям ГОСТ 9.302—88.

На основании предварительных исследований для замены цианистого электролита предварительного серебрения предлагается разбавленный тиосульфатный электролит серебрения состава, г/л: хлорид серебра — 1...3; тиосульфат натрия пятиводный — 110...120; сульфит натрия — 10...20; роданид аммония — 10...30. Температура 18...25 °С, катодная плотность тока 0,2...0,5 А/дм$^2$, продолжительность 20...90 с. Аноды серебряные.

После "толчка" тока серебряные покрытия до нужной толщины можно наращивать в этом же электролите при плотности тока 0,02...0,04 А/дм$^2$. Для увеличения скорости серебрения покрытия можно наращивать в любых других электролитах, используемых в промышленности. Сцепление серебряного слоя с никелевым покрытием во всех случаях удовлетворяет требованиям ГОСТ 9.302—88.

Определены свойства двухслойных покрытий никель—серебро, полученных с применением сульфаминовокислого электролита никелирования, тиосульфатного электролита предварительного серебрения и электролита для наращивания толщины серебряных покрытий.

При оценке защитных свойств катодных покрытий большое значение имеет пористость. Пористость (пор/см$^2$) серебряных покрытий, осажденных на медную основу без никелевого подслоя, с доверительной вероятностью 0,95 составляет при толщине серебряного покрытия: а) 1,5 мкм — 42±5; б) 3,0 мкм — 16±3; в) 4,5 мкм — 12±3; г) 6,0 мкм — 7±2; а для изученных двухслойных покрытий при толщине никелевого слоя 1 мкм и серебряного покрытия: а) 1,5 — 38±5; б) 3,0 мкм — 12±3; в) 4,5 мкм — 10±2; г) 6,0 мкм — 5±1; при толщине никелевого слоя 3 мкм и серебряного покрытия: а) 1,5 мкм — 35±5; б) 3,0 мкм — 10±2; в) 4,5 км — 6±2; г) 6,0 мкм — 3±1.

Пористость серебряных покрытий с никелевым подслоем ниже, чем без никелевого подслоя.

Так как серебряные покрытия используются в качестве контактного материала и монтаж контакта, разъема осуществляется пайкой при достаточно высоких температурах плавления припоя, большое значение имеет паяемость и способность покрытия к перепайке. Паяемость серебряных покрытий толщиной 3; 6; 9 и 12 мкм с никелевым подслоем толщиной 1; 3 и 5 мкм и без него до и после коррозионных испытаний по влажностному методу удовлетворяет требованиям ГОСТ 20486—75. Способность к перепайке хорошая. При шестикрат-

ном нагреве образцов до температуры плавления припоя и их охлаждении до комнатной температуры сцепление серебряного покрытия с никелевым подслоем и с припоем хорошее, а качество покрытия не изменяется.

Микротвердость серебряных покрытий находится в пределах 820...1010 МПа, а удельное электрическое сопротивление — $(2{,}08...2{,}25)\cdot10^{-8}$ Ом·м.

Переходное электрическое сопротивление покрытий зависит от множества факторов, далеко не последнее место среди которых занимает агрессивность атмосферы. Поэтому переходное сопротивление нельзя считать физической константой, характерной для данного металла и сплава, а количественные описания переходного сопротивления должны выполняться на основе законов распределения случайных величин. Учитывая, что существующий разброс измеряемых значений переходного сопротивления не устраняется усовершенствованием техники эксперимента, измеряемое среднее значение необходимо характеризовать вероятностью (надежностью) его получения согласно представлениям статистики.

Для легких (Л), средних (С), жестких (Ж) и особо жестких (ОЖ) условий эксплуатации применяются серебряные покрытия по меди и медным сплавам толщиной 3; 6; 9 и 12 мкм соответственно. Чтобы получить эталонные значения переходного сопротивления для применяемой методики измерений, изучали поведение при контактировании серебряных покрытий по меди толщиной 3; 6; 9 и 12 мкм. Переходное сопротивление точечного контакта во всех опытах измеряли после ускоренных коррозионных испытаний во влажной атмосфере при всех токах в цепи и нагрузках на точечный контакт.

Примем следующие обозначения: $R_n$ — переходное сопротивление для точечного контакта (контактируют одинаковые покрытия), например, два образца, покрытых 12 мкм серебра); $\overline{R_n}$ — среднее арифметическое значение для параллельных опытов, доверительный интервал определен с доверительной вероятностью 0,9; $S^2$ — выборочная дисперсия для данной группы опытов; $t_{рас}$ — расчетный критерий Стьюдента для выбранной доверительной вероятности.

Для нахождения оптимального решения при сравнительном изучении переходного сопротивления предлагаемых многослойных покрытий никель—серебро и медь—никель—серебро применяли метод математического планирования экстремальных экспериментов: метод крутого восхождения Бокса—Уилсона [7]. Параметр оптимизации — переходное сопротивление точечного контакта при данном токе в цепи и нагрузке на контакт после коррозионных испытаний по влажностному методу.

Варьируемые факторы: толщина слоев никеля $x_1$; серебра $x_2$, а также медного подслоя $x_3$, осажденного из электролита состава, г/л: сульфат меди — 200...250, серная кислота — 50...70; температура 18...25 °С, катодная плотность тока 1...2 А/дм$^2$ согласно ГОСТ 9.305—84. Использовали сульфаматный электролит никелирования, тиосульфатный электролит предварительного серебрения и электролит для ускоренного наращивания слоя серебра.

Ошибку эксперимента определяли из трех параллельных опытов на основном уровне и из параллельных опытов в каждой строке матрицы. Условия проведения опытов представлены в табл. 1.

Коррозионные испытания для тех опытов, в которых толщина серебряного слоя по подслою никеля составила 3 мкм, проводили в течение 10 суток (климатические условия группы "С"); для опытов с толщиной серебряного слоя 6 мкм — 21 суток (климатические условия группы "Ж"); для опытов с толщиной серебряного покрытия 9 мкм — 56 суток (климатические условия группы "ОЖ").

Максимальный разброс опытных данных и самые большие отличия от эталона наблюдали, как правило, для самой малой нагрузки на контакт 0,05 Н и минимального тока в цепи 0,02 А. Для них проводили расчет уравнения регрессии и ошибки опыта. Результаты приведены в табл. 2.

Для данной серии опытов уравнение регрессии с доверительной вероятностью $p = 0{,}95$ имеет вид:

$$Y = 35\cdot10^{-4} - 7{,}5\cdot10^{-4}x_2 - 5\cdot10^{-4}x_3.$$

*Таблица 1*

**Уровни варьирования изучаемых факторов и план эксперимента в кодовом и натуральном масштабе**

| Условия проведения и номера опытов | Факторы | | |
|---|---|---|---|
| | $x_1$ | $x_2$ | $x_3$ |
| Нижний уровень | 1 | 3 | 0 |
| Верхний уровень | 5 | 9 | 10 |
| Основной уровень | 3 | 6 | 5 |
| Интервал варьирования | 2 | 3 | 5 |
| Опыт 1 | +5 | −3 | −0 |
| Опыт 2 | −1 | −3 | +10 |
| Опыт 3 | +5 | +9 | +10 |
| Опыт 4 | −1 | +9 | −0 |

Функция отклика адекватна, значения переходного сопротивления уменьшаются с увеличением толщины медного подслоя и толщины слоя серебра.

Толщина слоя никеля в пределах, изученных в данном опыте (1...5 мкм), не влияет на величину переходного сопротивления, следовательно, толщину никелевого подслоя можно варьировать в этих пределах. Подслой свежеосажденной меди уменьшает пористость никелевого слоя. Восхождение по градиенту линейного приближения выполнить невозможно, так как для этого необходимо увеличить толщину серебряного слоя, а это противоречит цели опыта.

С помощью критерия Стьюдента [8] для доверительной вероятности 0,95 методом сравнения средних для двух выборок сопоставлено переходное сопротивление предлагаемых двухслойных и трехслойных покрытий с применяемыми в настоящее время. Результаты сравнения приведены в табл. 3. В проведенном эксперименте не нашли эквивалентной замены (для тока в цепи 0,02 А и

*Таблица 2*

**Измеренные значения переходного сопротивления и результаты статистического анализа при нагрузке на контакт 0,05 Н и токе в цепи 0,020 А для многослойных покрытий никель—серебро и медь—никель—серебро, осажденных по матрице планирования (первая серия опытов), и для серебряных покрытий толщиной 3; 6; 9 и 12 мкм**

| Покрытие, толщина (мкм) и номер опыта | $R_n \cdot 10^4$, Ом, для пар образцов | | | $\overline{R_n} \cdot 10^4$, Ом | $S^2 \cdot 10^8$, Ом$^2$ | $(\overline{R_n} \pm \Delta R) \cdot 10^4$, Ом, при $p = 0{,}95$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 1 | 2 | 3 | | | |
| Н5.Ср3 (опыт 1) | 40 | 55 | 50 | 48 | 59 | 48 ± 18 |
| М10.Н1.Ср3 (опыт 2) | 40 | 36 | 34 | 37 | 9 | 37 ± 7 |
| М10.Н5.Ср9 (опыт 3) | 20 | 25 | 25 | 23 | 8 | 23 ± 7 |
| Н1.Ср9 (опыт 4) | 30 | 35 | 30 | 32 | 8 | 32 ± 7 |
| М5.Н3.Ср6 (основной уровень) | 30 | 30 | 35 | 32 | 8 | 32 ± 7 |
| Ср3 | 40 | 40 | 35 | 38 | 8 | 38 ± 7 |
| Ср6 | 30 | 35 | 25 | 30 | 25 | 30 ± 12 |
| Ср9 | 20 | 25 | 30 | 25 | 25 | 25 ± 12 |
| Ср12 | 25 | 25 | 20 | 23 | 8 | 23 ± 7 |

Примечание. М — медь; Н — никель; Ср — серебро.

*Таблица 3*

**Данные о возможности замены покрытий серебром многослойными покрытиями никель—серебро и медь—никель—серебро, содержащими меньше серебра, при разных токах в цепи и нагрузках на контакт (надежность 95 %)**

| Сравниваемые покрытия | Нагрузка 0,05 Н при силе тока, А | | | | | | Нагрузка 0,25 Н при силе тока 0,02 А | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | 0,02 | | 0,05 | | 0,10 | | | |
| | $t_{рас}$ | Замена | $t_{рас}$ | Замена | $t_{рас}$ | Замена | $t_{рас}$ | Замена |
| Н5.Ср3 и Ср6 | 3,47 | + | 1,8 | + | 1,8 | + | 2,5 | + |
| М10.Н1.Ср3 и Ср6 | 1,95 | + | 1,3 | + | 1,3 | + | 0,6 | + |
| М5.Н3.Ср6 и Ср9 | 3,60 | — | 2,2 | + | 3,1 | — | 1,7 | + |
| М10.Н5.Ср6 и Ср9 | 0,60 | + | 0,9 | + | 0,6 | + | 0,8 | + |
| Н1.Ср9 и Ср12 | 2,00 | + | 2,4 | + | 3,3 | — | 2,2 | + |
| М10.Н5.Ср9 и Ср12 | 0,60 | + | 1,1 | + | 0,5 | + | 2,2 | + |

Примечание. (+) — замена возможна; (—) — замена невозможна.

*Таблица 4*

**Данные расчета и статистического анализа матрицы планирования**

| Сила тока, А | Нагрузка, Н | Уравнение регрессии |
|---|---|---|
| 0,10 | 0,05 | $Y = 25\cdot10^{-4} - 5\cdot10^{-4}x_2 - 2\cdot10^{-4}x_3$ (адекватно) |
| 0,05 | 0,05 | $Y = 30\cdot10^{-4} - 1{,}5\cdot10^{-4}x_1 - 5{,}5\cdot10^{-4}x_2 - 2\cdot10^{-4}x_3$ (адекватно) |
| 0,02 | 0,25 | $Y = 29\cdot10^{-4} - 7\cdot10^{-4}x_2 - 4{,}5\cdot10^{-4}x_3$ (адекватно) |

нагрузки на точечный контакт 0,05 Н) с экономией серебра покрытию Ср9.

Исходя из данных матрицы планирования, защитная способность трехслойных покрытий и устойчивость значений переходного сопротивления может быть увеличена при увеличении толщины подслоя меди. Поэтому для замены Ср9 испытано переходное сопротивление трехслойных покрытий М10.Н5.Ср6.

Для некоторых изученных значений токов в цепи и нагрузок на контакт в табл. 4 приведены уравнения регрессии для опытов матрицы планирования.

## Выводы

1. Разработан и рекомендован производству способ непосредственного серебрения никеля из бесцианистого электролита, позволяющий получать хорошо сцепленные серебряные покрытия с никелевой основой, удовлетворяющие ГОСТ 9.302—88.

2. Исследовано влияние состава и концентрации электролита, режимов электролиза, качества подготовки поверхности на сцепление серебряных покрытий с никелевым подслоем, осажденным на основу из меди и ее сплавов.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Ямпольский А.М., Ильин В.А.** Краткий справочник гальванотехника. Л.: Машиностроение, 1981. 269 с.
2. **Балакай В.И.** Закономерности электроосаждения никеля, серебра и сплавов на их основе: технологические, ресурсосберегающие и экологические проблемы: дис. ... канд. техн. наук. Новочеркасск: ЮРГТУ (НПИ), 2004. 342 с.
3. **Круглова Е.Г., Вячеславов П.М.** Контроль гальванических ванн и покрытий. М.—Л.: Машгиз, 1961. 148 с.
4. **Мельников П.С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
5. **ОСТ4 ГО.033.000.** Флюсы и припои для пайки. Состав, свойства, область применения. 1973.
6. **Справочное** руководство по гальванотехнике / под ред. В.И. Лайнера. М.: Металлургия, 1972. 488 с.
7. **Адлер Ю.П., Маркова Е.В., Грановский Ю.В.** Планирование эксперимента при поиске оптимальных условий. М.: Наука, 1976. 279 с.
8. **Вольф В.Г.** Статистическая обработка опытных данных. М.: Наука, 1976. 279 с.

***ООО "Издательство "Инновационное машиностроение" продолжает подписку на журнал***

**"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"**

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

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

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

УДК 621.9.025

**В.П. Табаков, М.Ф.Д. Аль Кадхими**
*(Ульяновский государственный технический университет),*
**Д.И. Сагитов**
*(Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева)*
*E-mail: vpt@ulstu.ru*

# Повышение эффективности спиральных сверл путем применения многослойных покрытий

*Представлены результаты исследований механических свойств износостойких покрытий. Показано влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент при сверлении. Предложена конструкция многослойного покрытия и показана его эффективность.*

***Ключевые слова:*** *сверло, сверление, износостойкие покрытия, механические свойства, работоспособность.*

*The studies results of the mechanical properties of wear-resistant coatings are presented. The effect of coatings on axial force and torque during drilling is shown. The design of multilayer coating is proposed and its efficiency is shown.*

***Keywords:*** *drill, drilling, wear-resistant coatings, mechanical properties, performance.*

## Введение

Сверление отверстий — одна из самых распространенных операций механической обработки в современном производстве. Процесс сверления протекает в сложных условиях, связанных с затрудненным теплоотводом и удалением стружки из зоны обработки. Одновременная работа большого числа режущих кромок и наличие поперечной кромки, которая сминает металл, усложняют процесс стружкообразования при сверлении и вызывают интенсивный износ инструмента. Повышения эффективности процесса сверления можно добиться нанесением на контактные площадки сверл износостойких покрытий [1—4].

**Цель работы —** повышение работоспособности спиральных сверл путем применения многослойных покрытий.

## Материалы и методика эксперимента

Покрытия наносили на установке "Булат-6". Химический состав покрытий определяли методом количественного рентгеноспектрального анализа на установке МАР-4 с учетом ZAF-поправок. Остаточные сжимающие напряжения $\sigma_0$ исследовали на дифрактометре "ДРОН-3М". Механические свойства покрытий (микротвердость $H_\mu$, модуль упругости $E$, коэффициент интенсивности напряжений $K_{1c}$, характеризующий трещиностойкость) определяли на микротвердомере Mitutoyo NH-125 (Япония) с использованием пирамиды Кнупа по методикам работы [5]. Циклическую трещиностойкость $T_ц$ рассчитывали по методике работы [6]. Адгезионную прочность покрытий оценивали по коэффициенту отслоения $K_о$ (меньшее значение коэффициента свидетельствовало о большей адгезионной прочности), определяемому согласно методике работы [1] на твердомере ТК-2М. При исследовании механических свойств использовали образцы-свидетели — пластины формы DNMA из сплава HTi10 MITSUBISHI CARBIDE (Япония). Исследование крутящего момента $M_{кр}$, Н·м, и осевой силы резания $P_о$, Н, проводили с использованием динамометра УДМ-600 и многоканального цифрового осциллографа, подключенного через аналогово-цифровой преобразователь [4]. Использовали цельнотвердосплавные сверла из однокарбидного твердого сплава производства фирмы DORMER (Германия) диаметром 5 мм, диаметром сердцевины 0,8 мм и стандартной геометрии. Работоспособность сверл оценивали по периоду стойкости при сверлении заготовок из стали 30ХГСА.

## Результаты исследований и их обсуждение

Для выбора состава слоев многослойного покрытия исследовали однослойные покрытия TiN, TiAlN и TiAlCrN. Покрытия TiN наносили катодами из титанового сплава ВТ1-0, TiAlN — двумя катодами из сплава титана с алюминием, TiAlCrN — двумя катодами из сплава титана с алюминием и составного катода из титана со вставкой из хрома. Химический состав покрытий представлен в табл. 1.

Механические свойства и остаточные напряжения в покрытиях приведены в табл. 2 [7, 8]. При переходе от одно- к двух- и трехэлементным покрытиям возрастают механические свойства и значение сжимающих остаточных напряжений. Наибольшую прочность адгезии с инструментальной основой имеют двухэлементные покрытия TiAlN.

*Таблица 1*

**Химический состав покрытий**

| Покрытие | Содержание элементов в покрытии, % ат. | | | |
|---|---|---|---|---|
| | Ti | Al | Zr | Cr |
| TiAlN | 77 | 23 | — | — |
| TiZrN | 84,7 | — | 15,3 | — |
| TiAlCrN | 78 | 16 | — | 6 |

*Таблица 2*

**Механические свойства однослойных покрытий**

| Покрытие | $H_\mu$, ГПа | $E$, ГПа | $K_{1c}$, МПа·м$^{1/2}$ | $K_o$ | $\sigma_0$, МПа |
|---|---|---|---|---|---|
| TiN | 27,8 | 307 | 3,39 | 1,100 | −775 |
| TiAlN | 30,5 | 369 | 4,07 | 0,907 | −902 |
| TiAlCrN | 33,4 | 403 | 4,08 | 1,250 | −1472 |

*Таблица 3*

**Влияние покрытий на осевую силу и крутящий момент**

| Покрытие | $M_{кр}/P_o$ на кромках сверла | | | Суммарные $M_{кр}/P_o$ |
|---|---|---|---|---|
| | главных режущих | вспомогательных режущих | поперечных | |
| Без покрытия | 0,22/392 | 0,06/107 | 0,13/214 | 0,41/713 |
| TiN | 0,18/320 | 0,02/35 | 0,11/190 | 0,31/545 |
| TiAlN | 0,18/328 | 0,02/36 | 0,11/200 | 0,31/564 |
| TiAlCrN | 0,18/332 | 0,03/36 | 0,12/210 | 0,33/578 |
| Примечание. v = 10 м/мин, $S$ = 0,1 мм/об. | | | | |

Исследования осевой силы и крутящего момента проводили при сверлении специальных заготовок (рис. 1), позволяющих определить указанные параметры на различных кромках сверла. Результаты данных исследований представлены в табл. 3 и рис. 2.

Анализ данных табл. 3 показывает, что нанесение покрытий снижает суммарную осевую силу и крутящий момент по сравнению со сверлами без покрытий в 1,24...1,32 раза в зависимости от состава покрытий. При этом влияние покрытий на снижение осевой силы и крутящего момента, действующих на разных кромках сверла, не одинаково.

При сверлении на более высокой скорости резания (рис. 2) выявлены аналогичные закономерности, но при этом эффективность покрытий, с точки зрения снижения осевой силы и крутящих моментов, действующих на разных кромках, несколько выше.

Значительное снижение осевой силы и крутящего момента происходит на вспомогательной режущей кромке. По сравнению со сверлом без покрытия осевая сила уменьшилась в 2,9...3,1 раза, а крутящий момент — в 2...3 раза в зависимости от состава покрытия. На главной режущей и поперечной кромках снижение указанных параметров существенно ниже. Так, на главной режущей кромке оно составило 15,3...18,4 % для осевой силы и 18,2 % для крутящего момента, на поперечной кромке — соответственно 2...11,2 % и 7,6...15,4 %. Наибольшее снижение осевой силы и крутящего момента на вспомогательной режущей кромке по сравнению с главной режущей и поперечной кромками связано со снижением сил трения при нанесении покрытий. Как известно, составляющие осевой силы и крутящего момента, действующие на вспомогательных режущих кромках, определяются силами трения. Нанесение покрытий ведет к их снижению и влияние сил трения на уменьше-

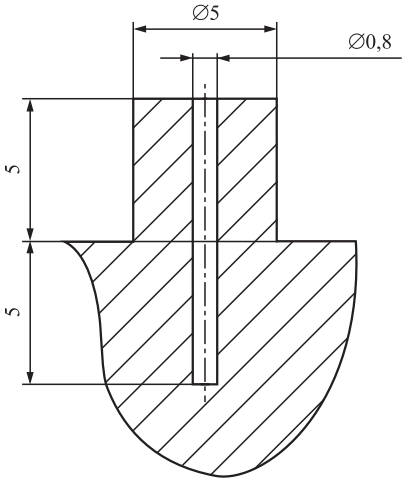



**Рис. 1. Эскиз заготовки**

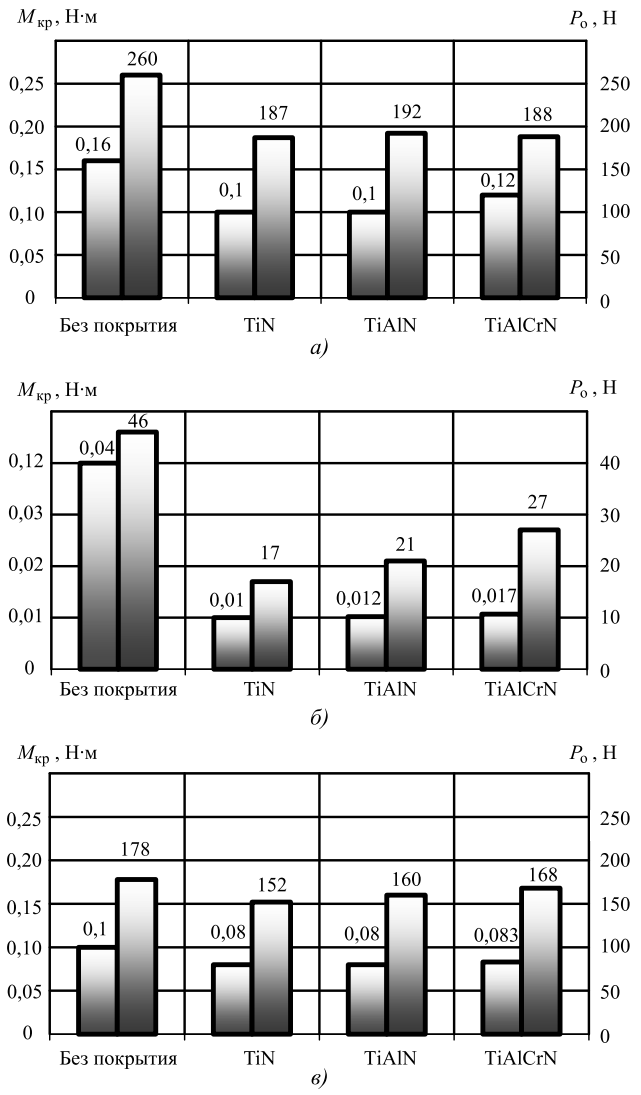



**Рис. 2. Влияние износостойких покрытий на крутящий момент $M_{кр}$ и осевую силу резания $P_о$, действующих на главной режущей кромке (*а*), вспомогательной режущей кромке (*б*) и на поперечной кромке (*в*):**
v = 25 м/мин, $S$ = 0,09 мм/об

ние осевой силы и крутящего момента на вспомогательных режущих кромках проявляется в большей степени по сравнению с другими кромками.

Исследования показывают, что для сверл с покрытиями и без покрытия соотношение составляющих осевой силы и крутящего момента, действующих на разных кромках сверла, остается без изменения. Наибольшая доля осевой силы и крутящего момента приходится на главную режущую кромку, несколько меньше — на поперечную и наименьшая — на вспомогательную. В то же время, значительное снижение осевой силы и крутящего момента на вспомогательных режущих кромках для сверл с покрытиями ведет к существенному уменьшению их доли на данных кромках и небольшому повышению на главной режущей и поперечной кромках. Так, для сверл без покрытия доля осевой силы и крутящего момента на вспомогательных кромках составляет соответственно 15 и 14,6 %, а для сверла с покрытием TiN — 6,4 % как для осевой силы, так и для крутящего момента. Выявлена тенденция небольшого роста осевой силы и крутящего момента при переходе от одноэлементных покрытий к многоэлементным. Согласно работам [9, 10], данный переход сопровождается ростом коэффициента трения, соответственно степени пластической деформации материала и составляющих силы резания, что и отражается на осевой силе и крутящем моменте.

На основе анализа проведенных исследований была предложена конструкция двухслойного покрытия. Принимая во внимание, что процесс сверления протекает в условиях стесненного резания, формирование данного покрытия проводили на основе принципа, изложенного в работах [2, 11]. В качестве нижнего слоя покрытия для обеспечения прочности адгезии с инструментальной основой был выбран двухэлементный нитрид TiAlN, имеющий меньший коэффициент отслоения $K_о$ (см. табл. 2). В качестве верхнего слоя следует использовать трехслойное покрытие TiAlCrN. Данное покрытие имеет более высокие механические свойства и уровень сжимающих остаточных напряжений по сравнению с другими, что очень важно с точки зрения формирования в процессе резания сжимающих нормальных напряжений, снижающих интенсивность процессов трещинообразовани [2, 4, 8]. В то же время, как показали проведенные исследования, данное покрытие в равной степени с другими снижает осевую силу и крутящий момент при сверлении.

Для определения рациональной конструкции двухслойного покрытия исследовали влияние соотношения слоев покрытия на механические свойства. Результаты данных исследований представлены в табл. 4.

Анализ данных табл. 4 показывает, что рациональное соотношение механических свойств

*Таблица 4*

**Влияние толщины слоя TiAlCrN на механические свойства покрытия**

| Толщина слоя TiAlCrN, мкм | $T_ц$, мин | $H_μ$, ГПа | $K_о$ | $E$, ГПа | $K_{1c}$, МПа·м$^{1/2}$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 2 | 39,8 | 32,2±1,5 | 0,26 | 415,9±23,8 | 4,48 |
| 3 | 55,0 | 32,8±1,3 | 0,22 | 423,7±29,1 | 4,57 |
| 4 | 43,6 | 33,0±1,9 | 0,21 | 424,1±25,4 | 4,56 |
| Примечание. Общая толщина покрытия 6 мкм. | | | | | |

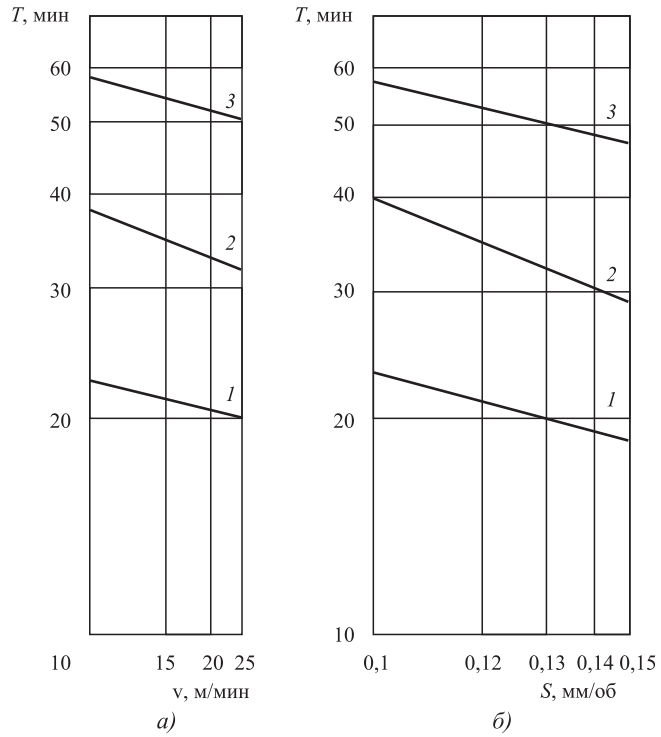



**Рис. 3. Влияние скорости резания v (*а*) и подачи на оборот *S* (*б*) на период стойкости *T* сверл:**
*1* — без покрытия; *2* — TiN; *3* — TiAlN—TiAlCrN;
*а* — *S* = 0,12 мм/об; *б* — v = 20 м/мин

функциональных слоев двухслойного покрытия достигается при толщине верхнего слоя, равного 4 мкм, а нижнего — 2 мкм. При таком соотношении слоев обеспечивается достаточная прочность адгезии (коэффициент $K_o$ имеет минимальное значение), высокие значения микротвердости, модуля упругости и циклической трещиностойкости.

Для оценки эффективности предложенного двухслойного покрытия провели стойкостные испытания сверл при сверлении заготовок из стали 30ХГСА. Результаты данных исследований представлены на рис. 3.

Как видно из полученных данных, применение двухслойного покрытия повышает период стойкости сверл в 2,5 раза по отношению к сверлам без покрытия и в 1,7 раза — по отношению к сверлам с покрытием TiN в зависимости от режима обработки.

## Выводы

1. Показано, что применение износостойких покрытый снижает крутящий момент и осевую силу при сверлении заготовок из стали 30ХГСА.

2. Наибольшее снижение осевой силы и крутящего момента (в 2,9...3,1 раза) наблюдается на вспомогательной режущей кромке. На главной режущей и поперечной кромках оно существенно меньше и составляет 7,6...18,4 %.

3. Нанесение покрытий не нарушает процентного соотношения осевой силы и крутящего момента, действующих на различных кромках сверла, но существенно снижает долю осевой силы и крутящего момента, приходящейся на вспомогательную кромку, и повышает ее на главной режущей и поперечной кромках.

4. Разработана конструкция двухслойного покрытия, определено соотношение слоев покрытия, обеспечивающее рациональное сочетание механических свойств покрытия.

5. Применение двухслойного покрытия TiAlN—TiAlCrN повышает период стойкости сверл при сверлении заготовок из стали 30ХГСА в 1,7—2,5 раза.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Табаков В.П.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 122 с.

2. **Табаков В.П.** Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.

3. **Верещака А.С.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.

4. **Табаков В.П., Сагитов Д.И.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями в условиях стесненного резания. Ульяновск: УлГТУ, 2015. 197 с.

5. **Табаков В.П., Чихранов А.В.** Определение механических характеристик износостойких ионно-плазменных покрытий на основе нитрида титана // Известия Самарского научного центра РАН. 2010. Т. 12. № 4. С. 292—297.

6. **Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Тулисов А.Н., Чихранов А.В.** Методика расчета трещиностойкости многослойных покрытий режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 3. С. 43—48.

7. **Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В., Чихранов А.В.** Механические свойства ионно-плазменных износостойких покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 11. С. 50—52.

8. **Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В., Чихранов А.В.** Исследование механических свойств и напряженного состояния трехэлементных нитридных покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 2. С. 3—6.

9. **Табаков В.П., Григорьев С.Н., Верещака А.С.** Принципы формирования и технологии нанесения износостойких покрытий режущего инструмента. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 196 с.

10. **Табаков В.П., Верещака А.С., Григорьев С.Н.** Фукнциональные параметры процесса резания режущим инструментом с износостойкими покрытиями. Ульяновск: УлГТУ, 2012. 172 с.

11. **Табаков В.П., Сагитов Д.И.** Применение инструмента с износостойкими покрытиями на операциях резьбонарезания и отрезки заготовок // Вестник машиностроения. 2016. № 4. С. 59—64.

УДК 621.9.47

**В.П. Смоленцев, А.А. Широкожухова, С.В. Сафонов, Е.А. Салтанаева**
*(Воронежский государственный технический университет)*
*E-mail: vsmolen@inbox.ru*

# Комбинированная обработка каналов в керамических деталях

*Рассмотрена технология изготовления сквозных и глухих каналов различного сечения и профиля оси в керамических фильтрах и форсунках, применяемых в тепловых двигателях и приводах генераторов тока для подачи и очистки жидкого топлива. Приведены сведения об изготовлении керамических фильтров, предназначенных для предварительной и тонкой очистки жидких топлив, имеющих повышенную термическую и химическую стойкость при работе в горячей зоне авиационных и ракетных двигателей. Показана возможность их использования в энергетических машинах и установках, работающих при больших перепадах давления при очистке агрессивных сред и в условиях вибрации изделий. Разработаны и реализованы новые технологические приемы для комбинированного изготовления каналов большой длины и малого сечения при различной конфигурации и положении осей отверстий, улучшающих эксплуатационные показатели деталей. Созданы новые, на уровне изобретений, способы и устройства для комбинированной обработки сквозных и глухих каналов с анодным растворением металлических вставок под действием ультразвукового луча, локально усиливающего массовынос из зоны формирования канала. Показаны преимущества комбинированной обработки с использованием ультразвуковых колебаний для интенсификации процесса получения в керамике сквозных и глухих отверстий, что успешно заменяет ранее применяемые технологические способы и средства технического оснащения, а также расширяет возможности технологов при изготовлении форсунок и фильтров, отвечающих эксплуатационным требованиям в создаваемых и осваиваемых отечественной промышленностью изделиях новых поколений техники.*

***Ключевые слова:*** *керамика, канал, отверстие, форсунка, фильтр, анодное растворение, ультразвуковой луч.*

*The manufacturing of technology through and blind channels of different cross-section and axis profile in ceramic filters and nozzles used in heat engines and drives of current generators for supply and purification of liquid fuel is considered. The information on the manufacture of ceramic filters designed for pre- and fine purification of liquid fuels with increased thermal and chemical resistance when working in the hot zone of aircraft and rocket engines are presented. The possibility of their use in power machines and installations operating at large pressure drops during purification of corrosive medium and in vibration conditions of products is shown. New techniques for the combined manufacture of large length and small cross-section channels with different configuration and position of the holes axes improving the performance of the components are developed and implemented. New, at the level of inventions, methods and devices for combined processing of through and blind channels with anodic dissolution of metal inserts under the action of ultrasonic beam locally amplifying the mass transfer from the channel formation zone are created. The advantages of combined treatment with the use of ultrasonic vibrations for intensification of obtaining process in ceramics of through and blind holes are shown, which successfully replaces the previously used technological methods and means of technical equipment and also expands the capabilities of technologists at production of nozzles and filters that meet the operational requirements in the products created and mastered by the domestic industry of new generations of technology.*

***Keywords:*** *ceramics, channel, hole, nozzle, filter, anode dissolution, ultrasonic beam.*

## Введение

Для повышения эксплуатационных характеристик энергетических машин новых поколений требуется создание высокоресурсных систем подачи жидких топлив, а также их предварительной и тонкой очистки. В технике для этих целей применяют различные виды деталей из металлических

и других материалов, в том числе из жаропрочных керамик [1], обеспечивающих большой ресурс форсунок и фильтров при возможности их применения в горячей зоне двигателей. В авиационной и космической отрасли основные виды форсунок имеют элементы из керамики, а фильтры выполняют монолитными из материалов, выдерживающих термические удары, длительную вибрацию, обладающих хорошей защитой от химического воздействия жидких сред. Одно из направлений создания средств подачи и очистки горючих сред — использование керамических фильтров, обладающих перечисленными свойствами, но сложными в изготовлении. Большинство традиционных методов получения даже простых каналов для сопел и фильтрации не обеспечивают требуемого качества отверстий или непригодны для этих целей. Выполненные исследования показали, что наиболее эффективными способами получения в керамических деталях глубоких отверстий с малой площадью сечения и различными векторами течения струй жидкости являются комбинированные методы [2, 3], в которых для интенсификации процесса прошивки каналов применяют локальное воздействие ультразвукового луча [5, 6]. При этом требуется совмещение конструктивных особенностей керамических деталей с возможностями процесса комбинированной обработки, что достигается в процессе отработки конструкторской и производственной технологичности [5, 6]. Особого

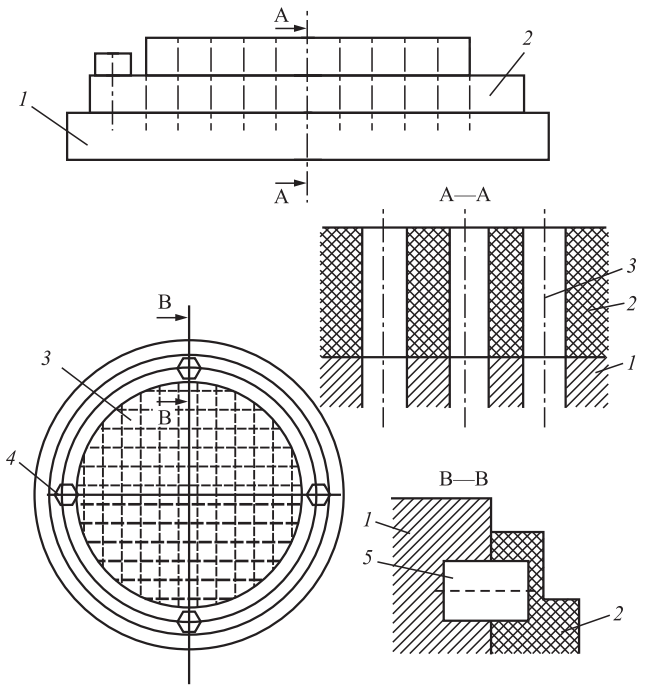



**Рис. 1. Керамический фильтр в сборе:**
*1* — корпус фильтра; *2* — фильтр; *3* — канал в фильтре; *4* — винт крепежный; *5* — штифт

подхода требуют установка и закрепление фильтрующего элемента на корпусе изделия (рис. 1).

На рис. 1 показано, что после изготовления отверстий *3* (разрез А—А на рис. 1) требуется получить в фильтрующей части *2* точные углубления (разрез В—В) для установки штифтов *5*, соединяющих его с корпусом *1*, перед закреплением винтами *4*. Здесь комбинированные способы обработки позволяют получить требуемые для сборки фильтра углубления.

## Конструкция каналов фильтрующих элементов из керамики

При отработке технологичности деталей из керамики необходимо учитывать свойства материала: повышенную твердость, ограничивающую возможности лезвийной и абразивной обработки, хрупкость, возможность растрескивания под действием вибраций, что приводит к необходимости изменять толщину заготовок, форму и положение каналов для подачи и фильтрации жидкости.

Возможности предлагаемых способов комбинированных обработки каналов [2, 3, 7] позволяют получать круглые, квадратные, многогранные и другие формы сечений проточной части деталей, которые влияют на эксплуатационные показатели изделий, например на их возможности фильтрования. Так, снижение толщины перемычки в каналах относительно круглой формы позволяет снизить габаритные размеры и массу изделий, что положительно влияет на эксплуатационные показатели фильтров и форсунок для летательных аппаратов.

Форма и положение оси канала позволяет улучшать гидродинамику за счет снижения потерь давления и увеличения скорости протекания горючей жидкости.

Прямолинейное положение оси канала упрощает и ускоряет прошивку отверстий, но ограничивает возможности достижения требуемых эксплуатационных свойств деталей. Наклон и изгиб оси канала устраняет ударные импульсы при течении, но усложняет процесс обработки и увеличивает трудоемкость операции. Перспективным является получение каналов в виде сопла Лаваля [8], в котором можно получить значительное увеличение расходных характеристик форсунок, фильтров и качество фильтрации топлива.

## Комбинированная обработка сквозных отверстий в керамических деталях

Разработан и внедрен способ получения глубоких отверстий малого диаметра в прессованных керамических деталях по авторскому свидетельству [2]. Схема такого способа и устройства приведена на рис. 2.

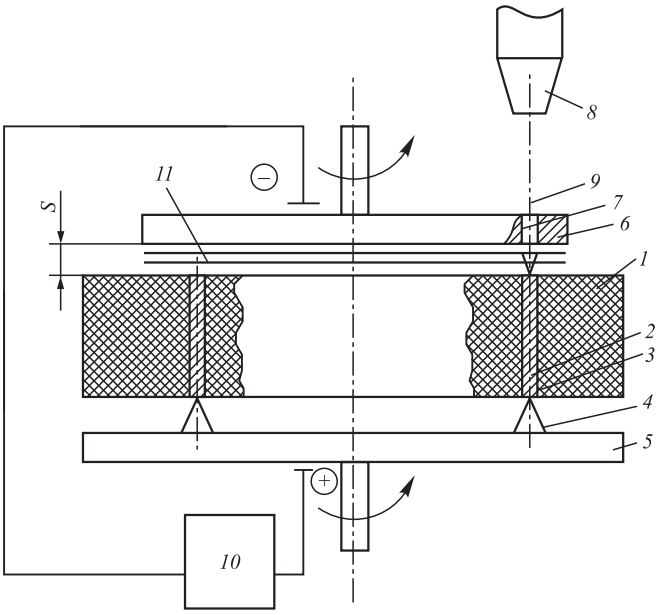



**Рис. 2. Схема устройства для комбинированной прошивки глубоких отверстий в керамических деталях**

Для получения отверстий в деталь *1* (на рис. 2 круглая) из диэлектрического материала в процессе прессования вставляют металлические стержни *3*. Один конец стержней упирается в опоры *4* на токоподводе *5*, который может поворачиваться относительно оси на шаг, равный расстоянию между соседними отверстиями. Соосно с деталью *1* установлен электрод-инструмент *6* с отверстием *7*, диаметр которого не более чем диаметр отверстия в детали. Электрод-инструмент может вращаться вокруг своей оси. При совпадении осей отверстий *2* и *7* от источника ультразвуковых импульсов *8* подается луч *9* концентрированного импульса колебаний на торцевую часть стержня *3*. Этот процесс аналогичен работе ультразвуковой сирены, обладающей большой плотностью энергии и обеспечивающей интенсивный вынос из отверстия в детали продуктов анодного растворения, осуществляемого за счет униполярного тока, подаваемого от источника *10*. Процесс протекает между электродом в среде прокачиваемого через межэлектродный зазор *S* электролита *11*.

Рассмотренный способ позволяет получать сквозные отверстия с соотношением глубины к диаметру до 100:1, при этом они могут иметь любую форму сечения и криволинейную ось, что недоступно при других способах изготовления отверстий. При этом кромки отверстий в детали не повреждаются, так как они защищены от разрушения электродом-инструментом *6*. Воздействие луча возможно только в момент совмещения осей отверстий *2* и *7*.

На экспериментальной установке были проведены испытания данного способа. В качестве образца исследовали керамический диск толщиной 12 мм, в который в процессе прессования заложили стержни из латуни диаметром 0,2 мм. К одному концу стержней, выходящему на поверхность, был припаян токоподвод-анод от выпрямителя постоянного тока 5 А. Межэлектродный зазор между диском-катодом и керамическим диском со стержнями поддерживался в пределах 0,25...0,30 мм. Источник ультразвуковых импульсов имел мощность 2 Вт/см$^2$ и работал в импульсном режиме.

Процесс анодного растворения протекал в 12%-ном растворе хлористого натрия, прокачиваемого через зазор за счет перепада высот нахождения емкости и места обработки (10 м) со скоростью 0,2...0,3 м/с.

Окружную скорость v вращения электрода-инструмента рассчитывали через шаг $L$ между соседними отверстиями:

$$v = KL/T, \qquad (1)$$

где $K$ — коэффициент кратности ($K$ = 1; 2; 3, ...); $T$ — период между импульсами тока, $T = 1/f$, $f$ — частота импульсов.

Расчет длительности $\tau_п$ пауз между импульсами тока:

$$\tau_п = (d_о - d_и)/v,$$

где $d_о$ — диаметр отверстия в детали, мм; $d_и$ — диаметр активной зоны излучателя, мм;

Для рассматриваемого случая v = 20 мм/с; $\tau_п$ = 0,025 с.

Полное формирование сквозного отверстия глубиной 2 мм занимает ~12 мин. Аналогичная операция без комбинации с ультразвуковым массовыносом обеспечивала получение отверстия глубиной менее 0,5 мм, после чего процесс прекращался и операция становилась неосуществимой.

Рассмотренное в работе [2] изобретение является научной базой для получения глубоких отверстий малого поперечного сечения, применяемого в соплах форсунок, отверстий в фильтрах. Такой способ позволяет получать в керамических форсунках и фильтрах каналы с любой геометрией для подачи рабочей среды, что расширяет возможности разработчиков новой техники создавать перспективные наукоемкие изделия, в том числе керамические форсунки и фильтры.

Для получения "глухих" отверстий в аналогичных деталях (например, центральное отверстие в керамическом корпусе) был предложен способ по авторскому свидетельству [3]. Схема осуществления способа приведена на рис. 3.

В корпусе детали из диэлектрического материала, например керамики, требуется выполнить глубокое глухое отверстие *2*. Способ, предложенный в работе [2], не позволяет выполнить такую

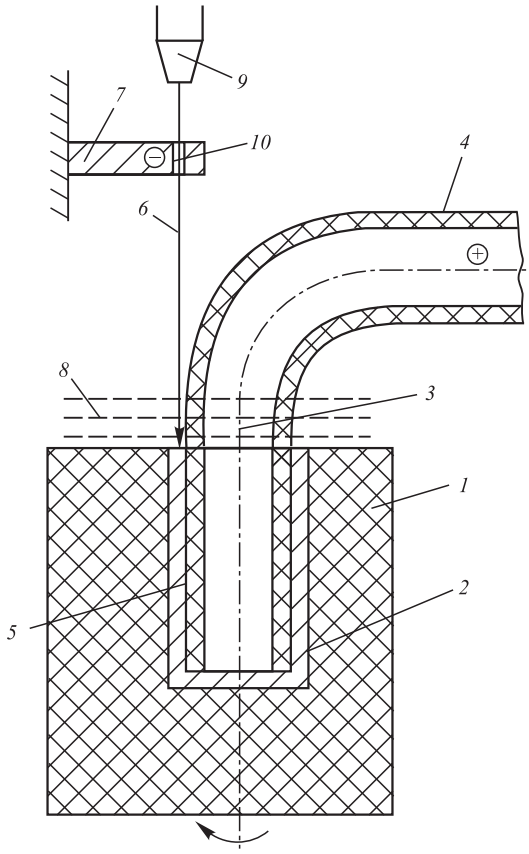



**Рис. 3. Схема устройства для изготовления "глухих" отверстий в диэлектрических материалах:**
*1* — деталь; *2* — отверстие; *3* — стержень; *4* — диэлектрическое покрытие; *5* — металлизированное покрытие; *6* — ультразвуковой луч; *7* — электрод-инструмент; *8* — электролит; *9* — ультразвуковой излучатель; *10* — отверстие в инструменте

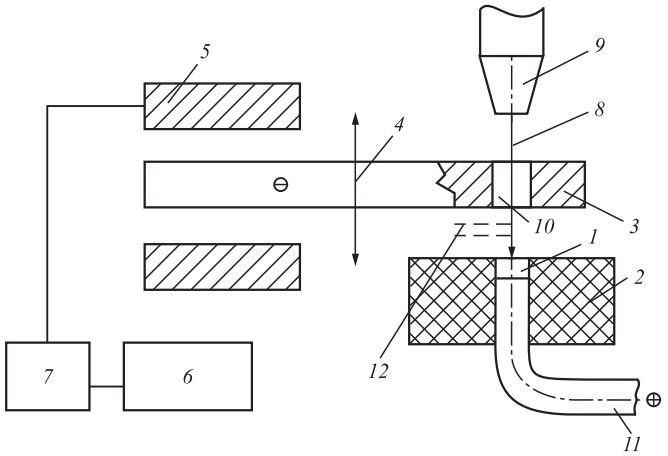



**Рис. 4. Схема комбинированной обработки с колебанием электрода-инструмента**

операцию. В предлагаемом способе [3] стержень *3* имеет диэлектрическое покрытие *4*, на которое наносят металлизацией покрытие *5* (включая торцевую поверхность стержня). Если диаметр отверстия *2* превышает десятые доли миллиметра и оно имеет переменный по длине профиль, то целесообразно покрытие *5* заменить металлической втулкой, имеющей профиль отверстия *2*. На торце стержня *3* закрепляют металлическую шайбу, и подключают его к положительному полюсу источника униполярного тока. Вместе с электродом-инструментом *7* (катод) стержень *3* образует электрический контур, работающий в среде электролита *8*, что обеспечивает анодное растворение покрытия *5*, не нарушая геометрию стержня. При этом продукты анодного растворения покрытия *5* могут удаляться в электролит. Чтобы предохранить отверстие *2* от повреждения, луч *6* пропускают через отверстие *10* в электроде-инструменте. Если позволяет конструкция детали, то ее вместе со стержнем вращают. Процесс продолжают до полного растворения покрытия *5*, после чего стержень извлекают из отверстия.

В ряде случаев вращение детали невозможно. Тогда применяют колебательные перемещения электрода или шаблона, отклоняющие луч в пределах отверстия в диэлектрической детали [8]. При этом исключается необходимость в прокачке электролита от насоса, так как эти функции выполняет колеблющийся электрод. Схема осуществления способа, когда колебательные движения совершает инструмент, приведена на рис. 4.

Для усиления массовыноса продуктов обработки из обработанной части отверстия *1* в диэлектрической детали *2* без ее вращения, электроду-инструменту *3* придают перемещения *4* между ограничителями *5*, колебания в которых управляются регулятором *6* амплитуды вибраций, вырабатываемых генератором *7* с фиксированной частотой, кратной 50 Гц. Луч *8* от ультразвукового излучателя *9* отклоняется стенками отверстия *10* в электроде-инструменте с амплитудой, при которой продукты обработки удаляются из отверстия *1*. При этом луч *8* не выходит за границы отверстия *1* и не разрушает деталь. Ограничители *5* позволяют снижать амплитуду колебаний электрода-инструмента *3* по мере углубления в отверстие *1* луча *8* и удаления стержня *11*. Процесс анодного растворения стержня происходит в прокачиваемой рабочей среде — электролите *12*.

Расчет частоты *f* выполняют по формуле:

$$f = \frac{1}{A}\mathrm{v}, \qquad (2)$$

где *A* — амплитуда изменения положения луча в отверстии детали; v — средняя скорость перемещения луча между границами отверстия в детали.

Для расчетов устанавливают границы перемещения электрода-инструмента *3*, при которых луч *8* достигает границ зоны обработки отверстия в детали, но не воздействует на деталь. В этом слу-

чае ограничители вибрации электрода — инструмента сближаются пропорционально углублению луча в отверстие в детали.

## Заключение

Рассмотренные комбинированные методы получения каналов в керамических деталях позволяют значительно расширить технологические возможности форсунок и фильтрующих элементов, изготовление которых востребовано для новых конструкций энергетических машин, магистралей подачи топлива в двигателях летательных аппаратов и в наземных установках.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Салтанаева Е.А., Газизуллин К.М.** Изготовление отверстий в керамических форсунках системы подачи топлива энергетических установок // Проблемы энергетики. 2013. № 11—12. С. 68—76.

2. **А. с. 944850 СССР.** Способ электрохимической обработки импульсами технологического тока / В.П. Смоленцев и др. 1982. Бюл. изобр. № 27.

3. **А. с. 1673329 СССР.** Способ изготовления диэлектрических деталей с отверстиями / В.П. Смоленцев и др. 1991. Бюл. изобр. № 32.

4. **Приходько В.М.** Ультразвуковые технологии при производстве, эксплуатации и ремонте транспортной техники. М.: Техполиграфцентр, 2003. 253 с.

5. **Портных А.И., Смоленцев В.П., Скрыгин О.В.** Отработка технологичности изделий под электрические методы обработки // Наукоемкие технологии в машиностроении. 2018. № 11. С. 30—34.

6. **Наукоемкие** технологии в машиностроении / под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

7. **А. с. 1085734 СССР.** Способ электрохимикомеханической обработки. 1984. Бюл. изобр. № 14.

8. **Владыкин А.В., Овчинников Е.Ю., Коптев И.И.** Оценка области использования электроэрозионной и комбинированной обработки для отверстий малого диаметра // Обеспечение качества продукции на этапах конструкторской и технологической подготовки производства: межвуз. сб. науч. тр. 2012. Вып. 10. С. 70—75.

УДК 621.011.015

**[1]А.В. Щедрин, [2]А.А. Бекаев, [3]Н.Ю. Чихачева, [4]Т.А. Бурлакова**

*([1]Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана,*
*[2]Московский политехнический университет,*
*[3]Академия проблем качества, МБОУ СОШ № 1, г. Покров,*
*[4]МБОУ "Ликино-Дулевская гимназия", Московская обл.)*
*E-mail: mt13@bmstu.ru*

# Инновационные методы комбинированной обработки

*С использованием алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" специалистами кафедры МТ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана синтезированы конкурентоспособные методы комбинированной обработки инструментами с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях различных технологий применения инновационных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского".*

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

*Competitive methods of combined processing by tools with regular surface microgeometry in various technologies for the use of innovative metal plaque lubricants implementing fundamental scientific discovery of Garkunov—Kragelsky effect of wearlessness in friction are synthesized with the use of algorithmic procedures "artificial technological intellect" by specialists of the MT-13 department of Bauman Moscow State Technical University.*

***Keywords:*** *regular microrelief, metal plaque lubrication, wearlessness in friction effect.*

В энциклопедическом издании [1] представлены основные современные тенденции развития методов деформирующей, режущей и комбинированной обработки. С использованием алгоритмических процедур "искусственного технологического интеллекта" [2] и фундаментального импортозамещающего направления "Трибология на основе самоорганизации" [3—5] специалистами кафедры МТ-13 МГТУ им. Н.Э. Баумана системно синтезированы инновационные методы обработ-

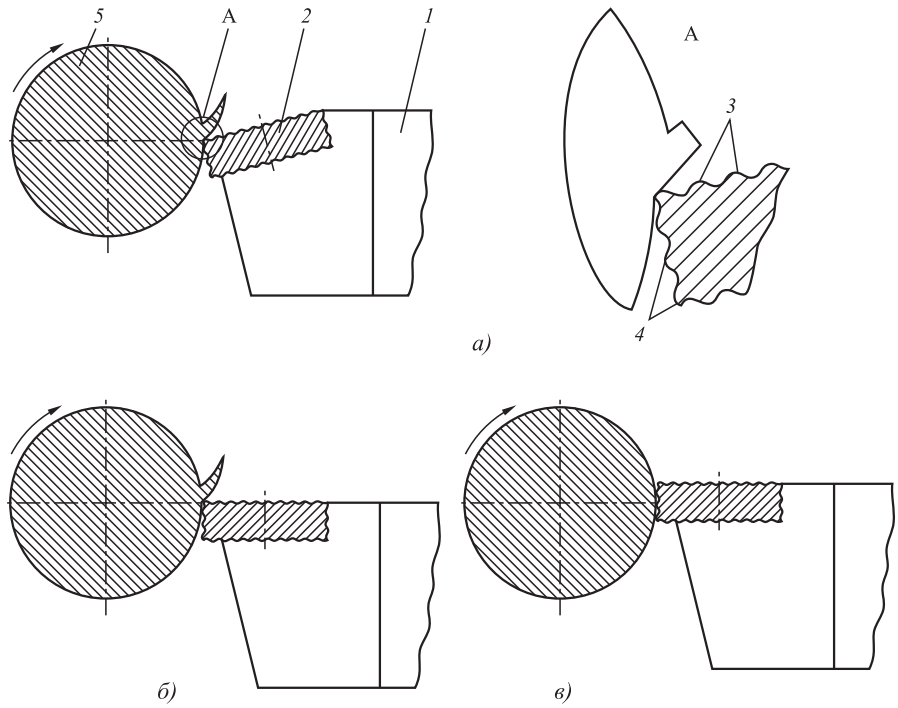



**Рис. 1. Схемы методов режущей (*а*), режуще-выглаживающей (*б*) и выглаживающей (*в*) обработки**

ки инструментами с регулярной микрогеометрией поверхности в условиях различных технологий применения современных металлоплакирующих смазок, реализующих эффект безызносности при трении Гаркунова—Крагельского (дипломы № 41, 378 Госреестра научных открытий СССР, патент РФ № 2277579).

На рис. 1 представлен сборный инструмент, состоящий из корпуса (державки) *1*, в которой закреплена пластина *2*, на передней и задней поверхностях которой выполнен регулярный микрорельеф *3*, *4*, представляющий собой систему впадин и выступов правильной геометрической формы [3].

В зависимости от способа установки пластины *2* можно реализовать метод режущей обработки (рис. 1, *а*) — патент РФ № 2261781, режуще-выглаживающей обработки (рис. 1, *б*) или выглаживания (рис. 1, *в*). При резании (см. рис. 1, *а*) с подачей металлоплакирующей смазки (не показана) в канавках регулярного микрорельефа аккумулируются ее значительные объемы, минимизирующие трение и износ.

При комбинированной режуще-выглаживающей обработке (см. рис. 1, *б*) после режущего воздействия поверхность детали *5* выглаживается задними поверхностями пластины *2* с нулевыми углами. При этом в зависимости от расположения канавок регулярного микрорельефа *4* на задних поверхностях пластины *2* он может переноситься на поверхность детали *5* [6].

Окончательную отделочно-упрочняющую обработку детали можно выполнить по схеме (см. рис. 1, *в*), когда пластина *2* установлена выше оси детали. В условиях современного автоматизированного производства такую обработку можно проводить на станках с ЧПУ путем предварительной регуляризации микрогеометрии поверхности [3] сменных многогранных неперетачиваемых пластин стандартного сборного инструмента.

Аналогично может быть кардинально улучшен применяемый в промышленности метод "широкого выглаживания" [1]. Особенно эффективными схемы обработки (см. рис. 1) будут для ротационных инструментов [7, 8].

На рис. 2 представлен обрабатывающий модуль, включающий в себя деформирующую фильеру *1* с винтовым расположением воздействующих поверхностей и фильеру *2* с их нулевым углом наклона. На воздействующих поверхностях рабочих каналов фильер выполнен соответствующий регулярный микрорельеф *3*, *4* [3].

На сопряженных торцах фильер выполнены радиальные пазы *5*, *6*, по которым через отвер-

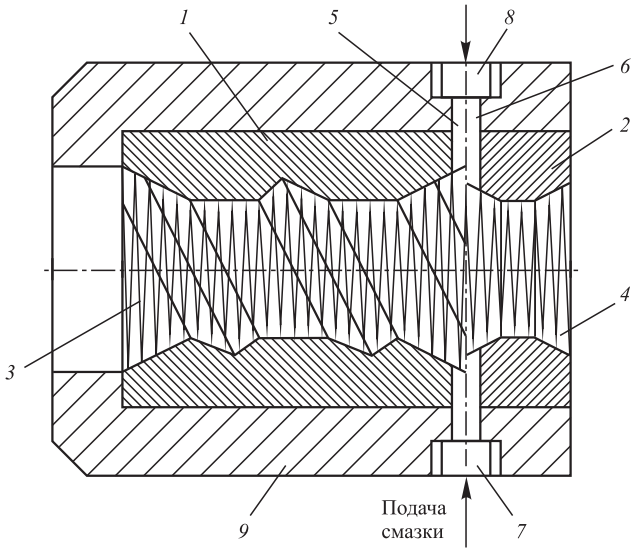



**Рис. 2. Инструментальный модуль для комбинированной охватывающей обработки**

стия *7*, *8* обоймы *9* в очаги деформации [9, 10], образованные каждой фильерой, под давлением (патент РФ № 2560475) подается металлоплакирующая смазка. Наличие винтового макроканала у фильеры *1* обеспечивает свободное истечение смазки и надежное ее поступление в очаг деформации на микроуровне по канавкам регулярного микрорельефа по аналогии с инструментами [11, 12]. При этом основная доля пластической деформации обрабатываемой заготовки приходится на фильеру *1*.

Данный инструментальный модуль будет особенно эффективен для формообразующей охватывающей обработки длинномерных полых профилей с внутренними прямыми или винтовыми канавками (патент РФ № 2593062). Причем полая короткая заготовка таких изделий в процессе обработки базируется на фасонной технологической оправке по аналогии со схемой [13].

Для охватывающей обработки в целях деформационного наноструктурирования поверхностного слоя получаемых изделий по аналогии с работой [14] предназначена сборная фильера, представленная на рис. 3. Инструмент состоит из обоймы *1*, в которую запрессованы инструментальные вставки *2*, *3*, имеющие угловое расположение рабочих каналов.

На сопряженных торцах вставок выполнены радиальные каналы *4*, *5*, по которым через отверстия *6*, *7* обоймы *1* под давлением подается металлоплакирующая смазка. Воздействующие поверхности рабочих каналов упрочнены соответствующим регулярным микрорельефом *8*, *9*. Угловое расположение рабочих каналов инструментальных вставок обеспечивает значительные сдвиговые деформации в поверхностном слое протягиваемого длинномерного профиля (на рисунке не показан), в результате чего происходит значительное измельчение зерен исходного материала — деформационное наноструктурирование.

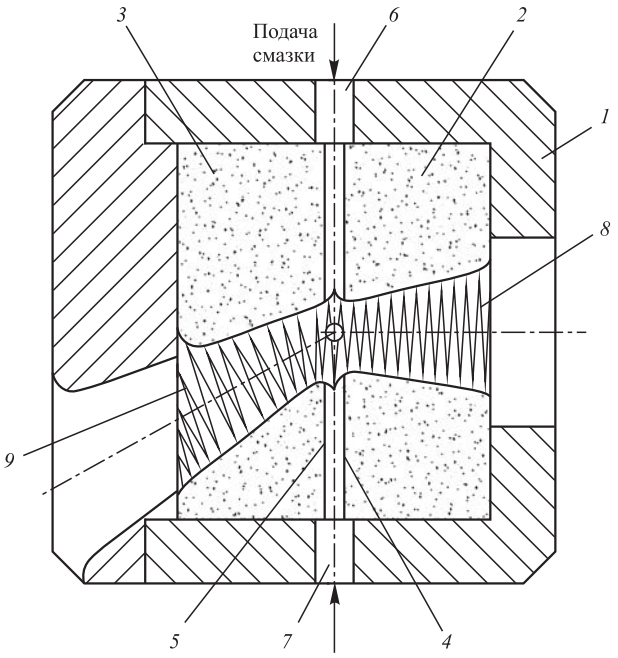



**Рис. 3. Конструкция фильеры для деформационного наноструктурирования**

Применение металлоплакирующей смазки и регулярного микрорельефа по сравнению с аналогом [14] улучшает процесс трения и деформирования [15, 16].

Дополнительно стойкость инструментального оснащения для перечисленных выше методов обработки может быть увеличена, если воздействующие поверхности инструментов перед выполнением регулярного микрорельефа упрочнить многослойным износо- и теплозащитным покрытием (патент РФ № 2560477). При этом толщина покрытия должна быть меньше глубины канавок регулярного микрорельефа [17].

Для получения ответственных деталей служит метод деформационного наноструктурирования выглаживанием (рис. 4), который целесообразно осуществлять на многоцелевых станках с числовым программным управлением токарной группы. В шпинделе *1* закреплена обрабатываемая

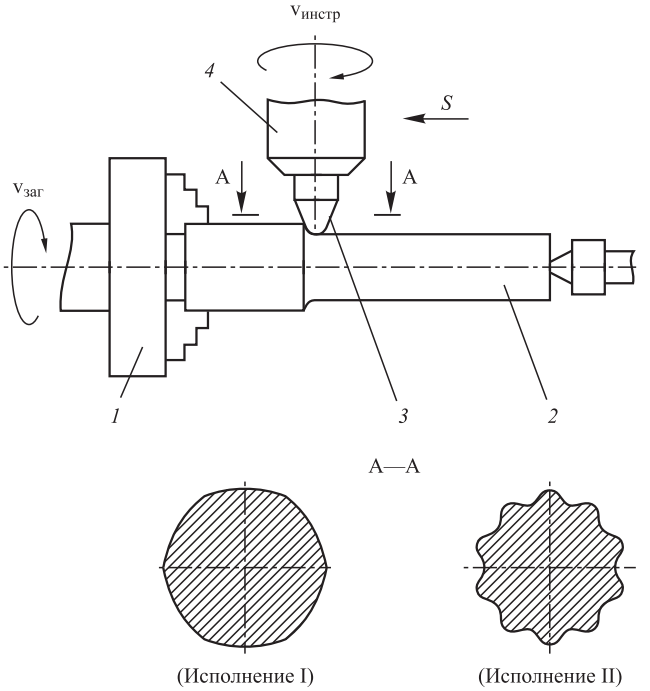



**Рис. 4. Принципиальная схема деформационного наноструктурирования выглаживанием:**
$v_{заг}$ — скорость вращения заготовки; $v_{инстр}$ — скорость вращения выглаживателя; *S* — подача выглаживателя

заготовка *2*, при вращении с которой взаимодействует выглаживатель *3*, закрепленный в инструментальном шпинделе *4*.

Для дополнительного фрикционно-деформационного воздействия поперечное сечение рабочей части выглаживателя (сечение А—А) имеет форму затылованного многогранника (исполнение I) или зубчатый профиль (исполнение II). При подаче в зону обработки металлоплакирующей смазки происходит формирование мелкозернистой структуры поверхностного слоя детали.

Таким образом, выполненные разработки расширяют арсенал средств технологического оснащения современных высокопроизводительных автоматизированных производств.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Энциклопедия** поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИРНИТУ, 2015. 396 с.
2. **Щедрин А.В., Кострюков А.А., Чихачева Н.Ю.** Искусственный технологический интеллект как идеологическая основа всеобщей системы методов обработки материалов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 6. С. 20—26.
3. **Щедрин А.В., Бекаев А.А., Ульянов В.В. и др.** Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15—20.
4. **Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Щедрин А.В. и др.** Трибология на основе самоорганизации. Германия: LAMBERT, 2015. 245 с.
5. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Чихачева Н.Ю. и др.** Технологическая трибология на основе самоорганизации. Германия: LAMBERT, 2016. 85 с.
6. **Повышение** эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента / А.В. Щедрин и др. // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 58—60.
7. **Железнов Г.С., Сангеев С.А.** Чистовой ротационный резец // Машиностроитель. 1978. № 8. С. 7.
8. **Пашкевич М.Ф., Рязанцев А.Н., Иванов О.М.** Чистовая торцовая фреза // Машиностроитель. 1977. № 3. С. 17.
9. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Косарев И.В. и др.** Формирование очагов деформации при охватывающем поверхностном пластическом деформировании // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2014. № 10. С. 3—7.
10. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Кострюков А.А.** Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 4. С. 162—168.
11. **Сергеев В.С., Зинин М.А., Гаврилов С.А. и др.** Влияние угла наклона воздействующих поверхностей деформирующего элемента на характеристики методов комбинированного прошивания (протягивания) отверстий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 3. С. 20—24.
12. **Щедрин А.В., Козлов А.Ю.** Совершенствование технологии применения металлоплакирующих смазочных материалов в методах охватывающего поверхностного пластического деформирования инструментом с регулярной микрогеометрией // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 3. С. 8—12.
13. **Щедрин А.В. и др.** Технологические возможности перспективных методов комбинированной деформирующе-режущей обработки // СТИН. 2003. № 3. С. 29—31.
14. **Чукин М.В., Корчунов А.Г., Полякова М.А. и др.** Применение метода деформационного наноструктурирования в технологических процессах производства проволоки // Технология машиностроения. 2013. № 4. С. 5—9.
15. **Щедрин А.В., Гаврилов С.А., Ерохин В.В. и др.** Повышение качества и производительности методов комбинированной обработки инструментом с регулярной микрогеометрией поверхности на основе применения металлоплакирующих смазок // Упрочняющие технологии и покрытия. 2011. № 8. С. 21—25.
16. **Гаврилов С.А.** Совершенствование процесса поверхностного пластического деформирования на основе применения металлоплакирующих смазочных материалов // Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 4. С. 33—39.
17. **Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л., Щедрин А.В. и др.** Новое научное открытие в трибологии на основе самоорганизации // Научные труды Академии проблем качества. Спецвыпуск. 2016. С. 348—356.

УДК 621.315

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

# Статические и динамические характеристики секционного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте

*Определены статические и динамические характеристики секционного пьезоактюатора для нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте. Получены передаточные функции секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте при параллельном и кодовом управлении. Показано влияние геометрических и физических параметров секционного пьезоактюатора и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики.*

***Ключевые слова:*** *секционный пьезоактюатор, продольный пьезоэффект, деформация, нано- и микроперемещения, параллельное и кодовое управление, статические и динамические характеристики, передаточная функция.*

*The static and dynamic characteristics of the sectional piezoactuator for the nano- and microdisplacements with the longitudinal piezoelectric effect are determined. The transfer functions of the sectional piezoactuator with the longitudinal piezoelectric effect with the parallel and code control are obtained. The effect of the geometrical and physical parameters of the sectional piezoactuator and the external load on its static and dynamic characteristics are shown.*

***Keywords:*** *sectional piezoactuator, longitudinal piezoelectric effect, deformation, nano- and microdisplacement, parallel and code control, static and dynamic characteristics, transfer function.*

Пьезоактюатор нано- и микроперемещений используется для компенсации температурных, гравитационных деформаций, точного перемещения в нанотехнологии, нанобиологии, микроэлектронике, астрономии и адаптивной оптике [1—4]. Пьезоактюатор — пьезомеханическое устройство для преобразования электрической энергии в механическую, для приведения в действие механизмов, систем и управления ими на основе пьезоэлектрического эффекта [5, 6].

Пьезоактюатор наноперемещений имеет диапазон от нескольких нанометров до десятков микрометров, чувствительность до 1 нм/В, нагрузочную способность до 1000 Н [1, 3, 6]. Увеличение диапазона перемещения до десятков микрометров достигается за счет использования многослойного пьезоактюатора, выполненного в виде составного, пакетного, блочного пьезоактюатора [6—8].

В мехатронных системах для нано- и микроперемещений секционный пьезоактюатор с кодовым управлением используется для электромеханического цифроаналогового преобразования. При кодовом управлении пьезослои в пьезоактюаторе соединены параллельно в каждой секции. Число пьезослоев в секции равно выражению 2 в степени 0, 1, 2, 3, 4, ..., т.е. 1, 2, 4, 8, 16, ...., и на каждую секцию через коммутатор подается управляющее напряжение. Суммарная деформация секционного пьезоактюатора с кодовым управлением складывается из деформаций отдельных секций пьезоактюатора при подаче на них напряжения и деформации секционного пьезоактюатора при действии на него внешней силы. При параллельном управлении все слои секционного пьезоактюатора включены параллельно, а при кодовом управлении коммутатор обеспечивает подключение напряжения на соответствующие секции секционного пьезоактюатора [8—10].

Для мехатронных систем определим статические и динамические характеристики

секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением (рис. 1). В мехатронных системах применяется электромеханическое цифроаналоговое преобразование [10] с использованием секционного пьезоактюатора при поперечном пьезоэффекте, который обеспечивает наноперемещения, пропорциональные управляющему коду. Секционный пьезоактюатор с кодовым управлением секциями используется для прецизионного совмещения и юстировки. Секционный пьезоактюатор делится на $N$ секций с числом $n_k$ пьезопластин в $k$-й секции. Секции пьезоактюатора механически соединены последовательно, а электрически изолированы.

Уравнение обратного пьезоэффекта [4, 5] при продольном пьезоэффекте пьезоактюатора имеет вид:

$$S_3 = d_{33}E_3 + s_{33}^E T_3, \qquad (1)$$

где $S_3$ — относительная деформация пьезоактюатора по оси 3;

$d_{33}$ — продольный пьезомодуль;

$E_3 = U/\delta$ — напряженность электрического поля в пьезоактюаторе по оси 3;

$U$ — напряжение на электродах пьезоактюатора;

$\delta$ — толщина пьезослоя или пьезопластины;

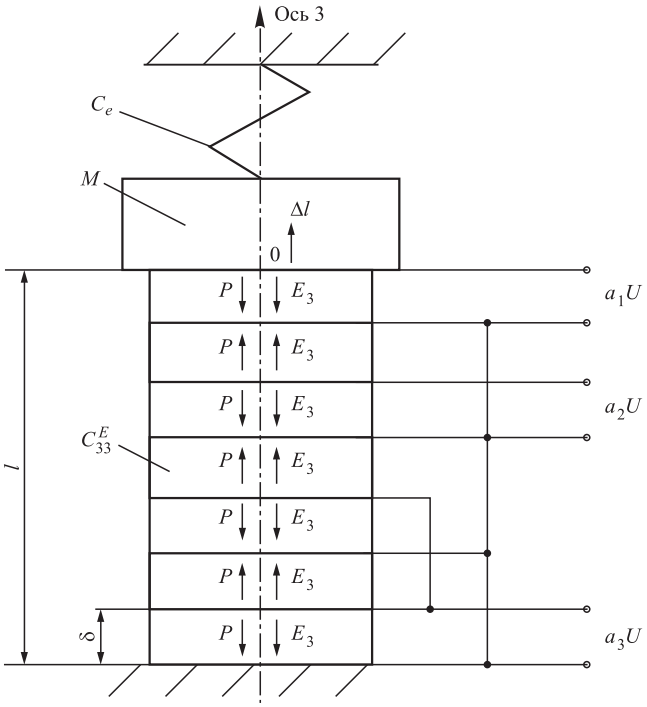



**Рис. 1. Кинематическая схема секционного пьезоактюатора нано- и микроперемещений при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением и упругоинерционной нагрузке**

$s_{33}^E$ — упругая податливость по оси 3 при $E = \text{const}$;

$T_3 = -F/S_0$ — механическое напряжение в пьезоактюаторе по оси 3;

$S_0$ — площадь сечения пьезоактюатора;

$F$ — внешняя сила.

В секционном пьезоактюаторе, состоящем из $n$ пьезослоев, объединенных в $N$ секций, при продольном пьезоэффекте (см. рис. 1) имеем число пьезослоев или пьезопластин в $k$-й секции:

$$n_k = 2^{k-1}, \qquad (2)$$

длину $k$-й секции

$$l_k = 2^{k-1}\delta, \qquad (3)$$

где $k = 1, 2, ..., N$.

Из уравнения (3) получаем общую длину секционного пьезоактюатора (см. рис. 1):

$$l = \sum_{k=1}^{N} l_k = (2^N - 1)\delta = n\delta. \qquad (4)$$

Следовательно, из уравнений (1) и (4) имеем максимальное перемещение (деформацию) многослойного секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и подключении $N$ секций в виде:

$$\Delta l_{\max_N} = d_{33}(2^N - 1)U = d_{33}nU. \qquad (5)$$

В статике при передаче двоичного кода на вход коммутатора напряжения и подключении напряжения на секции пьезоактюатора с выходов коммутатора получаем соответствующее перемещение секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте:

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k \Delta l_k; \qquad (6)$$

$$U_k = a_k U,$$

где $a_k \in \{0; 1\}$ — разрядные цифры двоичного кода; $U_k$ — напряжение на $k$-й секции пьезоактюатора.

Из выражений (3) и (6) при управлении по напряжению определим

$$\Delta l = \sum_{k=1}^{N} a_k d_{33} 2^{k-1} U = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U. \qquad (7)$$

Рассмотрим механические и регулировочные характеристики секционного пьезоактюатора с кодовым управлением при продольном пьезоэффекте. Из уравнения (2) и (7) имеем выражение статической механической характеристики (см. рис. 1) секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением в виде:

$$\Delta l = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U - s_{33}^E Fl/S_0 =$$
$$= d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U - F/C_{33}^E; \quad (8)$$
$$C_{33}^E = S_0/(s_{33}^E l).$$

Следовательно, получаем уравнение статической механической характеристики в обобщенном виде

$$\Delta l = \Delta l_{3\max}(1 - F/F_{3\max}), \quad (9)$$

$\Delta l_{3\max}$ — максимальное перемещение по оси 3; $F_{3\max}$ — максимальная или блокирующая сила по оси 3;

$$\Delta l_{3\max} = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U;$$
$$F_{3\max} = \frac{d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)US_0}{s_{33}^E l}$$

или $\Delta l_{3\max} = d_{33}n_s U$; $F_{3\max} = \dfrac{d_{33}n_s US_0}{s_{33}^E l}$; $n_s = \sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}$,

где $n_s$ — число пьезослоев секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте, подключенных к источнику напряжения.

Статическая механическая характеристика изображена на рис. 2 для секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением для $d_{33} = 4\cdot10^{-10}$ м/В, $U = 300$ В, $s_{33}^E = 4\cdot10^{-11}$ м$^2$/Н, $\delta = 0{,}6\cdot10^{-3}$ м, $D = 15\cdot10^{-3}$ м, $n = 15$, $N = 4$; $a_1 = 0$, $a_2 = 1$, $a_3 = 0$, $a_4 = 1$, соответственно имеем $\Delta l_{3\max} = 1{,}2$ мкм и $F_{3\max} = 590$ Н.

При упругой нагрузке получаем

$$\Delta l = d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U - \Delta l C_e/C_{33}^E, \quad (10)$$

где $C_e$ — жесткость упругой нагрузки.

Определяем регулировочную характеристику секционного пьезоактюатора (см. рис. 1) при продольном пьезоэффекте в виде

$$\Delta l = \frac{d_{33}\left(\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}\right)U}{1 + C_e/C_{33}^E}. \quad (11)$$

Регулировочная характеристика секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругой нагрузке имеет вид:

$$\Delta l = k_c U, \quad (12)$$

где $k_c$ — коэффициент передачи секционного пьезоактюатора.

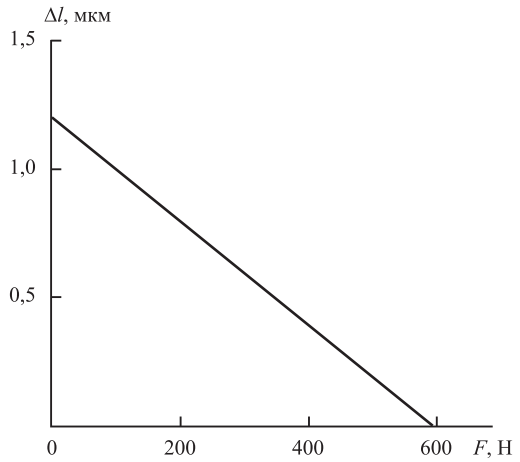



**Рис. 2. Статическая механическая характеристика секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с кодовым управлением**

Следовательно, коэффициент передачи секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и кодовом управлении получаем в виде:

$$k_c = \frac{d_{33}\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + C_e/C_{33}^E}. \quad (13)$$

Соответственно, коэффициент передачи секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и параллельном управлении имеет вид:

$$k_c = \frac{d_{33}n}{1 + C_e/C_{33}^E}. \quad (14)$$

Передаточная функция многослойного пьезоактюатора [9] при параллельном управлении и упругоинерционной нагрузке при $m \ll M$, где $m$ — масса многослойного пьезоактюатора, $M$ — масса нагрузки, при одном жестко закрепленном торце многослойного пьезоактюатора и продольном пьезоэффекте записывается в виде:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}n}{(1 + C_e/C_{33}^E)(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33}p + 1)};$$
$$l = n\delta;\ T_{33} = \sqrt{\frac{M}{C_e + C_{33}^E}};\ \xi_{33} = \frac{\alpha l^2 C_{33}^E}{3c^E\sqrt{M(C_e + C_{33}^E)}}, \quad (15)$$

где $T_{33}$, $\xi_{33}$ — постоянная времени и коэффициент затухания колебательного звена при продольном пьезоэффекте многослойного пьезоактюатора соответственно; $p$ — параметр преобразования Лапласа; $\alpha$ — коэффициент затухания волны, учитывающий затухание колебаний при распространении волны в пьезоактюаторе; $c^E$ — скорость звука при $E = \text{const}$.

Следовательно, из выражений (13) и (15) при кодовом управлении и продольном пьезоэффекте

получаем передаточную функцию секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и упругоинерционной нагрузке для $m \ll M$ в виде:

$$W(p) = \frac{\Xi(p)}{U(p)} = \frac{d_{33}\sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{(1 + C_e / C_{33}^E)(T_{33}^2 p^2 + 2T_{33}\xi_{33} p + 1)}. \quad (16)$$

С учетом выражений (13), (16) переходная характеристика секционного пьезоактюатора при упругоинерционной нагрузке и электрическом сопротивлении $R \to 0$ записывается в виде:

$$\xi(t) = k_c U_0 h(t) = \xi_0 h(t), \quad (17)$$

где $h(t)$ — нормированная переходная характеристика секционного пьезоактюатора; $\xi_0$ — установившаяся величина перемещения.

Установившаяся величина перемещения секционного пьезоактюатора определяется в виде:

$$\xi_0 = \frac{d_{33} U_0 \sum_{k=1}^{N} a_k 2^{k-1}}{1 + C_e / C_{33}^E}. \quad (18)$$

Следовательно, нормированная переходная характеристика [10] секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте и кодовом управлении имеет вид:

$$h(t) = 1 - \frac{e^{-\frac{\xi_{33} t}{T_{33}}}}{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}} \sin\left(\beta_{33} t + \varphi_{33}\right), \quad (19)$$

где $t$ — время;

$$\beta_{33} = \frac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{T_{33}}, \ \varphi_{33} = \operatorname{arctg}\left(\frac{\sqrt{1 - \xi_{33}^2}}{\xi_{33}}\right).$$

Механические и регулировочные характеристики секционного пьезоактюатора при кодовом управлении служат для расчета статических и динамических режимов работы секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте с учетом внешней нагрузки и физических и геометрических параметров.

## Заключение

Для секционного пьезоактюатора при продольном пьезоэффекте рассчитано влияние геометрических и физических параметров секционного пьезоактюатора и внешней нагрузки на его статические и динамические характеристики.

Получены передаточные функции секционного актюатора с упругоинерционной нагрузкой при параллельном и кодовом управлении. Показано влияние жесткости нагрузки на механические, регулировочные характеристики и передаточные функции секционного пьезоактюатора при параллельном и кодовом управлении.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Ленк А.** Электромеханические системы. Системы с сосредоточенными параметрами. М.: Мир, 1978. 286 с.
2. **Вардан В., Виной К., Джозе К.** ВЧ МЭМС и их применение. М.: Техносфера, 2004. 528 с.
3. **Миронов В.Л.** Основы сканирующей зондовой микроскопии. М.: Техносфера, 2004. 144 с.
4. **Физическая акустика**. Т. 1. Часть А. Методы и приборы ультразвуковых исследований / под ред. У. Мэзона. М.: Мир, 1966. 592 с.
5. **Schultz J., Ueda J., Asada H.** Cellular actuators. Oxford: Butterworth-Heinemann Publisher, 2017. 382 p.
6. **Казаков В.К., Климашин В.М., Никифоров В.Г. и др.** Многослойные пьезоэлектрические актюаторы и особенности их применения // Компоненты и технологии. 2007. № 6. С. 62—65.
7. **Афонин С.М.** Структурно-параметрическая модель многослойного электромагнитоупругого актюатора пьезоактюатора нано- и микроперемещений // Наноинженерия. 2014. № 10. С. 27—34.
8. **Afonin S.M.** A structural-parametric model of electroelastic actuator for nano- and microdisplacement of mechatronic system // Chapter 8 in the book. Editors: Bartul Z., Trenor J. Advances in Nanotechnology. Vol. 19. New York: Nova Science Publisher. 2017. P. 259—284.
9. **Афонин С.М.** Статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. № 5. С. 40—45.
10. **Бесекерский В.А., Попов Е.П.** Теория систем автоматического управления. М.: Профессия, 2013. 752 с.



ООО "Издательство **"Инновационное машиностроение"**, 107076, Москва, Колодезный пер., 2а, стр. 2.
Учредитель ООО "Издательство "Инновационное машиностроение".
**E-mail: utp@mashin.ru**
**Web-site: www.mashin.ru**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-47-19, 269-54-96.
Технический редактор *Конова Е.В.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 07.03.2019 г. Подписано в печать 29.04.19 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**