ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 2 (170)
февраль

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

Барзов А.А., Галиновский А.Л., Проваторов А.С. Информационно-физический механизм ультрагидроструйной диагностики качества функциональных покрытий 51

Табаков В.П. Исследование влияния кристаллического строения износостойких покрытий на формирование параметров структуры и механических свойств 57

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Адакин В.А., Федотов Г.Д. Износостойкость накатных роликов с однослойными износостойкими покрытиями при холодном пластическом деформировании 61

Паламарь И.Н., Первов М.Л. Формализация вербальных оценок качества дробеструйной обработки на основе анализа изображений поверхности металла 65

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Ким В.А., Аунг Нгве Тайн. Количественная оценка диссипативных свойств поверхностной структуры стали 25ХМ, упрочненной импульсным лазерным воздействием 70

Малышев В.Н., Мироненко Д.В. Повышение износостойкости модифицированных шаровых кранов 75

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Балакай В.И., Шпанова К.А., Ковалева А.О., Гривенко А.В. Получение электролитического сплава олово–никель–бор 80

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Александров В.А., Чудина О.В., Кудряшов Б.А. Поверхностное упрочнение чугунов термодиффузионным легированием с последующим азотированием 85

Фёдоров М.В., Зайдес С.А. Оценка эффективности технологий упрочнения бандажей колесных пар локомотивов по результатам эксплуатационных испытаний 89

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
№ 2 (170)
February

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

Barzov A.A., Galinovsky A.L., Provatorov A.S. Information-physical mechanism of diagnostic of functional coatings erosive wear by water jet 51

Tabakov V.P. Study of influence of crystalline structure of wear-resistant coatings on formation of parameters of structure and mechanical properties 57

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Adakin V.A., Fedotov G.D. Wear resistance of rolling rollers with single-layer wear-resistant coatings at cold plastic deformation 61

Palamar' I.N., Pervov M.L. Formalization of verbal estimations of shot blasting quality based on metal surface images analysis 65

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Kim V.A., Aung Ngwe Thein. Quantitative assessment of dissipative properties of superficial structure of steel 25KhM strengthened by pulse laser action 70

Malyshev V.N., **Mironenko D.V.** Wear resistance increase of modified ball valves 75

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Balakay V.I., Shpanova K.A., Kovaleva A.O., Grivenko A.V. Obtaining of electrolytic tin–nickel–bor alloy 80

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Aleksandrov V.A., Chudina O.V., Kudryashov B.A. Surface hardening of cast iron by thermal diffusion alloying with subsequent nitriding 85

Fedorov M.V., **Zaydes S.A.** Evaluating of effectiveness of hardening technologies for locomotives wheel set tyres by results of operational tests 89

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 621.924.93

А.А. Барзов *(Центр гидрофизических исследований МГУ имени М.В. Ломоносова),*
А.Л. Галиновский *(МГТУ им. Н.Э. Баумана),*
А.С. Проваторов *(НОЦ "Функциональные Микро/Наносистемы", г. Москва)*
E-mail: provatorov_a@bmstu.ru

Информационно-физический механизм ультрагидроструйной диагностики качества функциональных покрытий*

Рассмотрен механизм гидроструйной эрозии функциональных покрытий с позиций его информационно-диагностической значимости. Предложена вероятностная модель процесса гидроэрозии, отличительная черта которой состоит в возможности анализа поверхностного и объемного ультраструйного накопления поврежденностей. Прямыми экспериментами доказана взаимосвязанность между этими механизмами формирования повреждений, что обосновывает научно-прикладную результативность аппарата ультрагидроструйной диагностики эксплуатационного качества различных функциональных покрытий.

Ключевые слова: *функциональное покрытие, ультраструйное гидровоздействие, эрозионное разрушение, вероятностная модель.*

The process of the functional coatings erosive wear by water jet with the purpose of coatings quality characteristics diagnosing is discussed. The probabilistic model of this process is considered. The main model feature is the surface and volume damages analysis after water jet influence. The experiments show the directly dependence between these coatings damages types. This fact highlights the water jet diagnostic efficiency.

Keywords: *functional coating, water jet influence, erosive wear, probabilistic model.*

Успешное развитие инженерии поверхностей изделий ответственного назначения главным образом в сфере технологического обеспечения качества различных функциональных покрытий требует создания физически адекватного аппарата их контроля и экспресс-диагностики. Экспертно-аналитический анализ показал [1—4], что наибольшим потенциалом результативности обладает ультраструйная гидродиагностика (УСД). Технологически УСД основана на оценке степени влияния параметров качества поверхностного слоя объекта исследования на информационно-физические характеристики процесса его локального гидроэрозионного разрушения под действием высокоскоростной ультраструи жидкости (воды) при плотности потока ее мощности более 0,1 МВт/мм^2.

Данное положение объясняется тем, что при ультраструйном воздействии в поверхностном слое создается напряженно-деформированное состояние (НДС) материала, модельно-подобное большинству практически важных случаев при его эксплуатации: трении, вариативных силовых нагрузках и т.д. Поэтому УСД имеет определенные информационные преимущества по сравнению с диагностикой качества поверхностного слоя путем использования воздушно-абразивной или гидроабразивной струи как основного инструмента физико-технологической реализации эксплуатационно-моделирующего НДС. Схематично вышеизложенное отражено на рис. 1, на котором дана иллюстрация одной из ключевых научно-прикладных проблем различных вариан-

*Исследования проведены в рамках гранта Президента Российской Федерации для государственной поддержки ведущих научных школ (НШ-3778.2018.8).

Рис. 1. Информационно-физические возможности технологий ультраструйного оперативного диагностирования и экспресс-контроля качества функционально-защитных покрытий

тов практического применения ультраструйной диагностики.

Эта проблема состоит в анализе соотносительности двух основных составляющих процесса ультраструйной гидроэрозии поверхностного слоя диагностируемого изделия:

— вариативно-расклинивающем действии высокого гидродавления (P > 100 МПа) ультраструи (УС) на кинетику зарождения, развития и слияния поверхностных трещиноподобных микро- и макродефектов между собой и нижележащими аналогичными несплошностями в подповерхностном слое;

— формирование по классическому усталостному механизму критических значений трещинообусловленной поврежденности материала поверхностных слоев объекта диагностики в условиях интенсивных вариаций его НДС, характерных для гидродинамического воздействия высокоскоростной УС.

Заметим, что разграничение значимости поверхностно-расклинивающего и объемно-усталостного механизмов ультрагидроэрозионного материала, схематично изображенных на рис. 2, для большинства операционных ультраструйных технологий (УСТ) имеет главным образом научно-методическое значение, в частности при УС-резании листовых материалов.

Однако в случае УСД функциональных покрытий роль каждого из этих механизмов напрямую связана с информативной результативностью всей процедуры экспресс-анализа их эксплуатационного качества. Это объясняется тем, что первый "расклинивающий механизм" диагностического фактора ультраструйного воздействия связан с "микро- и субмикрокачеством" самого функционального покрытия. Это слагаемое качества покрытия проявляется в виде способности противостоять эксплуатационным нагрузкам, приводящим к нарушению его сплошности и росту поврежденности, в основном при фрикционно-силовом контакте конструкционных элементов в узлах трения, рабочих поверхностей режущих инструментов и т.д.

Второй, не менее значимый механизм накопления усталостной поврежденности в подповерхностном слое материала подложки физически ответствен за ультрагидроэрозионную локальную микрофрагментацию поверхностного слоя объекта диагностического воздействия УС и, что весьма важно, поврежденности границы его раздела с функциональным покрытием. Именно кинетика этого процесса часто определяет технологическое качество функционального покрытия, состоящее в обеспечении высоких значений адгезионного взаимодействия между ним и нижележащими защищаемыми слоями основного конструкционного материала изделия. Поэтому детальный анализ параметров отслаивания покрытия при УСД является информационно-значимым признаком его эксплуатационно-технологического качества. Это обстоятельство позволяет быстро отрабатывать рациональные режимы формирования различных функциональных покрытий без проведения

трудоемких и дорогостоящих полномасштабных экспериментальных исследований, а также осуществлять текущий, например, выборочный или 100%-ный контроль стабильности технологии их получения. Причем при 100%-ном контроле УС-воздействие осуществляется на контактно-нерабочую зону покрытия, например, на некотором расстоянии их режущих граней формообразующего инструмента.

В случае необходимости возможно оперативное получение информации об абразивной стойкости функциональных покрытий введением в УС высокотвердых частиц, например, в виде мелкодисперсного карбида кремния, оксида алюминия (корунда) и т.д.

Таким образом, УСД путем применения УС жидкости (воды) или высокоскоростной струи соответствующей абразивно-жидкостной суспензии является результативным инструментом экспресс-анализа качеств самых различных функциональных покрытий и методов физико-технологического упрочнения поверхностного слоя деталей изделия.

Для формализации роли поверхностно-расклинивающего и объемно-усталостного механизмов эрозионного разрушения поверхностного

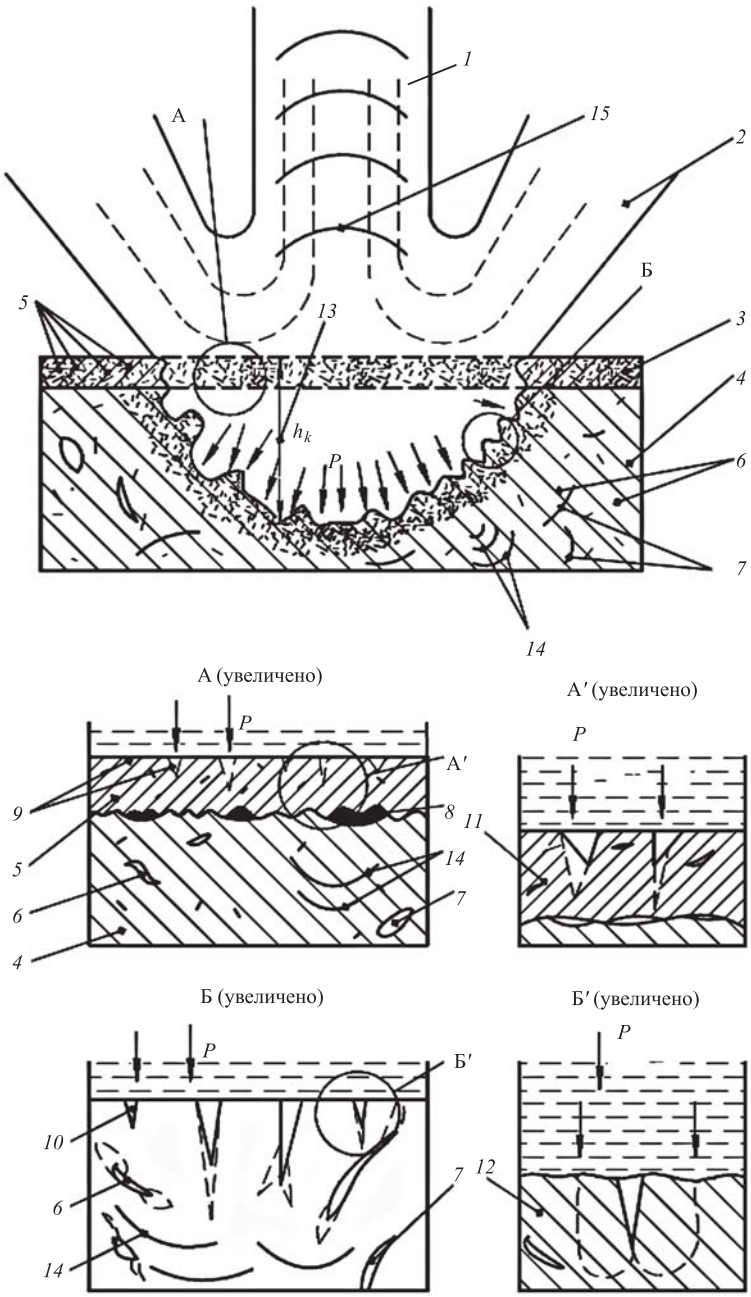


Рис. 2. Гидродинамическая картина возникновения, развития и слияния несплошностей в поверхностном слое объекта анализа — механизм его гидроэрозионного разрушения:
1 — набегающая на поверхность объекта анализа диагностическая ультрагидроструя (УГС) со скоростью v_c, создающая в процессе торможения в зоне УС-воздействия гидродинамическое давление P = var; *2* — гидроструи, отраженные и имеющие скорость $v_{отр}$ от поверхности объекта анализа и образовавшейся под действием УГС-гидрокаверны; *3* — функциональное покрытие, нанесенное на поверхность объекта анализа; *4* — основной материал; *5* — микронесплошности (микро- и субмикротрещины) в структуре функционального покрытия *3*; *6* — микронесплошности (микро- и субмикротрещины) в основном материале объекта анализа; *7* — технологические потенциально опасные дефекты в поверхностном слое объекта анализа; *8* — трещиноподобные исходные, зарождающиеся и развивающиеся дефекты на границе раздела между поверхностью объекта анализа и ее функциональным покрытием; *9* — имеющиеся, зарождающиеся и развивающиеся микротрещины (дефекты, несплошности) на поверхности функционального покрытия вследствие вариативного действия гидродавления P; *10* — имеющиеся, зарождающиеся и развивающиеся микротрещины (дефекты, несплошности) на свободной поверхности гидродинамического контакта между объектом анализа и заторможенной УГС; *11* — контуры диспергируемой УГС частицы с поверхности функционального покрытия *3*; *12* — контуры диспергируемой УГС твердофазной частицы с поверхностного слоя объекта анализа; *13* — микрорельеф R_K и топография (глубина h_k) поверхностной гидрокаверны, сформированной в процессе диагностирования УГС; *14* — волны упругой деформации — волны акустической эмиссии (АЭ), генерируемые в материале объекта анализа гидродинамическим взаимодействием УГС с его твердотельной поверхностью; *15* — волны АЭ, распространяющиеся по телу УГС из зоны ее ударно-динамического взаимодействия с поверхностью объекта анализа

слоя материала с покрытием используем вероятностный подход, что обусловлено специфическим многообразием процессов взаимодействия характеристических физико-технологических факторов операции УСД. Причем в детерминированной постановке решение этой задачи с учетом масштабного фактора прочности твердых тел может быть найдено с использованием известного аппарата моделирования поверхностного разрушения, предложенного, например, в работах [5, 6].

Учитывая параллельное протекание процессов формирования поверхностной и подповерхностной трещиноподобной поврежденности анализируемой области материала, вероятностный характер распределения микродефектов, отражающих масштабный фактор микроразрушения на основе зависимостей, полученных в работах [7, 8], можно записать суммарно-исходное вероятностное соотношение в виде:

$$P_c(t) = P_S + P_V - P_S P_V, \qquad (1)$$

где P_c — суммарная вероятность разрушения и отделения в текущий момент времени анализа t рассматриваемого фрагмента (микрочастицы) материала поверхности вследствие гидродинамического воздействия УС; P_S, P_V — вероятности протекания процессов соответственно поверхностного (S) и объемного (V) локального фрагментирования (микроразрушения, диспергирования) материала в зоне воздействия УС.

Физически P_c означает отношение разрушившихся в момент времени t дисперсных частиц к их максимально возможному количеству.

Используя после соответствующей функционально-физической адаптации результаты теоретического анализа, выполненного в работах [9], можно P_S и P_V определить как:

$$P_S(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t c_S k_S(\tau) d\tau\right]; \qquad (2)$$

$$P_V(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t c_V k_V(\tau) d\tau\right], \qquad (3)$$

где $c_S(\tau)$, $c_V(\tau)$ — соответственно концентрации микродефектов, например докритических трещин на поверхности нанесенного покрытия (S) и в подповерхностном слое (V), как показано на рис. 2; k_S, k_V — соответственно вариативные параметры, функционально определяющие влияния НДС на кинетику формирования c_S и c_V.

Фактически уравнение (1) определяет суммарную вероятность процессов поверхностного и подповерхностного гидроэрозионного фрагментирования поверхностного слоя объекта анализа, а уравнения (2) и (3) описывают кинетику их изменения во время реализации УСД, причем и в латентном виде эти соотношения являются функциями координат, входящих в структуру c_S и c_V.

Считая в первом приближении, что c_S и c_V характеризуются некоторыми осредненными квазипостоянными значениями, а интенсивность протекания во времени процесса локального эрозионного фрагментирования материала много меньше частоты вариативно-волнового изменения его НДС под гидродинамическим действием УС, соотношение (1) с учетом (2) и (3) при малых c_S и c_V примет вид:

$$P_c \sim k_S c_S + k_V c_V. \qquad (4)$$

Таким образом, соотношение (4) является функциональной интерпретацией независимости изменения трещиноподобной дефектности поверхности функционального покрытия и подповерхностного слоя материала подложки под гидродинамическим воздействием УС в процессе реализации операции УСД. Физически (4) отражает принцип линейного суммирования поврежденностей, известной в механике разрушения как принцип Бейли. Причем из-за малости критических значений $c_S(l)$ и $c_V(l)$, где l — близкая к критическому значению длина трещиноподобного дефекта, справедлив закон редких событий — закон Пуассона, функционально подобный экспоненциальному слагаемому в (2) или (3) — фактически описывающих закон внезапных отказов, которому подчиняется кинетика процессов вариативно-нестационарного эрозионного фрагментирования поверхностного слоя материала под ударно-волновым гидродинамическим воздействием УС.

Необходимо подчеркнуть, что с научно-прикладной точки зрения линейное соотношение типа (4) допускает прямую экспериментальную проверку путем варьирования значений c_S и c_V при прочих равных условиях УС-взаимодействий. Проиллюстрируем вышеизложенное результатами прямых экспериментов по УСД функциональных покрытий, основная методическая особенность которых состояла в функционально независимом изменении c_S и c_V специальными физико-технологическими приемами.

На первом этапе экспериментов пять образцов из стали Х18Н10Т подвергали усталостному нагружению с различным числом циклов силового воздействия на них. Это привело к различной степени поврежденности материала, появлению и развитию на поверхности и в толще образцов трещиноподобных субмикро- и микродефектов.

Затем на поверхность образцов оказывали скрайбирующее УС-воздействие на штатной гидротехнологической установке фирмы FLOW при рабочем давлении P = 420 МПа. В результате этого на поверхности испытуемых образцов формировались гидрокаверны, глубина которых h_k полностью коррелировала с нормированным на максимальное значение с числом циклов их предшествующего усталостного нагружения:

$$h_k = k_э \bar{N} \sim 0,5\bar{N}, \qquad (5)$$

где $h_k = h_{ki}/h_{max}$ — нормированная на максимальное значение глубина гидрокаверны, сформированной УС на поверхности i-го образца (i = 1, 2, ..., 5; h_{max} ~ 3,50 мм — максимальная величина гидрокаверны на пятом образце, на который оказывалось в данном случае максимальное число циклов нагружения на специально созданной испытательно-технологической установке ($N_{max} = 50 \cdot 10^3$ циклов); $k_э$ — экспериментальный коэффициент пропорциональности между степенью поврежденности (N) и ее способностью сопротивляться УС-разрушению, которое характеризуется величиной h_k. В данном случае $k_э \sim 0,5$.

Полученные результаты экспериментов представлены на рис. 3.

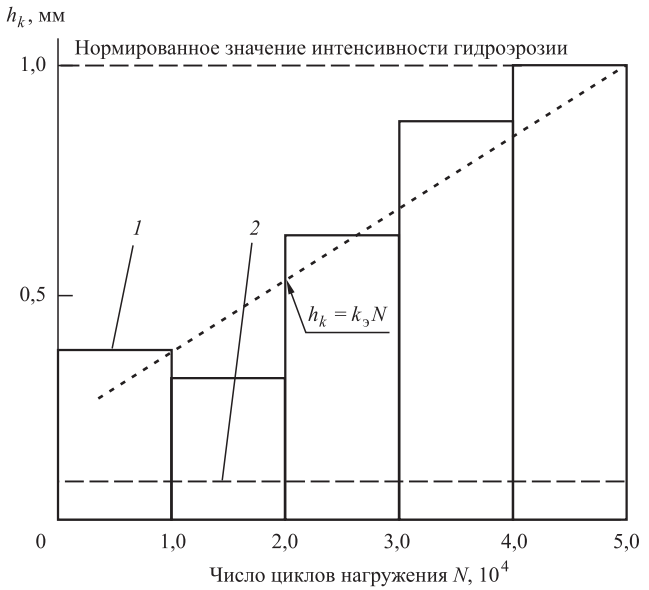


Рис. 3. Экспериментальное определение экранирующего влияния покрытия на поверхностную УС-гидроэрозию: *1* — интенсивность локально-поверхностного гидроэрозионного УС-разрушения образцов, подвергнутых различному уровню воздействия усталостно-силового нагружения; *2* — интенсивность гидроэрозии образцов после нанесения на их поверхность функционального покрытия из TiN

Линейная функциональная зависимость типа (5) имеет вполне самостоятельное информационно-диагностическое значение, которое подробно раскрывалось в работе [10], посвященной физико-технологическим возможностям УСД. Причем некоторое снижение h_k при i = 2, т.е. у второго испытуемого образца наблюдался незначительный рост гидроэрозионной стойкости, по-видимому, объясняется наличием фактора пластического упрочнения испытуемого материала при $N \sim 10^4$ циклов нагружения.

Таким образом, на начальной стадии экспериментов была реализована вариативность параметров c_S и c_V, обусловленная разной степенью усталостной поврежденности диагностируемых образцов. В данном случае это обстоятельство описывается функциональной зависимостью типа (5), отражающей степень гидроэрозионного УС-воздействия на материал с разным уровнем исходной трещиноподобной дефектности.

Затем на поверхность всех образцов на штатной ионно-плазменной установке наносили функционально-защитное покрытие из TiN. Это покрытие, согласно вышеприведенному описанию двух видов механизма гидроэрозионного разрушения, должно было бы экранировать роль поверхностно-"расклинивающего" эффекта гидродавления в зоне торможения УС. Проведенные прямые эксперименты по однократному УС-скрайбированию поверхности всех образцов, имеющих различную степень исходной поврежденности, показали практически идентичную, незначительную степень их гидроэрозионного разрушения, обусловленную в основном локально-пластическим оттеснением материала из зоны УС-воздействия (h_k < 0,1). Данный экспериментальный результат позволяет признать методически справедливой физически-условную градацию механизма УС-гидроэрозии материала на два, в принципе взаимосвязанных процесса, обусловленных отличиями в кинетике формирования c_S и c_V, описываемой вероятностными соотношениями (1)—(3) и их фактически детерминированной линеаризацией типа (4).

Необходимо подчеркнуть, что помимо научного значения полученные результаты, представленные на рис. 3, могут иметь серьезное технологически-прикладное использование. Действительно, целенаправленная реализация эффекта экранирования негативного влияния на механизм усталостного разрушения конструкционного материала его поверхностных дефектов путем периодического нанесения защитно-функционального покрытия может рассматриваться как перспективное сла-

гаемое аппарата реновационных технологий. Это технология, основанная на экранировании негативного влияния на ресурс усталостного разрушения конструкции выходящих на ее поверхность трещино-инициирующих скоплений дислокаций, линий скольжения и т.п., микро- и субмикродефектов, призвана наряду с термогазостатическим и электроимпульсным "залечиванием" структурных микронеоднородностей уменьшать степени эксплуатационной поврежденности объекта анализа. Причем только выдержка испытуемого образца в рабочей камере ионно-плазменной установки, без нанесения покрытия, не обладает практически значимой результативностью экранирования влияния поверхностных и объемных микродефектов на кинетику последующего УС-разрушения испытуемой поверхности.

Заключительная серия экспериментов состояла в искусственном увеличении значения c_S при прочих равных условиях путем скрайбирования алмазным надфилем с различной степенью зернистости поверхности образцов с покрытием TiN. Результаты последующего УС-воздействия, представленные на рис. 4, показали:

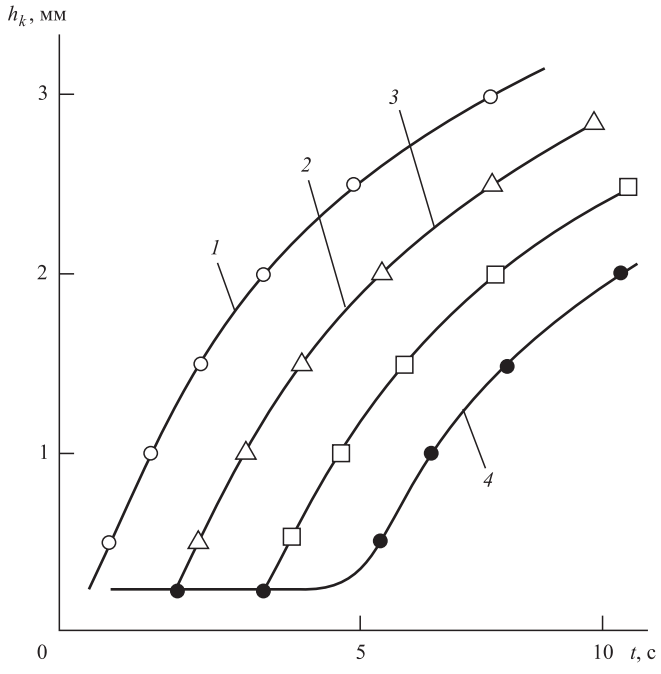


Рис. 4. Экспериментальный анализ влияния вариаций степени поверхностной поврежденности функционального покрытия на интенсивность гидроэрозионного УС-разрушения:
1 — исходный образец без покрытия; *2* — покрытие с частыми глубокими царапинами; *3* — покрытие с редкими неглубокими царапинами; *4* — неповрежденное функциональное покрытие

— тесную корреляцию между величиной c_S и интенсивностью процесса гидроэрозии, что подтверждает справедливость гипотезы о физико-технологическом дуализме механизма УС-разрушения поверхности;

— эквидистантно-запаздывающий характер зависимостей $h_k = f(t)$, обусловленный отсутствием влияния функционального покрытия после его диспергирования в зоне УС-воздействия;

— эрозионно-высокую значимость функционального покрытия на начальном этапе УС-воздействия даже в условиях его предварительной дискретной поврежденности (см. рис. 4, кривые *2* и *3*).

Заметим, что в результате специально реализованного режима нанесения покрытия с малой адгезией к подложке была установлена путем УС принципиальная возможность ультраструйного экспресс-контроля этого важнейшего физико-технологического параметра, определяющего эксплуатационное качество фактически всех видов функционально-защитных покрытий. В данном случае зафиксировано пленочное отслоение функционального покрытия под действием УС практически без мелкодисперсного гидродинамического диспергирования материала поверхностного слоя.

Выводы

1. Ультраструйная диагностика позволяет решать не только практические задачи экспресс-контроля качества функциональных покрытий, но и более детально исследовать специфику механизмов поверхностного гидроэрозионного разрушения в физически экстремальных условиях физико-энергетических УС-воздействий на материал твердотельного объекта исследования.

2. Экспериментальная отработка и методическая конкретизация алгоритмов моделирования процессов УС-диагностирования качества функциональных покрытий позволит получить численные значения параметров, необходимых для достоверных расчетов ресурсно-эксплуатационных характеристик различных изделий и в первую очередь их функционально-контактных рабочих поверхностей.

3. Развитие аппарата физико-математического анализа проблемы УС-взаимодействий, в частности полномасштабная реализация процедуры имитационно-вероятностного моделирования и/или построения конечно-элементных моделей УС-гидроэрозии, дополненных результатами натурных экспериментов, позволит создать действенную систему прогнозирования и верификации потенциальной результативности перспек-

тивных функциональных покрытий и технологий их получения, в том числе с градиентных покрытий нанокомпозиционной структурой.

Таким образом, учитывая научно-прикладное значение и вариативность технологических возможностей ультраструйной гидрофизической диагностики и контроля качества различных функциональных покрытий, их техническую совокупность можно классифицировать как малоинвазивный экспресс-метод получения объективной информации о параметрах состояния поверхностного слоя объекта анализа, дополняющий современный аппарат и инструментарий инженерии поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **К вопросу** разработки научно-методической базы получения и диагностики наноструктурных покрытий / М.И. Абашин, А.Л. Галиновский, В.А. Моисеев и др. // Наноинженерия. 2014. № 5 (35). С. 23—27.
2. **Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И.** Факторная модель ультраструйной гидроэрозии // Известия высших учебных заведений. Машиностроение. 2012. № 10. С. 63—68.
3. **Моисеев В.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И., Хахалин А.В.** Сопоставительный анализ методов оценки качества наноструктурированных покрытий // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2014. № 5. С. 134—141.
4. **Абашин М.И., Барзов А.А., Галиновский А.Л., Шутеев В.А.** Ультраструйная экспресс-диагностика материалов и изделий машиностроения // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2011. № 123. С. 141—147.
5. **Моделирование** ультраструйного воздействия для контроля качества покрытий / М.И. Абашин, А.Л. Галиновский, С.В. Бочкарев и др. // Физическая мезомеханика. 2015. Т. 18. № 1. С. 84—89.
6. **Абашин М.И., Галиновский А.Л., Хафизов М.В.** Конечно-элементное моделирование процесса гидроэрозии тонкопленочных покрытий и экспериментальная проверка его результатов // Электротехника. Энергетика. Машиностроение: сб. науч. тр. I междунар. науч. конф. молодых ученых. 2014. С. 189—192.
7. **Ультраструйная** гидродинамика / М.И. Абашин, А.Л. Галиновский, А.А. Барзов и др. М.: МГУ им. М.В. Ломоносова, 2015. 308 с.
8. **Работнов Ю.Н.** О механизме длительного разрушения // Вопросы прочности материалов и конструкций. М.: Изд-во АН СССР, 1959. С. 5—7.
9. **Барзов А.А., Галиновский А.Л., Пузаков В.С., Трощий О.А.** Вероятностное моделирование в инновационных технологиях. М.: Изд-во "НТ", 2006. 100 с.
10. **Барзов А.А., Галиновский А.Л., Абашин М.И.** Анализ физико-технологических особенностей процесса ультраструйной диагностики // Инженерный журнал: наука и инновации. 2012. № 11 (11). С. 14.

УДК 621.9.025

В.П. Табаков
(Ульяновский государственный технический университет)
E-mail: vpt1947@yandex.ru

Исследование влияния кристаллического строения износостойких покрытий на формирование параметров структуры и механических свойств*

Показано влияние кристаллического строения износостойких покрытий на параметры структуры и механические свойства при введении в их состав дополнительных элементов.

Ключевые слова: *параметры структуры, механические свойства, нитрид титана, нитрид ниобия.*

The influence of the crystalline structure of wear-resistant coatings on structural parameters and mechanical properties is shown when additional elements are added to their composition.

Keywords: *structure parameters, mechanical properties, titanium nitride, niobium nitride.*

Введение

Применение износостойких покрытий существенно повышает период стойкости режущих инструментов [1—3]. Эффективность износостойких покрытий зависит от их механических свойств, которые определяются их составом. Одним из способов направленного изменения механических свойств является введение в состав покрытий дополнительных элементов [4—7]. Поэтому дальнейшие исследования и разработка новых

* Работа выполнена при поддержке РФФИ (грант № 18-48-730011).

составов покрытий путем модификации состава являются актуальными и представляют научный и практический интерес.

Цель работы — исследование влияния дополнительных элементов на параметры структуры и механические свойства покрытий.

Методика экспериментальных исследований

Исследовали многоэлементные покрытия на основе нитридов TiN и NbN, в состав которых вводили Nb, Ti и Al, соответственно, покрытия TiNbN, NbTiN, TiNbAlN и NbTiAlN. Покрытия наносили на твердосплавные пластины TNU 333 производства Sandvik Coromant и пластины из стали 20Х13 на установке "Булат-6". Покрытия TiNbN наносили двумя катодами из титана, расположенными друг напротив друга, и катодом из ниобия, который помещали между ними; покрытия NbTiN — двумя катодами из ниобия и расположенным между ними катодом из титана. Покрытия TiNbAlN и NbTiAlN наносили аналогично двухэлементным покрытиям — в первом случае вместо катода из ниобия использовали катод из сплава титана, ниобия и алюминия, во втором — вместо катода из титана располагали катод из сплава титана и алюминия.

Таблица 1

Химический состав покрытий

Покрытие	Содержание элементов, % ат.		
	Ti	Nb	Al
TiNbN	69,2	30,8	—
NbTiN	44,4	55,6	—
TiNbAlN	82,9	15,5	1,6
NbTiAlN	32,8	67,2	0,02

Таблица 2

Параметры структуры и механические свойства

Покрытие	β_{111}, °	ОКР, нм	σ_o, МПа	H_μ, ГПа	E, ГПа	K_{1C}, МПа·м$^{1/2}$	K_o
TiN	0,40	26,06	−716	24,5	307	9,96	0,10
NbN	1,00*	10,45	−2893/ −6513***	31,6	536	12,18	0
TiNbN	0,48	20,90	−1300	31,2	467	12,34	0,20
NbTiN	0,93**	10,36	−1744	30,6	489	13,74	0,18
TiNbAlN	0,63	15,40	−2534	34,7	422	12,73	0,13
NbTiAlN	0,95**	10,13	−1828	29,5	455	12,64	0,23

* Измерено по пику 002; ** — по пику 004; *** — на образцах твердого сплава TNU333.

Химический состав покрытий определяли методом количественного рентгеноспектрального анализа на установке МАР-4 с учетом ZAF-поправок. Параметры структуры покрытий (период кристаллической решетки a, полуширину рентгеновской дифракционной линии β_{111}, параметр текстурированности J_{111}/J_{200}) и остаточные сжимающие напряжения σ_o исследовали на дифрактометре "ДРОН-3М", размеры блоков областей когерентного рассеяния (ОКР) рассчитывали по методике работы [8]. Микротвердость H_μ, модуль упругости первого рода E и коэффициент интенсивности напряжений K_{1C} покрытий определяли по методикам, изложенным в работе [9]. Прочность адгезии покрытий с инструментальной основой оценивали по коэффициенту отслоения K_o [1].

Результаты исследований и их обсуждение

Химический состав покрытий представлен в табл. 1, а параметры структуры и механические свойства — в табл. 2. Остаточные напряжения в покрытиях NbN и многоэлементных покрытиях на его основе измеряли на образцах из стали 20Х13, так как на твердосплавных образцах измерить остаточные напряжения в многоэлементных покрытиях не представлялось возможным из-за совпадения пиков покрытия и основы.

Исследования фазового состава покрытий показали, что нитрид ниобия имеет гексагональную решетку, а нитрид титана — кубическую решетку.

На дифрактограммах покрытий присутствуют дифракционный пик TiN (111) (рис. 1, *а*), соответствующий кубической кристаллической решетке, и дифракционный пик NbN (110), который соответствует гексагональной структуре (рис. 1, *б*).

По сравнению с нитридом титана нитрид ниобия имеет меньшие (в 2,49 раза) размеры блоков ОКР, более высокие (в 2,5 раза) значения полуширины рентгеновской линии β и сжимающих остаточных напряжений σ_o, которые выше в 9,1 раза. Существенное различие в значениях остаточных напряжений NbN и TiN может быть связано с различием коэффициентов термического расширения покрытий и твердосплавной основы. Согласно данным [10, 11], коэффициент термического расширения нитрида ниобия равен $10{,}1\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$, нитрида титана — $7{,}1\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$, а твердых сплавов — $(4{,}9...5{,}5)\cdot10^{-6}$ К$^{-1}$. Большая разница коэффициентов термического расширения твердого сплава и нитрида ниобия по сравнению с нитри-

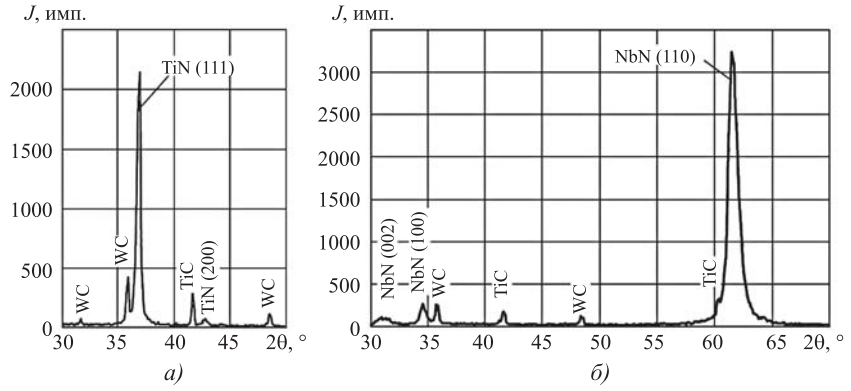


Рис. 1. Фрагменты дифрактограмм покрытий TiN (*а*) и NbN (*б*)

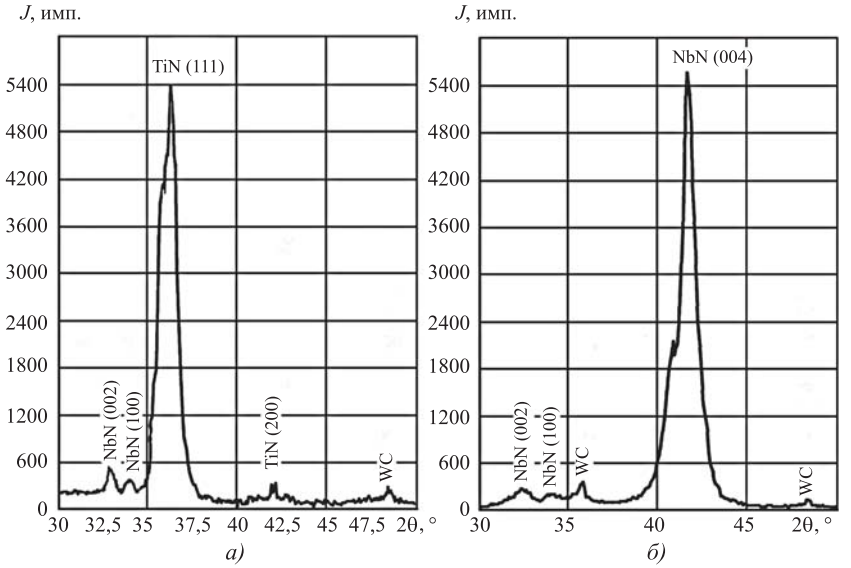


Рис. 2. Фрагменты дифрактограмм покрытий TiNbN (*а*) и NbTiN (*б*)

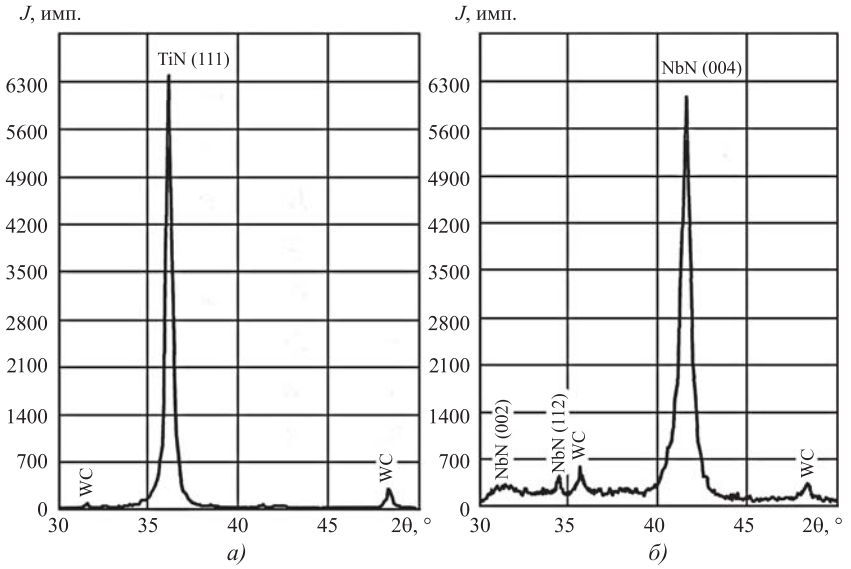


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм покрытий TiNbAlN (*а*) и NbTiAlN (*б*)

дом титана является причиной более высоких сжимающих остаточных напряжений в покрытиях NbN.

Покрытия NbN по сравнению с покрытием TiN имеют более высокую микротвердость, модуль упругости, трещиностойкость и прочность адгезии с твердосплавной основой. Так, микротвердость NbN больше в 1,29 раза, модуль упругости — в 1,74 раза, коэффициент интенсивности напряжений — в 1,22 раза.

Введение дополнительных элементов в состав покрытий TiN и NbN по-разному отражается на их фазовом составе, параметрах структуры и механических свойствах. Введение дополнительных элементов в покрытие TiN не изменяет его кристаллического строения. Покрытия TiNbN и TiNbAlN, как и покрытие TiN, имеют кубическую решетку. В качестве примера на рис. 2, *а* и 3, *а* представлены фрагменты дифрактограмм покрытий TiNbN и TiNbAlN, на которых присутствует дифракционный пик с максимальной интенсивностью, который можно идентифицировать как нитрид титана TiN с преимущественной текстурой (111), соответствующий кубической решетке. Для многоэлементных покрытий на основе нитрида TiN характерны более высокие значения периода кристаллической решетки *a*, полуширины рентгеновской линии β_{111}, остаточных сжимающих напряжений σ_o и меньшие размеры блоков ОКР. При этом при переходе от одноэлементного покрытия TiN к двухэлементному TiNbN и трехэлементному TiNbAlN наблюдаются рост сжимающих остаточных напряжений соответственно в 1,8 и 3,5 раза и снижение размеров блоков ОКР соответственно в 1,24 и 1,69 раза.

Добавление дополнительных элементов в нитрид NbN вызывает изменение его кристаллического строения. Многоэлементные покрытия NbTiN и NbTiAlN имеют тетрагональную кристаллическую решетку по сравнению с гексагональной у покрытия NbN. Как следует из рис. 2, *б*, на дифрактограмме покрытия NbTiN

наблюдается дифракционный пик высокой интенсивности, который идентифицируется как NbN (004), характерный тетрагональной структуре. В то же время, на дифрактограмме имеются дифракционные пики NbN (002) и NbN (100), присущие гексагональной структуре, но имеющие очень низкую интенсивность по сравнению с основным пиком NbN (004). Аналогичный дифракционный пик NbN (004) наблюдается и для трехэлементного покрытия NbTiAlN (рис. 3, *б*).

Изменение кристаллического строения нитрида NbN при добавлении в него дополнительных элементов приводит к иному изменению параметров структуры по сравнению с покрытиями на основе нитрида титана. Переход от одноэлементного покрытия NbN к многоэлементным NbTiN и NbTiAlN сопровождается уменьшением полуширины рентгеновской линии на 5...7 % и остаточных сжимающих напряжений в 1,58...1,66 раза в зависимости от состава покрытий. При этом, так же как в случае с покрытиями на основе нитрида титана, для покрытий, имеющих тетрагональную кристаллическую решетку, при переходе от двухэлементных покрытий NbTiN к трехэлементным NbTiAlN наблюдается небольшой рост сжимающих остаточных напряжений. Размеры блоков ОКР при переходе от покрытий NbN к многоэлементным покрытиям практически не изменяются.

Кристаллическое строение покрытий отражается на их механических свойствах. Для покрытий на основе нитрида TiN, имеющих кубическую кристаллическую решетку, переход от одноэлементного покрытия TiN к многоэлементным покрытиям TiNbN и TiNbAlN сопровождается ростом микротвердости в 1,27 и 1,42 раза, модуля упругости в 1,52 и 1,37 раза и коэффициента интенсивности напряжений (трещиностойкости) в 1,24 и 1,28 раза соответственно. Прочность адгезии покрытий с инструментальной основой при этом снижается, о чем свидетельствует рост коэффициента отслоения K_o. Полученные данные согласуются с результатами работ [2, 5].

Для покрытий на основе нитрида NbN переход от одноэлементных покрытий NbN, имеющих гексагональную кристаллическую решетку, к многоэлементным NbTiN и NbTiAlN, имеющим тетрагональную кристаллическую решетку, характеризуется снижением микротвердости (до 7,3 %) и модуля упругости (до 12,6 %). При этом, как и для покрытий на основе нитрида титана, снижается прочность адгезии покрытий и повышается трещиностойкость.

Анализ полученных результатов исследований показывает, что механические свойства покрытий, имеющих одни и те же химические элементы в своем составе, но различное кристаллическое строение, отличаются незначительно. Наибольшее различие наблюдается по микротвердости трехэлементных покрытий, которая выше для покрытий на основе нитрида титана.

Заключение

Закономерности изменения параметров структуры и механических свойств износостойких покрытий при введении в их состав дополнительных элементов зависят от кристаллического строения покрытий. Выявленные закономерности изменения параметров структуры и механические свойства покрытий могут быть использованы при формировании архитектуры многослойных покрытий, имеющих различное кристаллическое строение.

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

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

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

5. **Табаков В.П., Верещака А.С., Верещака А.А., Батако А.Д.** Методологические подходы к формированию многослойных покрытий на режущем инструменте // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 82—88.

6. **Верещака А.С., Григорьев С.Н., Табаков В.П.** Методологические принципы создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 2. С. 18—39.

7. **Табаков В.П.** Износостойкие покрытия на основе нитрида титана, легированного железом и алюминием, для режущего инструмента // Станки и инструмент. 1991. № 3. С. 29—30.

8. **Горелик С.С., Расторгуев Л.Н., Скаков Ю.А.** Рентгеноструктурный и электронно-оптический анализ металлов. М.: Металлургиздат, 1970. 366 с.

9. **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.

10. **Андриевский Р.А., Спивак И.И.** Прочность тугоплавких соединений и материалов на их основе: справочник. Челябинск: Металлургия. Челябинское отделение. 1989. 368 с.

11. **Тугоплавкие** материалы в машиностроении: справочник / под ред. А.Т. Туманова и К.И. Портного. М.: Машиностроение, 1967. 392 с.

УДК 621.7

В.А. Адакин *(Ульяновский институт гражданской авиации имени Главного маршала авиации Б.П. Бугаева),*
Г.Д. Федотов *(Ульяновский государственный аграрный университет имени П.А. Столыпина)*
E-mail: AWA-adakin@yandex.ru

Износостойкость накатных роликов с однослойными износостойкими покрытиями при холодном пластическом деформировании

Исследована износостойкость накатных роликов с однослойными износостойкими покрытиями при холодном пластическом деформировании. Разработана методика экспериментального исследования инструмента в процессе холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах, позволяющая установить закономерности процессов износостойкости накатных роликов.

Ключевые слова: *пластическое деформирование, накатной ролик, износостойкость, однослойное покрытие.*

The wear resistance of rolling rollers with single-layer wear-resistant coatings at cold plastic deformation is studied. The technique of experimental study of the tool in the cold rolling process of rectangular slotted profiles on the shafts is developed, which allows to establish the regularities of the resistance processes of rolling rollers.

Keywords: *plastic deformation, rolling roller, wear resistance, single-layer coating.*

Важнейшим условием развития экономики являются ускорение научно-технического прогресса, рациональное использование всех видов ресурсов, создание и широкое применение высокопроизводительных, ресурсосберегающих, гибких технологий, повышающих качество выпускаемых изделий и их конкурентоспособность. Одно из перспективных направлений развития машиностроения в условиях сокращения энергозатрат, отходов производства, повышения производительности труда — пластическое деформирование металлов. Особое место занимает формообразование профилей на валах холодным пластическим деформированием. Использование пластического деформирования как окончательной операции изготовления деталей приводит к снижению времени изготовления, сокращению расходов электроэнергии, увеличению производительности, повышению механических свойств металла и др.

Повышение качества изделий, их точности и работоспособности при использовании пластического деформирования как окончательной операции приводит к ужесточению условий эксплуатации деформирующего инструмента и возрастанию требований, предъявляемых к его качеству. Таким образом, повышение работоспособности деформирующего инструмента за счет увеличения его периода стойкости — один из главных резервов повышения эффективности производства.

Цель работы — изучение износостойкости накатных роликов с однослойными покрытиями в процессе формирования шлицевых профилей на валах в холодном состоянии.

В настоящее время в процессе холодного пластического деформирования стойкость инструмента без покрытий для холодного пластического деформирования невысока и составляет в среднем 4500...5500 изготовленных деталей [1]. Стойкость инструмента является случайной переменной величиной, которая может принимать для одного и того же инструмента в одинаковых условиях эксплуатации различные значения [2, 3]. Эта величина определяется качеством инструмента, которое создается в процессе изготовления опре-

деленной совокупностью физико-механических, конструктивных и геометрических параметров и условиями эксплуатации (свойствами обрабатываемого материала, режимами обработки и т.д.). Влияние этих факторов на стойкость различно по силе и направлению.

Решение проблемы повышения работоспособности инструмента для холодного пластического деформирования невозможно без исследования механизма изнашивания и разрушения его рабочих частей и контактных процессов на его поверхностях.

Для энергосиловой схемы процесса накатывания шлицев в многороликовых головках характерны большие значения абсолютных и удельных сил, действующих на ролик, в большинстве случаев более 25 кН. Действие таких высоких нагрузок вызывает в ролике напряжения, иногда превосходящие пределы прочности, в результате чего в материале ролика возникают микротрещины и он разрушается [4]. В связи с этим к материалу роликов предъявляются высокие требования по твердости, прокаливаемости и прочности.

Повысить стойкость накатных роликов можно путем азотирования поверхностных слоев, изменения схемы ковки, нанесения на рабочие поверхности износостойких покрытий [5]. Кроме того, необходимо уменьшить максимальные местные напряжения и силы деформирования за счет снижения коэффициента трения в пятне контакта инструмента с заготовкой. Одним из путей реализации этой задачи является использование в качестве барьера между инструментом и обрабатываемым материалом износостойкого покрытия, обладающего высокой твердостью, энергоемкостью, мелкозернистой структурой с минимальным количеством дефектов, а также низким коэффициентом отслоения.

Увеличение износостойкости накатных роликов нанесением износостойких покрытий на рабочие поверхности методом конденсации вещества ионной бомбардировкой (КИБ) позволяет снизить коэффициент контактного трения и замедлить процесс развития микротрещин на профилирующих поверхностях накатного ролика [5]. К таким покрытиям относятся, например TiN, TiCN, TiZrN.

Исследование механизма изнашивания и периода стойкости шлиценакатных роликов с покрытиями, полученными методом КИБ, проводили по количеству накатанных валов.

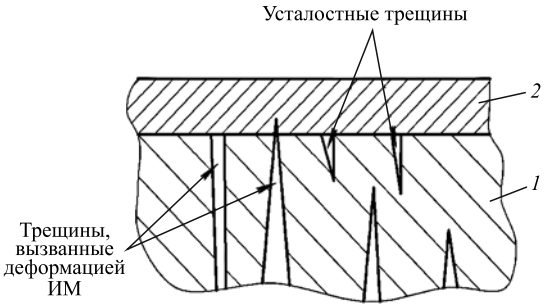


Рис. 1. Зарождение трещин в накатном ролике Р6М5 с пленочным покрытием TiZrN:
1 — инструментальный материал (ИМ) Р6М5; *2* — пленочное покрытие TiZrN

При анализе вышедших из строя роликов были установлены три основных вида разрушений [6]:

1) сквозные радиальные трещины;

2) уголковые поперечные трещины и выкрашивания по режущей кромке ролика;

3) кольцевые отслоения по рабочему профилю ролика (усталостные разрушения).

Результаты исследований показали, что процесс разрушения инструмента с покрытием происходит с образованием микротрещин, которые образуются по межзеренным границам в материале накатного ролика (рис. 1). Микротрещины образуются симметрично на рабочем профиле по глубине попроходного заглубления ролика в заготовку (рис. 2, *а*). Первоначально на боковых поверхностях возникают неровности в виде чешуйчатости (рис. 2, *в*), образование которых полностью зависит от движения металла вдоль инструмента. В процессе исследований установлено, что эти неровности ("чешуйки") — начало появления усталостных радиальных микротрещин. Процесс образования

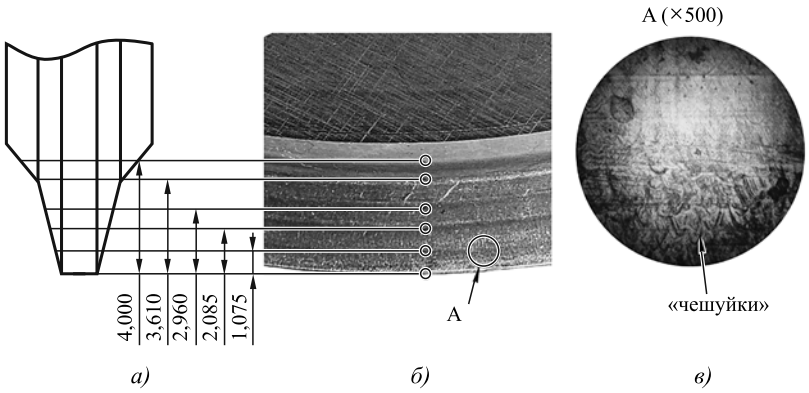


Рис. 2. Расположение кольцевых трещин по глубине внедрения инструмента:
а — величина заглубления накатного ролика; *б* — расположение кольцевых трещин по глубине внедрения накатного ролика; *в* — "чешуйчатость" на конусной части накатного ролика

Рис. 3. Отслоение покрытий на конической части накатного ролика (×130):
1 — пленочное покрытие TiZrN; *2* — инструментальный материал Р6М5; *3* — сетка трещин; *4* — кольцевая трещина

"чешуек" — важная стадия развития усталостного разрушения. Радиальные микротрещины появляются при достижении 10 % от числа циклов, вызывающих разрушение и, таким образом, не менее 90 % долговечности приходится на период их роста. По мере накатывания шлицев радиальные микротрещины переходят в покрытие. Впоследствии, с увеличением времени работы, в ролике и покрытии образуются поперечные трещины, расположенные по кольцу, в результате возникает сетка трещин *3* (рис. 3). Это приводит к разбиению конусной части ролика на отдельные фрагменты, которые работают по отдельности и не выдерживают прикладываемых к ним напряжений со стороны обрабатываемого материала, что приводит к разрушению материала накатного ролика, удалению покрытия *1* и обнажению инструментальной основы *2* (см. рис. 3).

Кольцевые трещины в шлиценакатных роликах возникают симметрично на боковых поверхностях рабочего профиля на расстоянии, примерно равном глубине попроходного внедрения накатного ролика в заготовку (см. рис. 2, *б*). Зарождение трещин происходит быстро и является необратимым процессом.

Развитие кольцевых трещин сопровождается появлением по всей их длине мелких выкрашиваний, имеющих вид точечного отшелушивания тонкого поверхностного слоя металла, что свидетельствует и о скрытом, не менее интенсивном, развитии усталостного разрушения внутрь рабочего профиля ролика.

Усталостные трещины обычно мелкие и их трудно обнаружить до тех пор, пока они не достигнут макроскопического размера, после чего происходит быстрое их распространение и полное разрушение инструмента за короткий промежуток времени. Трещины в шлиценакатных роликах распространяются с противоположных сторон в направлении, перпендикулярном к боковой поверхности рабочего профиля. Такое направление развития усталостных трещин совпадает с направлением действия касательных напряжений, возникающих в роликах в процессе работы.

Анализ поверхности излома (рис. 4) свидетельствует об усталостном характере разрушения накатных роликов, отличительная особенность которого — разрушение стали под действием повторяющихся нагрузок, значительно меньших номинального предела прочности. Об этом свидетельствует отсутствие следов пластической деформации на участке развития усталостного излома. В изломе кольцевого отслоения отчетливо видны три зоны: гладкая с сильным блеском — зона очага разрушения, где трещина развивается относительно медленно; менее гладкая — зона постепенного развития усталостного разрушения, где трещина распространяется быстрее и поверхность разрушения имеет нерегулярный характер, а также матовые (с зернистым строением) участки — зона долома, которая представляет собой поверхность, по которой происходит окончательное разрушение, когда сечение настолько уменьшено, что металл разрушается при приложении нагрузки (см. рис. 4, *б*). Проведенный анализ позволяет охарактеризовать этот вид разрушения как повторный, а с учетом энергосиловой схемы процесса и его скоростного режима — как повторно-статический вид усталостного разрушения.

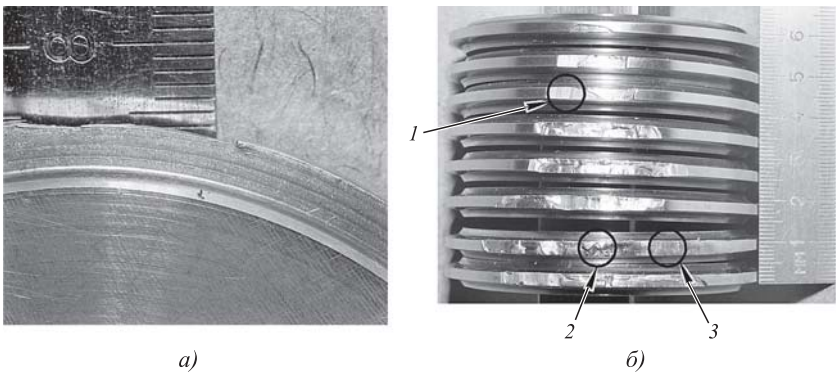
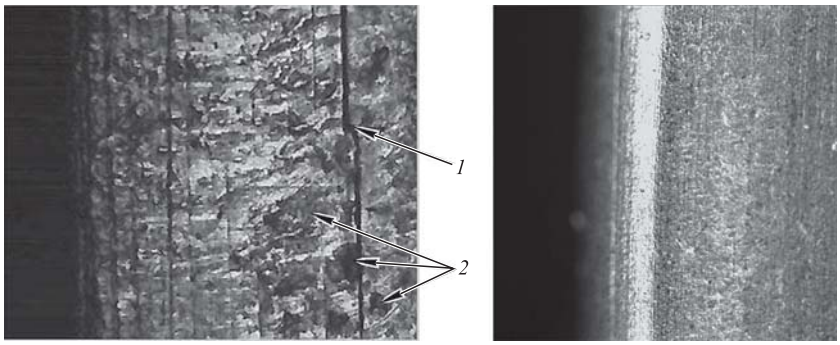


Рис. 4. Кольцевое усталостное отслоение на рабочей поверхности шлиценакатного ролика:
а — кольцевое отслоение; *б* — излом в месте отслоения; *1* — зона очага разрушения; *2* — зона постепенного развития усталостного разрушения; *3* — зона долома по кольцевому отслоению



а) *б)*

Рис. 5. Износ конической поверхности накатного ролика после накатывания 6000 валов:
а — без покрытия; *б* — с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN; *1* — кольцевая трещина; *2* — выкрашивание материала накатного ролика

Разрушение покрытий начинается с поверхности инструмента либо на границе "покрытие — инструментальная основа" (см. рис. 1). Трещины зарождаются на межзеренных границах и растут в подложку по границам раздела, что облегчает отрыв частиц покрытия. Образование трещин происходит под покрытием вследствие деформации поверхностных слоев инструментального материала.

Из рис. 5 видно, что износ по конической части накатного ролика без покрытия при накатывании около 6000 шлицевых валов является катастрофическим (рис. 5, *а*). Видна образовавшаяся кольцевая трещина *1*, ведущая к катастрофической поломке накатного ролика, а также видны элементы выкрашивания *2* по режущей кромке. На накатном ролике с покрытием (рис. 5, *б*) этого не наблюдается, заметно только начало отслоения покрытия в некоторых областях боковой поверхности. По режущей кромке также не наблюдаются явные выкрашивания, но заметно начало зарождения трещины под покрытием.

В результате проведенных экспериментов установлено, что работоспособность инструмента тем выше, чем больше энергоемкость материала покрытия. Выявлено, что трещиностойкость зависит от энергоемкости материала накатного ролика и цикличных нагрузок со стороны заготовки. Установлено, что разрушение накатного ролика без покрытия происходит при достижении циклических нагрузок, приходящихся на одну радиальную микротрещину, 240 циклов, а роликов с однослойным многокомпонентным покрытием TiZrN до 400 циклов.

Анализ результатов исследований разрушения накатного инструмента (ролика) с покрытием при накатывании шлицев позволяет сделать вывод, что наилучшей эффективностью работы инструмента при накатывании шлицев обладают многокомпонентные однослойные покрытия, имеющие повышенную трещиностойкость. Также эти покрытия обладают высокой стойкостью к окислительному износу, объясняемой высокой термостабильностью нитридов и карбидов.

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что при использовании однослойного многокомпонентного покрытия TiZrN работоспособность накатных роликов повышается в 1,9 раза.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 2240196 Российская Федерация, МПК[7] B 21 H 5/00.** Способ продольного многопроходного накатывания профилей на валах / Г.Д. Федотов, Ю.Б. Дриз, М.М. Бадыков, В.Н. Желнов; заявитель и патентообладатель Ульяновская ГСХА. № 2003107068; заявл. 14.03.2003; опубл. 20.11.2004, Бюл. № 32. 5 с.

2. **Адакин В.А.** Повышение долговечности деформирующего инструмента применением износостойких покрытий // Вестник УлГТУ. 2012. № 4. С. 32—36.

3. **Пат. на полезную модель 109608 Российская Федерация, МПК H01L 21/68.** Оправка для закрепления деформирующего инструмента (ролика) при нанесении покрытий / В.А. Адакин, Г.Д. Федотов; заявитель и патентообладатель Адакин В.А. № 2011112890/28; заявл. 04.04.2011; опубл. 20.10.2011, Бюл. № 29. 2 с.

4. **Федотов Г.Д., Адакин В.А.** Контактные напряжения в зоне инструмент—деталь при многопроходном накатывании прямоугольных шлицев на валах в холодном состоянии. Ульяновск: ГСХА, 2012. Т. II. С. 13—18.

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

6. **Адакин В.А.** Инструмент для многопроходного холодного накатывания прямоугольных шлицевых профилей на валах: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 05.02.09. СПбПУ, 2014. 16 с.

УДК 004.93:621.787.6

И.Н. Паламарь, М.Л. Первов
(Рыбинский государственный авиационный технический университет имени П.А. Соловьева)
E-mail: irina.palamar@mail.ru

Формализация вербальных оценок качества дробеструйной обработки на основе анализа изображений поверхности металла

Предложен метод автоматизации оценки качества дробеструйной обработки по изображению поверхности. Разработана модель представления изображения гетерогенной сегментной структуры, основанная на комбинации яркостной, текстурной и контурной обработки изображения. Предложена группа показателей для оценки характерных элементов структуры поверхности, соответствующих системе вербальных терминов. Получены автоматические вербальные описания структуры поверхности образцов с соответствующими числовыми значениями показателей.

Ключевые слова: *дробеструйное упрочнение, автоматизация оценки качества, анализ изображения, гетерогенная сегментная структура, вербальная оценка структуры поверхности, группа показателей параметризации структуры поверхности.*

The method of quality estimation automation of shot blasting using surface image is proposed. The model of heterogeneous segment structure image representation based on combination of brightness, texture and contour image processing is developed. Group of indicators for estimating of characteristic elements of the surface structure corresponding to the system of verbal terms is suggested. Automatic verbal descriptions of the surface structure of samples with corresponding numerical values of indicators are obtained.

Keywords: *shot peening hardening, automation of quality estimation, image analysis, heterogeneous segment structure, verbal evaluation of surface structure, group of indicators of the parameterization of the surface structure.*

Введение

Технологии обработки деталей дробью находят широкое применение при упрочнении поверхности как при изготовлении, так при ремонте. Изменение структуры поверхностного слоя влияет на физико-механические свойства, определяющие требуемые эксплуатационные показатели. Например, повышение надежности твердосплавного инструмента обеспечивается за счет округления режущих кромок и остаточных напряжений сжатия в поверхностном слое. Особое внимание уделяется исследованию качества поверхностного слоя ответственных деталей авиадвигателей и определению оптимальных параметров технологического процесса для различных условий [1]. Изучение свойств поверхностного слоя, влияющих на повышение назначенного ресурса изделий и увеличение межремонтного интервала, непосредственно связано с описательной оценкой структуры поверхности и металлографическим анализом [2—4].

Автоматизация анализа структуры поверхности в общем случае достигается за счет использования методов обработки и анализа изображений. Известные методы и системы, основанные на анализе изображения с использованием базовых методов обработки изображений [5, 6], не позволяют выделять и оценивать сложные элементы структуры, характерные для дробеструйной обработки. В результате анализ качества обработки поверхности выполняется человеком путем оценки вербальных характеристик при осмотре структуры поверхности. В автоматизированном режиме определяется только степень покрытия дробью, при этом отмечается низкая точность метода при наложении отпечатков [7].

Описание модели представления изображения

В процессе дробеструйного упрочнения происходит формирование характерного рельефа поверхности, особенности которого определяют качество полученного поверхностного слоя. Примеры изображений поверхности после дробеструйного упрочнения показаны на рис. 1.

Визуальный и вербальный анализ качества дробеструйной обработки поверхности проводится как при изучении влияния параметров обработки на различные материалы, так и при контрольных операциях в процессе производства. В зависимости от цели обработки применяется классификация или описание особенностей по-

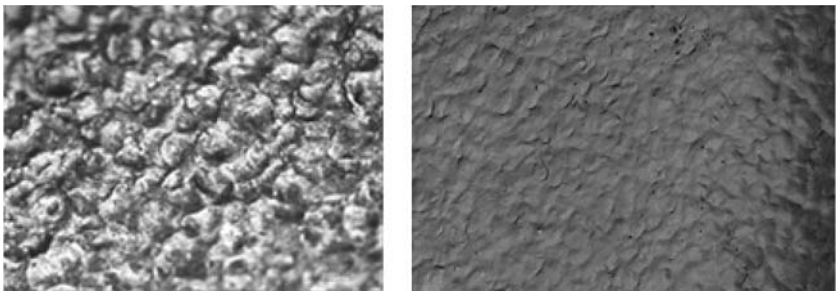


Рис. 1. Характерные изображения структуры поверхности после дробеструйного упрочнения

верхности. Классификация в основном бинарная по виду "приемлемо—неприемлемо", что позволяет получить приблизительную оценку качества поверхности. Классификатор содержит характерные изображения поверхности, сравнение с которыми выполняется человеком. Более точную характеристику рельефа можно получить, применяя специальную терминологию.

На основе обзора источников [1, 4, 8, 9] были выделены характеристики, описывающие особенности получаемой поверхности в результате применения различных параметров технологического процесса:

— микрорельеф неравномерный/равномерный;

— микрорельеф регулярный/нерегулярный;

— выступы (риски) острые и быстро утолщаются по глубине;

— отдельные острые риски;

— улучшение микрорельефа (увеличение радиусов впадин) за счет отсутствия рисок;

— надрезы, царапины, глубокие риски;

— выступы скругляются по большому радиусу;

— складки;

— степень покрытия.

Данные характеристики связаны с определенными эксплуатационными качествами поверхности. Например, наличие острых и глубоких рисок свидетельствует о возможном формировании концентраторов напряжений. Однако такой анализ является качественным и не позволяет оценить степень влияния определенных особенностей микрорельефа на эксплуатационные показатели. Очевидно, что приведенные характеристики не имеют формализованного описания, поэтому для получения параметров структуры необходимо выделить характерные структурные элементы на изображении, найти их числовые оценки и получить описание структуры, пригодное для автоматизации получения экспертного заключения о качестве поверхности.

Структура металла после дробеструйной обработки сложная из-за неоднородности поверхности, подвергнутой ударам потока дроби. В процессе обработки происходят процессы течения материала, изменение шероховатости, динамическое изменение формы отпечатков, которые создают гетерогенную структуру поверхности металла, формализация описания которой значительно затруднена.

В результате физических процессов исследуемые изображения обработанной поверхности имеют гетерогенную сегментную структуру, характеризуемую наличием сегментов, выделяемых по яркости, текстуре и контурам, и их устойчивыми сочетаниями. В то же время структурные группы сегментов обладают изменчивостью составляющих их структурных элементов.

Исходными данными для анализа является множество пикселей изображения. Предварительно выполняются операции улучшения изображения (цветовая коррекция, сглаживание и т.п.). В процессе сегментации пиксели должны быть сгруппированы в топологически связные однородные сегменты в соответствии с предикатом гомогенности $H(\ )$. Для гетерогенной сегментной структуры предикат гомогенности сегмента S_i может быть представлен как совокупность взвешенных предикатов по частным факторам гомогенности:

$$H(S_i) = (v_f H_f \mid f = 1, ..., F),$$

где v_f — весовой коэффициент значимости частного фактора гомогенности f; F — число факторов гомогенности.

Каждый фактор гомогенности f, формирующий частный предикат гомогенности H_f, характеризует сегменты изображения по одному из следующих информационных признаков: яркости (цвету), текстуре и контурам.

Для оценки качества обработки поверхности необходимо скомбинировать методы обработки изображений для обнаружения смысловых структурных элементов и подобрать параметры, обеспечивающие эффективное выделение яркостных, текстурных и контурных составляющих. Рассмотрим основные методы обработки изображений, которые были исследованы в данной работе.

Учитывая то, что в первую очередь зрение опирается на контурную информацию, к исходному изображению применяется фильтр Габора, импульсная переходная характеристика которого определяется в виде гармонической функции, умноженной на Гауссиан. Математически фильтр представляется выражением:

$$g(x, y, \lambda, \theta, \psi, \sigma, \gamma) = \\ = \exp\left(-\frac{x'^2 + \gamma^2 y'^2}{2\sigma^2}\right)\cos\left(i\left(2\pi\frac{x'}{\lambda} + \psi\right)\right),$$

где x, y — координаты ядра в заранее заданных пределах; λ — период ядра в пикселях; θ — наклон ядра; σ — дисперсия Гауссиана; ψ — смещение фазы ядра; γ — сжатие Гауссиана; $x' = x\cos\theta + y\sin\theta$; $y' = x\sin\theta + y\cos\theta$.

Фильтры Габора являются специальными классами полосовых фильтров, т.е. представляют некоторый "диапазон" частот и их отклонения. Когда фильтр Габора применяется к изображению, он дает наивысший отклик по краям и в точках, где изменяется текстура.

Один из аспектов текстуры связан с пространственным распределением и пространственной взаимозависимостью значений яркости локальной области изображения с ростом расстояния между оцениваемыми точками. В крупнозернистых текстурах изменение распределения яркости происходит значительно медленнее, чем в мелкозернистых.

Статистика пространственной взаимозависимости значений яркости вычисляется по матрицам переходов значений яркости между ближайшими соседними точками. Матрица P смежности (или матрица совместной встречаемости) уровней яркости представляет собой оценку плотности распределения вероятностей второго порядка, полученную по изображению в предположении, что плотность вероятности зависит лишь от расположения двух пикселей. Элементы матрицы смежности — $P(i, j, d, \varphi)$, где i и j — яркости соседних точек на изображении, расположенных на расстоянии d друг от друга, при угловом направлении φ. Поскольку число таких матриц может быть очень большим, то обычно ограничиваются рассмотрением пикселей, находящихся в непосредственной близости, либо усредняют матрицы, составленные для различных ориентаций.

Полученную матрицу совместной встречаемости обычно приводят к нормализованной матрице. Матрица рассчитывается по следующей формуле:

$$N(i, j, d, \varphi) = \frac{P(i, j, d, \varphi)}{\sum_i \sum_j P(i, j, d, \varphi)},$$

т.е. значения $N(i, j, d,)$ после этого лежат в интервале [0, 1] и для текстур большого размера могут служить условными вероятностями.

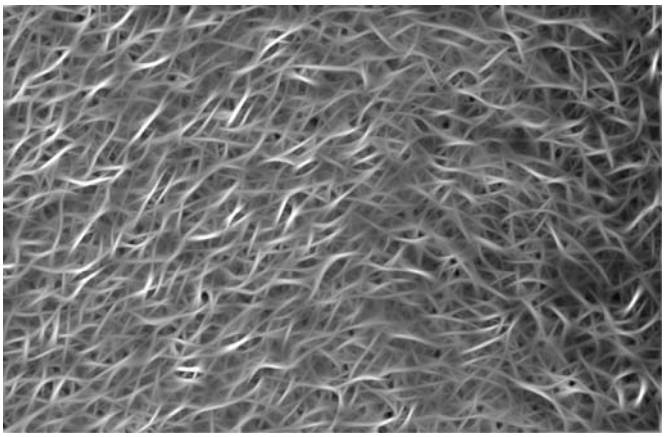


Рис. 2. Результат обработки изображения поверхности фильтром Габора

Рассматривая текстуру поверхности как яркостную матрицу, можно рассчитать различные характеристики изображения, например максимум вероятности:

$$\max_{i,j}(c_{i,j}),$$

где c_{ij} — элемент яркостной матрицы смежности.

Результат обработки изображения поверхности, приведенного на рис. 1 (справа), фильтром Габора показан на рис. 2. Для обработки изображения были установлены следующие параметры фильтра Габора: размер ядра — 31; $\sigma = 4$; $\lambda = 10$; $\gamma = 0{,}5$; $\psi = 0$.

Результаты сегментации изображения, представленного на рис. 2, приведены на рис. 3 (см. обложку). Определен порог сегментации для диапазона 0...255 уровней яркости: 180 (рис. 3, *а*) и 220 (рис. 3, *б*). Как видно, применение различной величины порога существенно влияет на вид получаемой структуры.

Рассчитанные параметры выделенных сегментов и числовые оценки изображения необходимо связать с вербальным описанием характерных особенностей поверхности.

Описание реализации метода

Для технологии дробеструйного упрочнения разработана модель автоматизации оценки качества поверхности. Предложенный метод сегментации позволяет выделить характерные элементы структуры (рис. 4, см. обложку). Для используемых на практике качественных терминов, характеризующих структуру, разработаны математические модели, позволяющие получить численные значения характеристик качества поверхности.

Описание элементов структуры непосредственно связано с особенностями технологического процесса. Наблюдение на структуре определенных элементов позволяет скорректировать параметры обработки и повысить ее качество. Однако данные характеристики структуры поверхности неформализованы и не имеют параметрической оценки.

Для анализа поверхности металла в данной работе выделены следующие характеристики:

— число больших сегментов;

— средний угол наклона сегментов;

— разнонаправленные/однонаправленные сегменты;

— максимум вероятности элементов матрицы совместной встречаемости;

— момент порядка k разности элементов матрицы совместной встречаемости;

— обратный момент разности элементов k-го порядка матрицы совместной встречаемости;

— однородность по матрице совместной встречаемости;

— энтропия по матрице совместной встречаемости.

Контуры и особенности текстуры выделены фильтром Габора. На изображении сегментации цветом выделены 3 группы сегментов по площади: красный — малые сегменты, синий — средние сегменты и зеленый — большие сегменты.

Формализация вербальных оценок качества дробеструйной обработки

Вербальная характеристика структуры	Показатель	Значение
Хаотичность структурных элементов	Разнонаправленность сегментов	Дисперсия углов наклона сегментов
Регулярность рельефа	Однородность по матрице P	Однородность $\Sigma_i \Sigma_j c_{ij}^2$
Равномерность рельефа	Энтропия по матрице P	Энтропия $-\Sigma_i \Sigma_j c_{ij} \log_2 c_{ij}$
Складчатость	Форма и расположение сегментов	Момент порядка k разности элементов $\Sigma_i \Sigma_j (i-j)^k c_{ij}$
Дисперсность	Размер и расположение сегментов	Обратный момент разности элементов k-го порядка $\Sigma_i \Sigma_j c_{ij}/(i-j)^k, i \neq j$
Степень покрытия	Равномерность распределения сегментов	Дисперсия числа сегментов по осям X и Y

Рассматривая только большие сегменты, формирующие основной рисунок текстуры, находим для каждого сегмента угол наклона, определяемый по описывающему прямоугольнику, и считаем число больших сегментов. Вычисляем математическое ожидание углов наклона сегментов. Далее вычисляем дисперсию углов, используя величины угла наклона сегмента и его математического ожидания, на основе чего принимается решение, являются выделенные сегменты однонаправленными или разнонаправленными.

Результаты формализации системы вербальных терминов и оценок качества дробеструйной обработки по изображениям поверхности приведены в таблице.

Результаты эксперимента и их обсуждение

Для экспериментального исследования разработана программа, обеспечивающая загрузку изображений поверхности, предварительную обработку изображения, сегментацию и расчет параметров сегментов [10]. На основе модели формализации вербальных терминов автоматически формируется вербальное описание структуры поверхности с соответствующими числовыми оценками.

Интерфейс программы, вид которого приведен на рис. 5, предусматривает возможность сравнительного анализа структур после обработки с различными параметрами. В экспериментах использовались изображения поверхностей образцов из материалов ЭИ787 и ВТ6 после обработки с изменением параметров: угол атаки, расстояние до мишени и давление.

Результаты автоматического анализа структуры поверхности образцов из материала ВТ6 после дробеструйной обработки на расстоянии 125 мм (×100) при угле атаки 45° и давлении 0,2 и 0,3 МПа (слева и справа соответственно) показаны на рис. 5. При сравнении изображений поверхностей, обработанных с разными параметрами, видно, что изменение структуры отражено в виде числовых характеристик и сформулировано ее экспертное описание.

Сравнивая результаты автоматической оценки поверхности по изображению, можно увидеть, что образцы являются по хаотичности следов дроби разнонаправленными. Это свидетельствует о том, что дроби не попадали в одно и то же место. Рассматривая параметры первого образца, можно увидеть, что при увеличении давления повышаются однородность и энтропия, а анализ описания второго образца показывает, что при увеличении давления однородность не изменяется, но уменьшается энтропия.

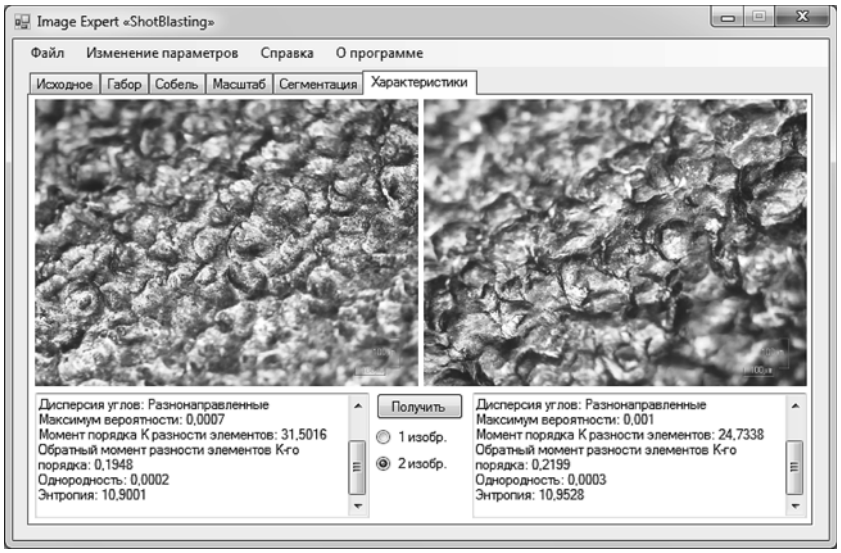


Рис. 5. Интерфейс программы автоматического формализованного вербального анализа структуры поверхности после дробеструйного упрочнения

Таким образом, полученные значения предложенных параметров позволяют оценить изменения структуры поверхности в результате дробеструйного упрочнения, связанные с изменением параметров технологического процесса.

Вербальные описания образцов, полученные на основе вычисленных значений параметров по изображению, согласуются с результатами описания качества обработки отдельных зон деталей, выполненных экспертами на производстве путем визуального осмотра в соответствии с существующими методиками сопоставления с образцами.

Заключение

Как показали эксперименты, анализ изображений поверхности металла позволяет автоматически оценивать качество дробеструйной обработки с вычислением показателей, соответствующих вербальным оценкам. В связи с этим результаты работы могут быть использованы для автоматизации процесса оценки качества поверхности металла после дробеструйной обработки и подбора параметров технологического процесса.

Разработанные модели и методы обеспечивают решение трудно формализуемых задач анализа структуры, получение их числовых и вербальных оценок, формирование классификаторов характерных изображений с аннотациями, что позволяет связать вид структуры и отдельные характеристики структуры поверхности со значениями эксплуатационных показателей.

Предлагаемый метод может быть применен для сравнения результатов различных исследований и позволит исключить субъективность в оценке качества дробеструйной обработки на основе автоматизации описания структуры по изображению поверхности.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бардинова С.Н.** Исследование качества поверхностного слоя при дробеструйной обработке в ремонтном производстве: дис. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2013. 130 с.

2. **Коновалов Д.И., Ширваньянц Г.Г.** Метод ультразвукового упрочнения поверхностей узлов и деталей авиационных газотурбинных двигателей как одна из перспективных технологий в авиастроении // Молодой ученый. 2015. № 22. С. 141—147.

3. **Дияк А.Ю.** Перспективные методы определения степени покрытия при обработке дробью // Вестник ИрГТУ. 2014. № 7 (90). С. 12—17.

4. **Технологическое** обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть I. Запорожье: АО "Мотор Сич", 2017. 500 с.

5. **Программа** для количественного анализа изображений ImageExpert Pro 3 [Электронный ресурс]: сайт компании "ООО "Новые экспертные системы"". URL: http://www.nexsys.ru/nexsys_iepro3x.htm (дата обращения: 05.09.2018).

6. **Анализ** изображений altamisoft.ru [Электронный ресурс]: сайт компании "Altami Software". URL: http://altamisoft.ru/article/image_analysis/ (дата обращения: 07.09.2018).

7. **Дияк А.Ю.** Определение степени покрытия автоматизированным методом // Вестник ИрГТУ. 2015. № 12 (107). С. 19—25.

8. **Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Лебеденко В.Г.** Повышение качества поверхностного слоя деталей при обработке поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных средах // Вестник Донского государственного технического университета. 2009. Т. 9. № 3 (42). С. 469—480.

9. **Лупкин Б.В., Погребельный Н.С.** Упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием // Открытые информационные и компьютерные интегрированные технологии. 2013. № 58. С. 40—48.

10. **Свидетельство** о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2018613919 Программа для оценки качества дробеструйной обработки по изображения поверхности металла "Image Expert "ShotBlasting" / И.Н. Паламарь, А.В. Чекунов; заявитель и правообладатель ФГБОУ ВО РГАТУ имени П.А. Соловьева. Заявка № 2018611310 от 12.02.2018; опубл. 27.03.2018.

УДК 621.891

В.А. Ким, Аунг Нгве Тайн
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)
E-mail: sinerg@mail.ru

Количественная оценка диссипативных свойств поверхностной структуры стали 25ХМ, упрочненной импульсным лазерным воздействием

Поверхностная структура, упрочненная лазерным излучением, формируется в неравновесных условиях взаимодействия материала с высококонцентрированным потоком энергии. Образование и развитие такой структуры происходит по синергетическому алгоритму процесса фазово-структурных превращений. Диссипативные свойства упрочненных структур можно описать комплексом количественных показателей, таких как количество "темных" микроструктурных объектов на единичной площади поверхности микрошлифа и средняя плотность границ, вычисляемых по изображениям микроструктур с помощью специальных программ. Показан характер распределения микроструктурных показателей по глубине упрочненного слоя в зависимости от режимов лазерного воздействия и их корреляция с микротвердостью.

Ключевые слова: *лазерное излучение, упрочнение, микроструктура, твердость, дефекты кристаллического строения.*

The superficial structure strengthened by laser radiation is formed in nonequilibrium conditions of interaction of material with the high-concentrated energy stream. Formation and development of such structure are realized on synergetic algorithm of phase and structural transformations process. Dissipative properties of the strengthened structures can be described complex of quantitative indices, such as amount of "dark" microstructural objects on the single surface area of microsection and the average density of borders, calculated according to images of microstructures by means of special programs. Pattern of distribution of microstructural indicators on depth of the strengthened layer depending on the modes of laser action and their correlation with microhardness is shown.

Keywords: *laser radiation, hardening, microstructure, hardness, defects of crystal structure.*

Введение

Лазерное излучение относится к высококонцентрированному потоку энергии. Структурные изменения в результате взаимодействия лазерного излучения с материалами протекают в неравновесных условиях на фоне высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения. Такие термические условия далеки от условий стандартной термической обработки, поэтому процессы структурообразования при лазерной обработке материалов носят согласованный характер, развитие которого осуществляется по синергетическому алгоритму. Результатом этого процесса является образование диссипативных структур, которые создают на микро- и мезомасштабном уровне каналы повышенной проводимости энергомассопереноса. Принципиальные закономерности этого процесса достаточно хорошо исследованы и представлены в литературе [1—3]. Тем не менее имеется ряд нерешенных задач, актуальность которых сохраняется. К ним относят количественное описание неравновесных диссипативных поверхностных структур, возникающих в неравновесных условиях взаимодействия материалов с высококонцентрированными потоками энергии и вещества, и использование полученных закономерностей для селективного управления процессами лазерных технологий.

Изображения микроструктур с формальной точки зрения представляют собой совокупность геометрических фигур, объединенных в множества с определенной упорядоченностью, по которым визуально можно идентифицировать различные

структурные составляющие и их модификации. Современные средства обработки изображений позволяют преобразовывать цифровые фотографии микроструктур и цветовые оттенки их отдельных составляющих в числовые массивы, используя которые можно создавать количественные показатели и комплексы, характеризующие структурную организацию материала и динамику структурных изменений [4—7].

В статье представлены результаты исследований структурных изменений в поверхностных слоях низкоуглеродистой легированной стали 25ХМ под действием импульсного лазерного излучения с использованием количественных показателей структурной организации материала.

Методика исследования

Исследовали поверхностные микроструктуры образцов из низкоуглеродистой легированной стали 25ХМ, обработанных импульсным лазерным излучением на технологической установке LRS-300. Удельную энергию E и плотность мощности излучения q вычисляли по формулам:

$$E = \frac{4Wf}{\pi d^2};$$

$$q = \frac{E}{t},$$

где W — энергия единичного импульса; f — частота импульсов; d — диаметр пятна лазерного воздействия; t — длительность лазерного импульса.

Режимы лазерной обработки представлены в таблице.

Обработанная поверхность представляла собой совокупность единичных пятен лазерного воздействия круглой формы с коэффициентом перекрытия 0,75.

Режимы лазерной обработки стали 25ХМ

Номер режима	W, Дж	t, мс	d, см	f, Гц	q, Вт/см^2	E, Дж/см^2
1	5,5	1,0	0,2	3	$5{,}255 \cdot 10^5$	525
2	11,0	2,0			$5{,}255 \cdot 10^5$	1051
3	3,6	1,0			$3{,}439 \cdot 10^5$	343
4	8,1	2,0			$3{,}869 \cdot 10^5$	773
5	2,1	1,0			$2{,}006 \cdot 10^4$	200
6	5,0	2,0			$2{,}389 \cdot 10^4$	477

Травление металлографических шлифов осуществляли реактивами, соответствующими составу и структуре материала [4]. Изображения микроструктур в поперечных сечениях поверхностных слоев получали с помощью металлографического микроскопа Nikon 200A при 400- и 1000-кратном увеличениях. Микротвердость измеряли по шкале Виккерса с помощью микротвердомера HMV (Shimadzu) при нагрузке на алмазный наконечник 0,49 Н.

Обрабатывали изображения микроструктур в программе Image.Pro.Plus.5.1, включающей корректировку резкости, снятие контрастной маски, выделение границ с помощью фильтра Лапласа и калибровку для привязки кратности увеличения изображения к соответствующей масштабной линейке. Затем определяли количественные показатели микроструктурной организации материала, в частности, число микроструктурных объектов N, суммарную длину их периметров P_i и площадей F_i, зафиксированных на определенной площади металлографического шлифа, а также фрактальную размерность границ D_i [8]. Последнюю характеристику использовали как меру структурной упорядоченности. На одном изображении микроструктур располагалось от 500 до 1500 микроструктурных объектов. Этого было достаточно для обеспечения допустимой статистической точности при использовании 2—3 фотографий микроструктуры.

По результатам измерений рассчитывали комплексные показатели структурной организации, в частности, среднюю плотность границ и относительную суммарную площадь темных микроструктурных объектов:

$$p_{\text{ср}} = \frac{\sum P_i}{F_{\text{ф}}};$$

$$f_{\text{отн}} = \frac{\sum F_i}{F_{\text{ф}}},$$

где $F_{\text{ф}}$ — площадь поверхности металлографического шлифа, зафиксированная на одной фотографии. При 400-кратном увеличении $F_{\text{ф}} = 240 \times 300$ мкм^2.

Для определения характера распределения показателей структурной организации поверхностного слоя по глубине изображение микроструктуры разбивали на полосы шириной 25 мкм и длиной 300 мкм, начиная с поверхности. На каждом выделенном участке определяли количественные показатели микроструктур и вычисляли среднюю плотность границ, по результатам которых строили кривые распределения по глубине.

Результаты исследований и их анализ

На рис. 1 представлены микроструктуры поверхностных слоев, сформированные импульсным лазерным излучением. Исходная структура стали 25ХМ представляет собой равновесную ферритно-перлитную композицию, состоящую из зерен, близких к равноосной форме.

Микроструктура, полученная в результате взаимодействия материала с лазерным излучением, развивается по синергетическому алгоритму вдали от равновесных условий. Процессы структурообразования, протекающие в неравновесной системе, носят нелинейный кооперативный характер, в результате которого возникает множество неустойчивых состояний, связанных с переносом заряда, тепла, дефектов кристаллического строения и вещества. Структура, сформированная в таких условиях, отличается повышенным содержанием свободной энергии и может быть отнесена к категории диссипативных. Диссипативные структуры представляют собой совокупность структурных образований, функционирующих по единому алгоритму, призванному понижать свободную энергию и восстанавливать баланс между внешними энергетическими воздействиями и тепловыми стоками.

Характер функционирования диссипативных структур, возникающих при взаимодействии материалов с концентрированными энергетическими потоками, принципиально отличается от тех диссипативных структур, которые образуются в неравновесных деформационных системах. Диссипативные структуры, образующиеся при пластической деформации, выполняют функцию преобразования поглощенной свободной энергии в тепло за счет работы внутреннего трения и генерации потока дефектов кристаллического строения. Они инициируют структурные изменения и создают активные каналы для отвода и рассеивания тепла в окружающую среду [9].

При взаимодействии материала с концентрированным энергетическим потоком диссипативные структуры создают активные каналы повышенной проводимости для диффузионного и конвективного массопереноса, инициированными сверхвысокими градиентами температур, скоростями нагрева и охлаждения, фронтом распространения тепловых и ударных волн. На реализацию этих механизмов требуются энергетические затраты, которые и определяют эффективность диссипативного процесса [10].

Одна из важных составляющих диссипативных структур — внутренние границы раздела зерен и фаз, которые на изображениях микроструктур проявляются в виде линейных образований, объединенных в геометрические множества с разной степенью упорядоченности. При кристаллизации расплава границы раздела переходят в твердотельное состояние в последнюю очередь, дольше оставаясь в жидкофазном виде. Границы, находящиеся в жидкофазном состоянии, являются эффективными каналами для диффу-

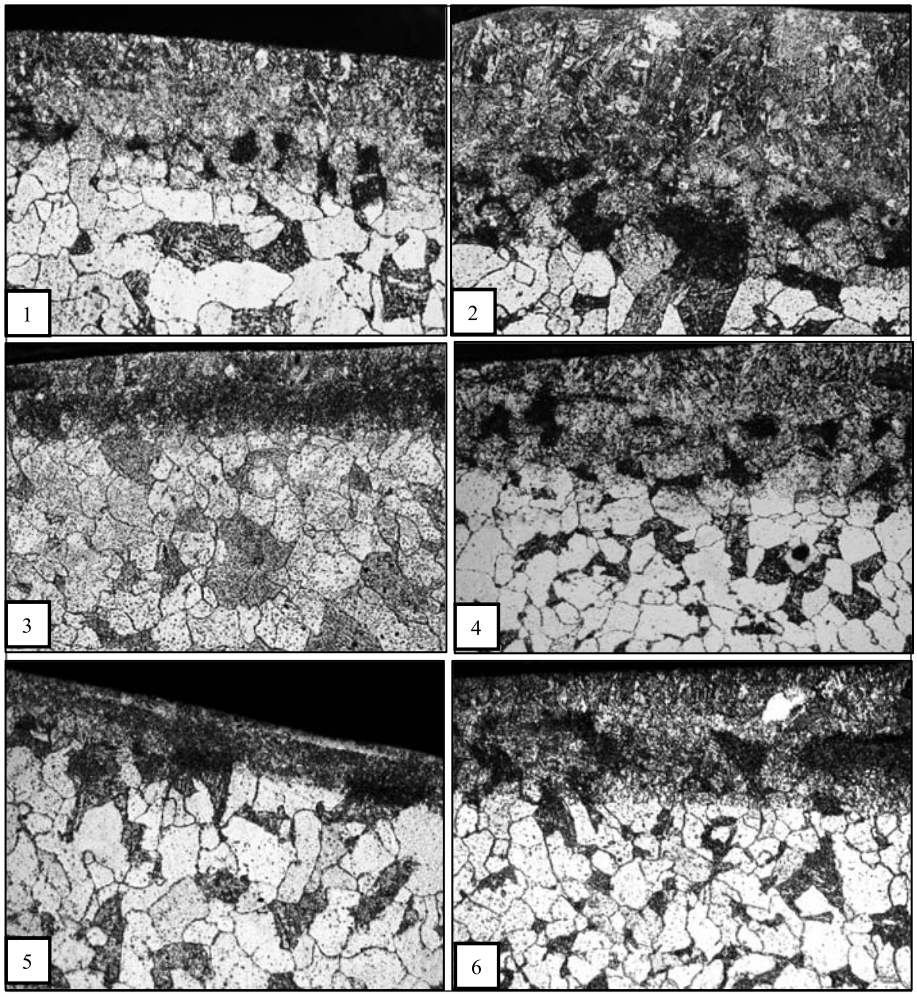


Рис. 1. Микроструктуры упрочненного слоя (номер изображения соответствует режиму лазерной обработки, см. таблицу)

зионного и конвективного массопереноса — неотъемлемой части диссипативного процесса. После затвердевания расплава внутренние границы представляют собой высокоэнергетическую структуру, включающую аморфную и кристаллическую фазы с высокой плотностью различных дефектов строения. Такая структура отличается высокой диффузионной активностью, так как энергия активации пограничной диффузии на несколько порядков ниже энергии активации объемной внутризеренной диффузии. Следовательно, чем больше суммарная протяженность внутренних границ, тем выше диссипативная активность структуры.

Поверхностная микроструктура отличается высокой неоднородностью и имеет слоистое строение, типичное для структур, сформированных лазерным воздействием [2]. Самый верхний слой подвержен плавлению, а при высокой плотности мощности излучения — испарению. При образовании жидкой фазы происходит ее активное взаимодействие с внешней средой, связанное с поглощением газов, диффузионным и конвективным перемешиванием и образованием микропор. Слой, образованный из жидкофазного расплава, состоит из дендритов низкоуглеродистого мартенсита, ориентированных перпендикулярно к поверхности, мелких зерен остаточного аустенита и феррита. Характер ориентации дендритов указывает на высокую степень структурной упорядоченности этого слоя. Наличие остаточного аустенита связано неравномерным содержанием легирующих элементов, в частности хрома и молибдена. Высокая скорость охлаждения при кристаллизации расплава нередко приводит к образованию горячих и холодных трещин.

Зона термического влияния (ЗТВ) включает в себя слой с закаленной мартенситной структурой, плавно переходящей в область исходной структуры. Зона отпуска в структуре поверхностного слоя стали 25ХМ практически не проявляется. В ЗТВ наблюдается высокая плотность точечных микрообъектов, концентрация которых носит градиентный характер, соответствующий распределению температуры по глубине. Можно предположить, что основной причиной образования точечных микроструктур, идентифицированных травлением, являются колонии вакансий и выходы дислокаций на поверхность металлографического шлифа, образующие нано- и микромасштабные концентраторы напряжений.

Глубина измененного слоя и размеры ее отдельных областей, сформированных лазерным излучением, принимают разные значения в зависимости от режимов обработки. С повышением энергии лазерного воздействия глубина упрочненного слоя, как правило, увеличивается.

Степень упрочнения сформированного слоя оценивается микротвердостью. С увеличением энергии лазерного воздействия микротвердость измененной структуры меняется по экстремальной зависимости. Это указывает на то, что на развитие таких структур оказывают влияние как минимум два конкурирующих процесса: термическая генерация и "залечивание" дефектов кристаллического строения, активность которых носит интенсивный характер в зависимости от энергии или мощности лазерного воздействия.

Для количественной оценки диссипативных свойств микроструктуры можно использовать показатели средней плотности границ и средней суммарной площади темных микроструктурных объектов, отнесенных к единичной площади металлографического шлифа. Чем выше средняя плотность границ, тем активней процессы массопереноса вдоль них. Кроме того, высокая плотность границ создает потенциальные барьеры для торможения различных носителей пластической деформации, в первую очередь дислокаций, при силовом воздействии на материал, а это соответствует повышению его механической прочности.

Анализ изображений поверхностных микроструктур, полученных лазерной обработкой, показывает, что плотность границ максимальна в закалочной области ЗТВ. Изменение средней плотности границ по глубине слоя, упрочненного лазерным излучением на некоторых режимах, показано на рис. 2.

Темные микроструктурные объекты представляют собой микроструктуры с высоким химиче-

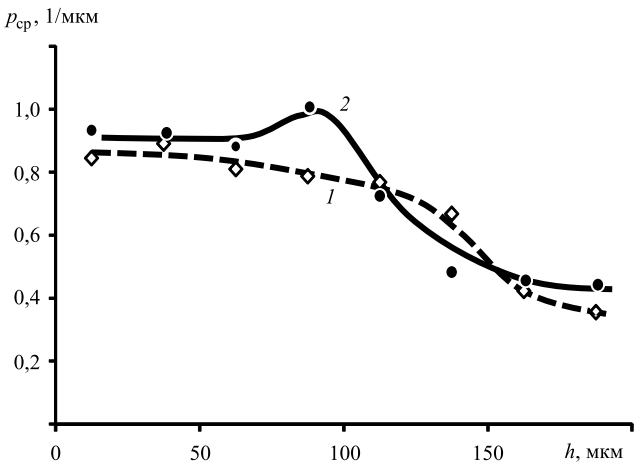


Рис. 2. Распределение средней плотности границ по глубине упрочненного слоя при *E*, Дж/см^2:
1 — 1051; *2* — 773

ским потенциалом, которые можно идентифицировать травлением металлографического шлифа [4, 7]. Суммарная площадь темных объектов — это площадь всех сечений микроструктурных составляющих в плоскости шлифа, имеющих высокое значение свободной энергии. К таким темным объектам можно отнести границы зерен, микрообъемы с высоким содержанием упругой энергии, возникающие вокруг различных микро- и мезоконцентраторов напряжений, зерна с повышенной величиной химического потенциала в поликристаллических системах и т.п.

На рис. 3 представлен характер распределения суммарной площади темных объектов в поверхностных структурах упрочненного слоя, отнесенных к единичной площади металлографического шлифа. Характер изменения этого показателя по глубине является результатом распространения поглощенного излучения и структурных превращений, инициированных этой энергией.

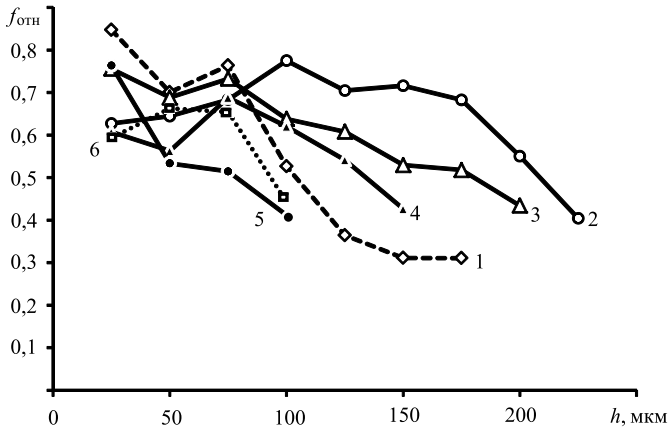


Рис. 3. Распределение относительной площади темных микроструктурных объектов по глубине упрочненного слоя (номера кривых соответствуют режимам обработки, см. таблицу)

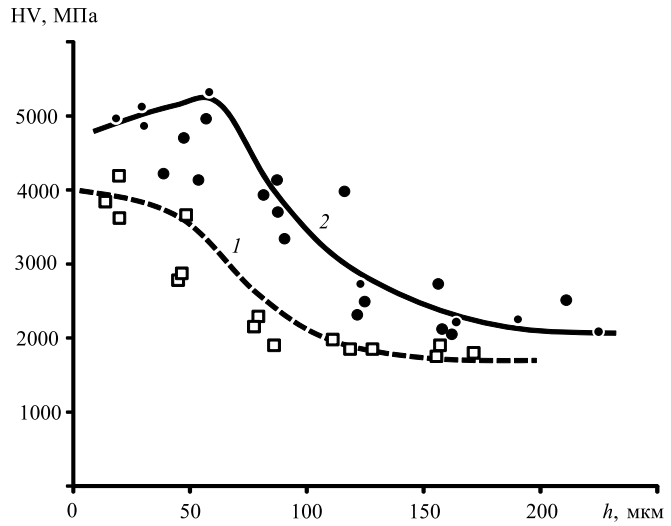


Рис. 4. Распределение микротвердости в поверхностном слое стали 25ХМ после лазерной обработки при E, Дж/см^2: *1* — 1051; *2* — 773

Поглощенная энергия лазерного воздействия в металлических системах проявляется главным образом в виде тепла или динамического температурного поля. На отдельных режимах лазерного воздействия в самых верхних слоях образуется микроструктура с пониженной величиной химического потенциала. Это связано с процессами термического отжига и отпуска, который может протекать в слоях с высокой температурой. Однако при лазерной обработке высоколегированных сталей площадь "светлых" объектов на изображениях микроструктур может быть связана с образованием остаточного аустенита. Он плохо поддается травлению даже при высокой величине его химического потенциала. Это необходимо учитывать при структурно-энергетическом анализе упрочненных и модифицированных лазерной обработкой поверхностей.

Упрочнение поверхностного слоя носит градиентный характер. Распределение микротвердости по глубине определяется характером структурной организации поверхностного слоя. На рис. 4 представлены результаты изменений микротвердости на некоторых режимах лазерной обработки. Микротвердость максимальна в ЗТВ в области закалочных структур. Самая верхняя область, которая сформировалась из жидкофазного состояния обрабатываемого материала, имеет микротвердость в большинстве случаев ниже, чем в закалочном слое ЗТВ.

Характер изменения по глубине средней плотности границ, относительной площади "темных" микроструктурных объектов и микротвердости наглядно показывает, что между этими параметрами существует прямо пропорциональная зависимость. С повышением степени неравновесности микроструктурного состояния твердость возрастает.

Выводы

При лазерной обработке поверхностная микроструктура образуется в неравновесных условиях взаимодействия материала с высококонцентрированным потоком энергии и развивается по синергетическому алгоритму, которая по всем признакам относится к категории диссипативных структур.

Количественной оценкой неравновесности и диссипативной активности поверхностных структур является средняя плотность границ микро-

структурных объектов, характеризующая проводимость каналов диффузионного массопереноса и потенциальных барьеров для торможения носителей деформации при механическом нагружении материала.

Между средней плотностью границ, относительной плотностью "темных" микроструктурных объектов и микротвердостью поверхностного слоя, сформированного лазерным упрочнением, существует прямо пропорциональная зависимость.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н.** Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 537 с.
2. **Либенсон М.Н., Яковлев Е.Б., Шандыбина Г.Д.** Взаимодействие лазерного излучения с веществом (силовая оптика). Конспект лекций. Часть I. Поглощение лазерного излучения в веществе / под общ. ред. В.П. Вейко. СПб.: СПб ГУ ИТМО, 2008. 141 с.
3. **Чудина О.В.** Комбинированные методы поверхностного упрочнения с применением лазерного нагрева. Теория и технология. М.: МАДИ (ГТУ), 2003. 248 с.
4. **Брандон Д., Каплан У.** Микроструктура материалов. Методы исследования и контроля. М.: Техносфера, 2004. 384 с.
5. **Встовский Г.В., Колмаков А.Г., Бунин И.Ж.** Введение в мультифрактальную параметризацию структур материалов. Москва—Ижевск: НИЦ "Регулярная и хаотичная динамика". 2001. 116 с.
6. **Ким В.А., Белова И.В., Золоторева С.В.** Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т. 80. № 4. С. 43—46.
7. **Башков О.В., Ким В.А., Попкова А.А.** Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79. № 10. С. 34—40.
8. **Ким В.А., Башков О.В., Попкова А.А.** Основы количественной и компьютерной металлографии: учебное пособие. Комсомольск-на-Амуре: ФГБОУ ВПО "КнАГТУ", 2013. 132 с.
9. **Поверхностные** слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балахонов, А.В. Болеста, М.П. Бондарь и др. / отв. ред. В.Е. Панин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.
10. **Мирзоев Ф.Х., Панченко В.Я., Шелепин Л.А.** Лазерное управление процессами в твердом теле // Успехи физических наук. 1996. Т. 166. № 1. С. 3—32.

УДК 62-375.621.767 + 621.793

В.Н. Малышев *(РГУ нефти и газа (НИУ) имени И.М. Губкина),*
Д.В. Мироненко *(ООО "ПетроИнжиниринг", г. Москва)*
E-mail: vmal@inbox.ru

Повышение износостойкости модифицированных шаровых кранов

На основе сравнительного анализа упрочняющих технологий контактных поверхностей шаровых кранов выбрана прогрессивная технология упрочнения методом микродугового оксидирования, проведены стендовые испытания модифицированного и штатного шаровых кранов. Показано, что при работе в условиях содержания в рабочей среде абразивных частиц предложенный модифицированный шаровой кран имеет повышенную износостойкость и обеспечивает сохранение герметичности до 2500 циклов в режиме "открыт—закрыт".

Ключевые слова: *шаровой кран, методы упрочнения, микродуговое оксидирование, герметичность, испытания.*

The progressive strengthening technology of microarc oxidation is chosen on the basis of the comparative analysis of strengthening technologies of contact surfaces of ball valves. There are carried out bench tests of modified and standard ball valves. It is shown that when the operating in working environment with abrasive particles, the proposed modified ball valve has increased wear resistance and provides its tightness up to 2500 cycles in the "open—close" mode.

Keywords: *ball valve, strengthening methods, microarc oxidation, tightness, tests.*

Введение

Современное арматуростроение для нефтегазовой отрасли, теплоэнергетики, химической отрасли сталкивается с проблемами стойкости трубопроводных запорно-регулирующих устройств. Значительная потребность и стоимость ремонтно-восстановительных работ обуславливают необхо-

димость увеличения фактического срока службы и длительности межремонтного периода.

Наиболее прогрессивным видом запорной арматуры являются шаровые краны. Благодаря своим очевидным достоинствам (малое гидравлическое сопротивление, малое время срабатывания, минимальные массогабаритные характеристики, легкость в управлении) шаровые краны получают все большее распространение в промышленности, вытесняя с рынка традиционные виды арматуры — задвижки и клапаны [1—5].

Конструкция шаровых кранов известна уже более 100 лет, однако в ранних вариантах она не обеспечивала плотного перекрытия прохода среды металлическими поверхностями шаровой пробки и седел корпуса. Появление и внедрение в арматуростроение таких материалов, как фторопласты, синтетические каучуки для изготовления седел, привели к началу широкого применения шаровых кранов. Новые материалы позволили обеспечить плотность закрытия и существенно снизить усилия, необходимые для управления краном.

Тем не менее при использовании таких шаровых кранов в средах с содержанием механических частиц (абразивных и т.п.) герметичность данного узла может быть нарушена вследствие недостаточной износостойкости поверхности шара и седел. Для повышения их износостойкости используют различные упрочняющие технологии, в частности, гальваническое твердое хромирование шара, плазменное напыление или плазменную наплавку износостойкими материалами типа стеллит и т.д. [6, 7].

Одним из методов упрочнения поверхностей является метод микродугового оксидирования (МДО) [8], который относится к электрохимическому процессу окисления поверхностного слоя в сочетании с электроразрядными явлениями на границе анод—электролит. Микродуговое оксидирование позволяет получать многофункциональные керамикоподобные покрытия с уникальным комплексом свойств, в том числе износостойкие, коррозионно-стойкие, теплостойкие, электроизоляционные и декоративные покрытия, характеризующиеся высокими эксплуатационными показателями.

Цель работы — проведение сравнительных испытаний модифицированного и штатного шаровых кранов на стенде в режиме циклов "открыт—закрыт" для выявления их работоспособности, износостойкости и герметичности в условиях работы в средах с содержанием абразивных частиц.

Методы модифицирования контактных поверхностей

Из различных способов, улучшающих контактную поверхность шаровой пробки, наибольшее распространение в промышленности нашли гальваническое хромирование, плазменное напыление и плазменная наплавка износостойких материалов на поверхность шара.

Нанесение твердохромовых покрытий электролитическим способом требует дорогостоящего оборудования для обезвреживания отработанных растворов и промывочных вод. Кроме того, недостаточная адгезия хромового покрытия к основному металлу не обеспечивает надежной защиты от кавитационных и виброударных нагрузок.

Основные недостатки плазменных способов напыления и наплавки — высокая стоимость порошковых и наплавочных материалов, а также значительная неравномерность покрытий по толщине и высокая шероховатость поверхности (Rz = 20...40 мкм). Поэтому требуется проведение трудоемких финишных операций для обеспечения необходимой шероховатости упрочненного слоя и точности размеров деталей. Кроме того, стеллитовые наплавляемые покрытия обладают недостаточной микротвердостью и износостойкостью. Песчинки кварца, содержащиеся в механических примесях перекачиваемых сред, имеют микротвердость 1000...1100 HV, что позволяет им легко процарапывать более мягкие покрытия. Трудоемка также финишная обработка, вследствие чего трудно достичь герметичности класса А (ГОСТ 54808—2011).

Суть метода МДО заключается в формировании на поверхности детали в условиях воздействия микродуговых разрядов высокопрочного износостойкого покрытия (МДО-покрытия), состоящего преимущественно из Al_2O_3 (и его высокотвердой фазы — α-Al_2O_3—корунда) и других оксидов алюминия [9, 10]. Износостойкость покрытия определяется комплексом характеристик, главными из которых являются его твердость покрытия и прочность сцепления с основой. По износостойкости МДО-покрытия близки к твердым сплавам. Сравнительные испытания на абразивный износ МДО-покрытий и анодных покрытий толщиной 100 мкм показали лишь незначительное (3...5 мкм) уменьшение толщины МДО-покрытия, в то время как покрытие, нанесенное методом твердого анодирования, было удалено полностью [11].

Сравнительный анализ различных методов нанесения покрытий на контактные поверхности приведен в табл. 1.

Таблица 1

Анализ методов упрочнения

Технология упрочнения	Материал	Характеристики покрытия			
		Толщина, мкм	Микро-твердость, HV	Прочность сцепления с основным металлом, МПа	Толщина удаляемого припуска, мкм
Хромирование гальваническое	Твердый хром	25...45	800...1100	20...40	10...20
Плазменное напыление	Карбиды вольфрама, кобальт	300...400	900...1200	80...130	100...200
Плазменная наплавка стеллитом	Стеллит (кобальт, хром, вольфрам)	2000...3000	600...700	200...250	500...1000
МДО	Оксиды алюминия	50...70	1200...1500	200...250	30...40

Основной причиной выхода из строя шарового крана является потеря герметичности, т.е. способности арматуры и отдельных ее элементов и соединений препятствовать газовому или жидкостному обмену между разделенными полостями [12].

Потеря герметичности связана с нарушением формы трущихся поверхностей в результате изнашивания. Основные виды изнашивания шаровых кранов — гидро- или газоабразивное изнашивание. Твердые частицы, контактируя с поверхностью седла или шара, образуют риски (царапины), приводящие к потере герметичности. Для того, чтобы увеличить работоспособность крана, необходимо создать пару трения, стойкую к данному виду изнашивания.

МДО-покрытие обладает высокой микротвердостью (до 16...22 ГПа) [9, 11], превосходя твердость частиц, которые могут находиться в рабочей среде. Создание пары трения "металл—металл" значительно расширяет область применения данных шаровых кранов. Формирование покрытия на шаре и седле с небольшим припуском на механическую обработку облегчает финишную притирку и позволяет достигать герметичности класса А. Шаровой кран с МДО-покрытием можно применять для перекачивания высокотемпературных и высококоррозионных сред. МДО-покрытие не теряет своих свойств при нагреве до 450 °С и нейтрально к большинству агрессивных веществ. На рис. 1 представлены детали шарового крана, выполненные из алюминиевого сплава Д16Т (2024), до и после обработки МДО и последующей притирки.

а) *б)*

Рис. 1. Шар и седла до (*а*) и после (*б*) обработки МДО и притирки

Разработка стенда и методики проведения испытаний

Испытания запорной арматуры выполняют для оценки ее свойств и уровня качества. Для проведения испытаний модифицированного шарового крана с упрочненными методом МДО поверхностями контакта был разработан стенд (рис. 2), имеющий технические характеристики, указанные ниже.

Максимальное давление рабочей среды, МПа 4,0
Рабочее давление воздуха, МПа 0,6
Мощность двигателя, кВт 0,6
Объем системы, см^3. 600
Время срабатывания одного цикла, с 15
Присоединительный размер испытуемого крана, дюйм . .3/4
Длина × ширина × высота, мм . . . . . .600 × 300 × 950
Снаряженная масса, кг 30

Для проведения испытаний на потерю герметичности при введении в перекачиваемую среду абразивных частиц была разработана методика испытаний в соответствии с требованиями норм герметичности трубопроводной арматуры [13, 14].

Допускается задавать норму герметичности затвора числом капель воды либо пузырьков воздуха. Допустимое число капель воды $N_{воды}$ (пузырьков воздуха $N_{возд}$) в зависимости от внутреннего диаметра

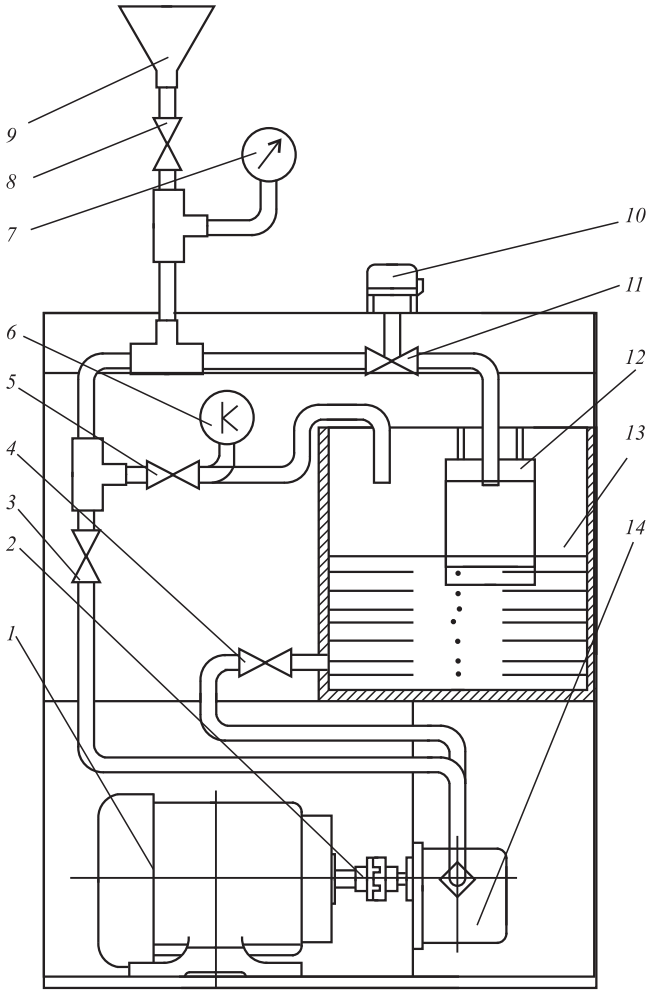


Рис. 2. Конструкция испытательного стенда:
1 — электродвигатель; *2* — муфта; *3*, *4*, *5*, *8* — шаровой кран; *6* — компрессорная линия; *7* — манометр; *9* — воронка; *10* — электропривод; *11* — испытуемый кран; *12* — фильтр; *13* — емкость для рабочей среды; *14* — насос

насадки, подсоединенной к выходному патрубку арматуры, вычисляют по формулам:

$$N_{воды} = Q_{воды}/V_{кап}, \quad (1)$$

где $Q_{воды}$ — норма герметичности затвора по воде; $V_{кап}$ — объем капли воды в зависимости от внутреннего диаметра насадки в соответствии с ГОСТ 53402—2009;

$$N_{возд} = Q_{возд}/V_{пуз}, \quad (2)$$

где $Q_{возд}$ — норма герметичности затвора по воздуху; $V_{пуз}$ — объем пузырька воздуха в зависимости от внутреннего диаметра насадки в соответствии с ГОСТ 53402—2009.

Таблица 2

Порядок проведения испытаний

Стадия	Суммарная наработка циклов	Добавление абразива, г	Стадия	Суммарная наработка циклов	Добавление абразива, г
1	100	0,5	14	1400	2
2	200		15	1500	
3	300		16	1600	
4	400		17	1700	
5	500		18	1800	
6	600		19	1900	
7	700		20	2000	
8	800		21	2100	
9	900		22	2200	
10	1000		23	2300	
11	1100	2	24	2400	
12	1200		25	2500	
13	1300		26	2600	
Примечание. Стадия состоит из 100 циклов.					

Методика испытаний на герметичность состоит из следующей последовательности действий:

— подключают компрессор;

— на пробку закрытого крана подают воздух давлением 0,6 МПа;

— на выходе из крана подсоединяют трубку, на конце которой находится насадка с отверстием диаметром 3 мм;

— конец этой трубки с насадкой опускают в емкость с водой для подсчета пузырьков;

— после выдержки 1 мин засекают время и проводят подсчет вышедших из насадки пузырьков в течение 1 мин (объем одного пузырька составляет $V = 14{,}13$ мм^3);

— количество утечки воздуха заносят в журнал.

Порядок проведения испытаний указан в табл. 2, а условия испытаний — ниже.

Рабочий перепад давления, МПа 1,6
Рабочая среда . . . . . Масло марки М8Б1
Абразив . . . . . Кварцевый песок
Размер абразива, мкм . . . . . До 100
Проверка герметичности . . . . . Каждые 500 циклов
Время одного цикла, с. 15

Результаты испытаний и выводы

В результате проведенных испытаний на стенде установлено, что модифицирование контакт-

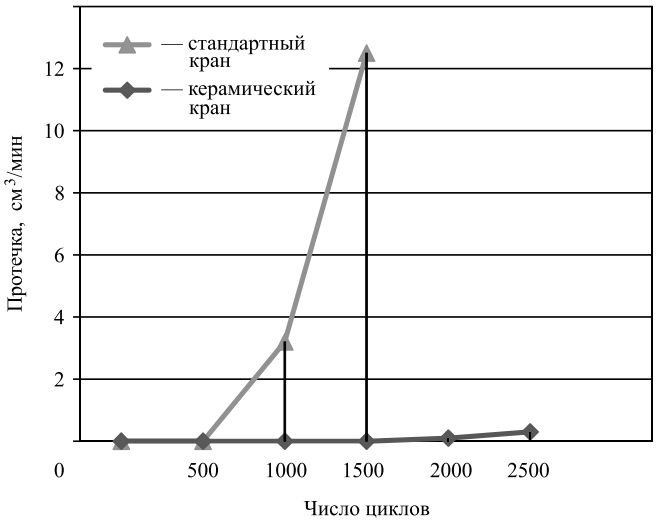


Рис. 3. Зависимость протечки от наработки испытуемых кранов

ной поверхности шарового крана и седел методом микродугового оксидирования приводит к существенному (более чем в 10 раз) повышению износостойкости данного узла в условиях работы с абразивными частицами, по сравнению со штатным шаровым краном, выполненным из стали с твердым хромовым покрытием и фторопластовыми седлами (рис. 3).

Таким образом, шаровой кран с МДО-покрытием хорошо показал себя в условиях работы с интенсивным абразивным изнашиванием, по сравнению со штатным хромированным шаровым краном, способен работать в условиях повышенных температур и агрессивных сред, обеспечивает быструю финишную обработку (притирку) за счет верхнего более мягкого пористого слоя и значительно расширяет диапазон применения шаровых кранов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **ГОСТ 21345—78.** Краны шаровые.
2. **ГОСТ 9702—87.** Краны конусные и шаровые. Основные параметры.
3. **ГОСТ 53402—2009.** Арматура трубопроводная. Методы контроля и испытаний.
4. **Гуревич А.Ф.** Расчет и конструирование трубопроводной арматуры. Л.: Машиностроение, 1968.
5. **СТО** Газпром 2-4.1-212—2008.
6. **Елинек Т.В.** Успехи гальванотехники. Обзор мировой литературы за 1990—1991 гг. // Гальванотехника и обработка поверхности. 1992. Т. 1. № 3—4. С. 7—26.
7. **Кадырметов А.М., Сушков С.И., Никонов В.О.** Технологические перспективы и возможности процессов плазменного нанесения и упрочнения покрытий // Строительные и дорожные машины. 2013. № 7. С. 25—33.
8. **Микродуговое** оксидирование. Наука и человечество — альманах / под ред. А.А. Логунова. М.: Знание, 1981. 341 с.
9. **Малышев В.Н., Марков Г.А., Федоров В.А., Петросянц А.А.** Особенности строения и свойства покрытий, наносимых методом микродугового оксидирования // Химическое и нефтяное машиностроение. 1984. № 1. С. 26.
10. **Влияние** поверхностной обработки сплава Д16Т методом МДО и его прочностные характеристики при статическом нагружении / В.С. Александров, А.Г. Кан и др. // Химическое и нефтяное машиностроение. 1988. № 9. С. 27—28.
11. **Физико-механические** характеристики и износостойкость покрытий, нанесенных методом микродугового оксидирования / В.Н. Малышев, С.И. Булычев, Г.А. Марков и др. // Физика и химия обработки материалов. 1985. № 1. С. 82—87.
12. **ГОСТ 24856—2014.** Арматура трубопроводная.
13. **РД 26-07-263—86.** Методические указания. Типовая методика испытаний трубопроводной арматуры на прочность и плотность материала деталей и сварных швов.
14. **ГОСТ Р 56006—2014.** Арматура трубопроводная. Испытания и приемка на объектах магистральных газопроводов перед вводом их в эксплуатацию. Общие технические требования.

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

Получение электролитического сплава олово—никель—бор

Рассмотрен способ получения и свойства сплава на основе никеля. Разработан электролит для нанесения сплава олово—никель—бор. Исследовано влияние режимов электролиза и состава электролита на физико-механические свойства (микротвердость, коэффициент растекания припоя, переходное электрическое сопротивление, способность покрытия к перепайке, внутренние напряжения, пористость, сцепление, коррозионная стойкость) электролитического покрытия на основе сплава олово—никель—бор, осажденного из хлоридно-цитратного электролита. Показана возможность использования гальванических осадков олово—никель—бор на электроконтактных разъемах в радиоэлектронной промышленности и приборостроении в качестве паяемого покрытия взамен драгоценных металлов.

Ключевые слова: *сплав, олово—никель—бор, микротвердость, паяемость, коэффициент растекания, переходное сопротивление, пористость, сцепление, покрытие, свойства, электроосаждение.*

The preparation method and properties of the nickel-based alloy are discussed. Electrolyte for the deposition of tin—nickel—boron alloy is developed. The influence of electrolysis modes and electrolyte composition on the physical and mechanical properties (microhardness, solder spreading coefficient, transient electrical resistance, soldering ability of the coating, internal stresses, porosity, adhesion, corrosion resistance) of electrolytic coating based on tin—nickel—boron alloy precipitated from chloride-citrate electrolyte is studied. The possibility of using of tin—nickel—boron galvanic deposits on electrocontact connectors in the radioelectronic industry and instrument-making as brazed coating instead of precious metals is shown.

Keywords: *alloy, tin—nickel—boron, microhardness, solderability, spreading coefficient, contact resistance, porosity, adhesion, coating, properties, electrodeposition.*

Введение

Золото как материал для функциональных покрытий широко применяется в современной радиоэлектронной технике и приборостроении, несмотря на свою высокую стоимость. Это объясняется его уникальной коррозионной стойкостью, высокими значениями электро- и теплопроводности. По сравнению с другими благородными металлами золото в наибольшей степени отвечает нуждам и требованиям электроники и других отраслей современной техники. Применяют его главным образом там, где изделия должны работать в течение длительного времени, сохраняя надежность и работоспособность. В настоящее время золотые покрытия считаются самыми надежными из всех покрытий благородными металлами, например, в контактных узлах, преимущественно слаботочных и малонагруженных [1], а также в производстве печатных плат и т.д.

В электронной промышленности, например, нанесение электролитических покрытий драгоценными металлами проводится, как правило, только на прецизионные изделия в связи с высокой стоимостью и дефицитом драгоценных компонентов.

Отмечается, что повышение надежности, долговечности и воспроизводимости гальванических процессов может способствовать их более широкому внедрению в электронную промышленность [2].

Высокая цена, дефицит благородных металлов как материала для электрических контактов ограничивают их использование в этих областях. Кроме того, растет тенденция замены частей электронного оборудования, так как легче и дешевле заменить, чем починить. Поэтому срок службы

оборудования становится короче, а необходимость материалов для электрических контактов, имеющих малую стоимость, — все больше и больше. И хотя стоимость благородного металла может составлять только малую часть стоимости соединителя, для продукции, производимой в больших объемах, экономия может быть значительной [3].

Наиболее перспективными материалами для замены золота в некоторых областях уже несколько десятилетий считаются сплавы никеля, в частности никель—фосфор и никель—бор.

Применение сплава никель—фосфор вместо золота ограничивается сплавами с низким содержанием фосфора. В этом случае сохраняется низкое переходное сопротивление (2...7 мОм) после нескольких типов ускоренных коррозионных испытаний. Однако пластичность сплава никель—фосфор хуже, чем никеля или твердого золота.

Особенный интерес представляет гальваническое нанесение сплава никеля с бором. Удельное электрическое сопротивление покрытий сплавом — 20 мкОм·см, переходное электрическое сопротивление — 8 мОм, что сравнимо со значением для золотых покрытий (5 мОм) [4]. Авторы делают вывод о перспективности указанных покрытий для частичной или полной замены драгоценных металлов в контактных устройствах.

Преимущества сплава никель—бор по сравнению со сплавом никель—фосфор: более высокая эвтектическая температура, улучшенная паяемость, высокая твердость и износостойкость, возможность осаждения покрытий при более низких температурах и получение аморфных систем.

Характерными особенностями покрытий сплавом никель—бор являются: высокая паяемость сплавом ПОС-61 с неактивными спиртово-канифольными флюсами из-за наличия в покрытии бора, частично выполняющего на границе раздела фаз роль флюсующего агента, высокая коррозийная устойчивость к воздействию кислорода воздуха при высокой температуре (300...400 °С). После термообработки при температуре 400 °С, когда образуются химические соединения никеля с бором типа Ni_3B и Ni_2B, паяемость покрытий сплавом повышается [5].

Сведения о химическом нанесении сплава обобщены в обзоре [6] и развиты в работе [7] и других современных исследованиях. В связи с известными недостатками способа химического осаждения предложены способы гальванического нанесения этого сплава [8, 9].

Функциональные свойства покрытий сплавом никель—бор зависят от их структуры, и это делает необходимым их дальнейшее изучение и уточнение для того, чтобы целенаправленно создавать необходимые покрытия при электроосаждении.

Покрытие сплавом олово—никель нашло применение для защитно-декоративной отделки медных и омедненных стальных изделий, в качестве заключительного покрытия на печатных схемах вместо серебрения и палладирования, для покрытия паяемых электрических контактов, в качестве подслоя под золото.

Разработка пластичных гальванических покрытий сплавом никель—олово дает возможность экономить золото. Известны электролиты для нанесения сплава никель—олово [10—13]. Сплав при электроосаждении может образовать гексагональную решетку, затрудняющую взаимную диффузию меди и золота, сочетать высокую коррозионную стойкость обоих металлов с хорошей паяемостью олова, сохраняющейся во времени.

Однако сплавы никель—олово, осажденные из выше приведенных электролитов, имеют недостаточную паяемость.

Цель работы — дальнейшее совершенствование технологии электроосаждения сплавов на основе сплава олово—никель, обеспечивающих высокую паяемость, и определение возможности применения гальванопокрытий олово—никель—бор на электроконтактных разъемах радиоэлектронных устройств взамен драгоценных металлов.

Методика эксперимента

Электролиты готовили из реактивов марок х.ч. и ч.д.а. на дистиллированной воде. Сплав осаждали на детали из меди марки М1, латуни марки Л63 площадью 0,0025; 0,01 дм^2 в ячейках объемом 25 мл, без диафрагмы и герметизации. Предварительную подготовку поверхности образцов проводили по известным методикам [14].

Выход по току гальванических покрытий определяли гравиметрическим методом.

Микротвердосгь покрытий измеряли с помощью микротвердомера ПМТ-3 при нагрузках на индентор 0,196...0,245 Н (20...25 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, а время опускания и подъема индентора не менее 15 с.

Пористость покрытий, осажденных на медь и ее сплавы, определяли методом наложения фильтровальной бумаги по ГОСТ 9.302—88 на образцах размерами 15×15×1 мм.

Прочность сцепления покрытий с основой определяли методом неоднократного изгиба по-

крытого образца на 90° до полного излома по ГОСТ 9.302—88. Размеры образца 25×5×1 мм, толщина покрытия 20 мкм.

Удельное и переходное электрическое сопротивление измеряли цифровым вольтметром 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 проволоки диаметром 0,1 мм и длиной около 200 мм.

Переходное электрическое сопротивление покрытий определяли по методике [15—17] при нагрузках на точечный контакт 0,049; 0,245; 0,490; 0,981 Н (5; 25; 50; 100 гс) и силе тока 20; 50; 100; 250 мА.

Расчет удельного электрического сопротивления осуществляли по методике [15—17]. Сопротивление гальванического покрытия измеряли без отделения от основы. При этом способе проводили два измерения: измерение электросопротивления основы без покрытия и суммарного сопротивления основы с покрытием.

Сопротивление покрытия вычисляли по формуле:

$$R_x = \frac{\pi R'_x R''(d_1^2 - d_0^2)}{4(R'' - R'_x)l},$$

где R'_x — суммарное сопротивление основы и покрытия, Ом; R'' — сопротивление основы, Ом; d_1 — диаметр проволоки с покрытием, мм; d_0 — диаметр проволоки, мм; l — длина проволоки, мм.

Внутренние напряжения покрытия определяли по методике [18], используя гибкий горизонтально расположенный катод. Испытываемый медный катод размерами 35×10×0,05 мм перед измерениями покрывали с одной стороны полихлорвиниловым лаком и для удобства измерения отклонений к подвижному концу катода приклеивали вольфрамовую проволоку диаметром 10 мкм, отклонение катода от первоначального положения фиксировали микроскопом МИР-2. Расчет внутренних напряжений проводили по формуле:

$$B_н = \frac{Ed^2 z}{3\delta l^2},$$

где E — модуль упругости материала основы, МПа [19]; d — толщина катода, м; z — прогиб катода на конце, м; δ — толщина покрытия, м; l — длина покрываемой части катода, м.

Для изучения внешнего вида покрытий в качестве оптической системы применяли микроскоп МИМ-7 при увеличениях 129; 216; 367,5 и 487,5.

Стабильность электролита определяли по сохранению свойств электролита и покрытий, выпадению осадка после хранения в течение 3 месяцев и примерно 100...150 А·ч/л работы электролита.

Результаты эксперимента и их обсуждение

При разработке электролита для нанесения паяемого сплава олово—никель—бор использовали хлоридный электролит для электроосаждения сплава никель—бор [20]. Для выбора оптимального состава электролита для нанесения сплава олово—никель—бор и определения оптимального режима электролиза использовали метод математического планирования экстремального эксперимента.

Ионы олова (II) термодинамически неустойчивы в водных растворах и при отсутствии достаточного количества свободной кислоты подвергаются как окислению, так и гидролизу. Даже в присутствии поверхностно-активных веществ в электролите на основе олова (II) осадки получаются плохого качества. Накопление четырехвалентного олова может привести к замедлению процесса и улучшению качества осадка.

Известно, что гидроксиды олова (IV) легко образуют коллоидные и микрогетерогенные соединения в растворе. Если создать условия для того, чтобы они в растворах не укрупнялись и не коагулировали и придать коллоидным и микрогетерогенным соединениям положительный заряд, то они или основные соли смогут разряжаться на катоде, не ухудшая качество осадка, а возможно, приводя к интенсификации процесса [20]. Величина pH начала гидратообразования для олова (IV) составляет около 0, а для олова (II) — около 2.

Для получения сплава олово—никель—бор использовали хлорид олова (IV). Если выбрать для электроосаждения сплава достаточно кислый раствор с pH около 1,0, то на катоде совместно с ионами металлов будет разряжаться водород. Это приведет к подщелачиванию прикатодного пространства и созданию условий для образования коллоидных и микрогетерогенных соединений гидроксидов металлов, в первую очередь гидроксидов олова. Начало осаждения микрогетерогенных соединений гидроксидов никеля из растворов хлоридов соответствует более высоким значениям pH = 1,5...2,5.

Поэтому для осаждения паяемых сплавов был предложен электролит состава: хлорид никеля шестиводный, хлорид олова (IV) пятиводный, цитрат натрия, борная кислота, декагидроборат натрия (ТУ 6-02-1-513—86). Цитрат натрия вводили в электролит как стабилизатор коллоидных и микрогете-

рогенных соединений. Из этого электролита были получены при 1 А/дм^2, pH = 0,4 и температуре 60 °С равномерные матовые покрытия.

Для оптимизации паяемого сплава применяли метод крутого восхождения Бокса—Уилсона.

В целях сохранения одинаковых условий электролит с момента приготовления до начала осаждения покрытия выдерживали в течение суток, так как состав и устойчивость микрогетерогенных соединений зависят от способа приготовления, был выбран один и тот же порядок приготовления электролита: в раствор хлорида никеля при перемешивании вводили порошкообразный цитрат натрия, затем растворенную в горячей воде борную кислоту и, в последнюю очередь, раствор хлорида олова (IV) и добавляли боросодержащую добавку. В момент приготовления pH раствора равен примерно 1,5...1,7. До рабочего значения pH доводили соляной кислотой.

Параметром оптимизации выбрано значение коэффициента растекания припоя $K_р$ на покрытии. На основании наибольшего значения $K_р$ для исследований выбран электролит состава, г/л: хлорид никеля шестиводный — 200; хлорид олова (IV) пятиводный — 60; борная кислота — 30; цитрат натрия — 100; декагидроборат натрия — 1 (электролит основного состава). Электроосаждение вели при pH = 0,7, температуре 25 °С и катодной плотности тока 0,5...1,0 А/дм^2.

Исследована зависимость $K_р$ и состава сплава от температуры и катодной плотности тока в электролите основного состава при pH = 0,7, результаты которых приведены в табл. 1. Из анализа таблицы следует, что с повышением температуры электролиза $K_р$ существенно снижается. Аналогичная зависимость наблюдается с уменьшением катодной плотности тока. Качество покрытия при увеличении температуры и катодной плотности тока улучшается. Это, по-видимому, связано с тем, что с повышением катодной плотности тока и температуры электролита содержание никеля и бора в сплаве увеличивается.

Для улучшения внешнего вида покрытий при сохранении паяемости предлагается использовать катионактивное органическое соединение, которое при температуре, близкой к температуре пайки, может разлагаться с образованием соляной кислоты. При этом ПАВ, адсорбируясь на отрицательно заряженной поверхности сплава и отчасти включаясь в него, не должны существенно снижать паяемость.

Введение в хлоридно-цитратный электролит 0,5...1,0 г/л о-толуидина солянокислого (ОТС) позволило получить полублестящие равномерные, хорошо сцепленные с основой покрытия при pH = 0,7 и температуре 25 °С в диапазоне катодных плотностей тока 0,5...1,5 А/дм^2. Содержание никеля в сплаве составляет 22,0...23,5 % мас., а бора 0,5...1,1 % мас.

Коэффициент $K_р$ на покрытии в рабочем диапазоне плотностей тока равен 5,3...6,1 (табл. 2). Из таблицы видно, что увеличение содержания добавки от 0,5 до 1 г/л почти не изменяет значение $K_р$. Покрытия плотные, хорошо сцепленные с поверхностью. Содержание никеля в них составляет 22...25 %. Введение 5 г/л добавки ОТС снижает паяемость ($K_р$ находится в пределах 1,6...1,8). Покрытия матовые серые при 0,5...1,0 А/дм^2. Повышение температуры до 55 °С позволяет увеличить паяемость при 1 А/дм^2 ($K_р$ = 6,2).

Таблица 1

Зависимость коэффициента растекания припоя и состава сплава от температуры и катодной плотности тока

Температура, °С	Катодная плотность тока, А/дм^2	$K_р$
25	1,00	6,7
	0,75	6,6
	0,50	1,3
50	1,00	2,9
	0,75	2,4
	0,50	1,2

Таблица 2

Зависимость коэффициента растекания припоя на покрытии, полученном из цитратного электролита основного состава от температуры, содержания добавки ОТС и катодной плотности тока

Содержание ОТС, г/л	Температура электролита, °С	Катодная плотность тока, А/дм^2	$K_р$
0,5	25	0,50	6,0
		0,75	6,0
		1,00	6,2
		1,50	5,8
		2,00	6,0
1,0	25	0,5	5,8
		1,0	5,8
		1,5	5,6
		2,0	5,3

Покрытия сплавом олово—никель—бор, полученные при 0,5...1,5 А/дм^2 из электролита основного состава с добавкой 0,5 г/л ОТС при pH = 0,7 и температуре 25 °С, имеют микротвердость 2100...2350 МПа.

Изменение переходного электрического сопротивления для системы покрытий 3 мкм изучаемого сплава, 0,3 мкм золота в паре с такой же системой в зависимости от нагрузки до и после обработки при температуре 70 °С в течение 6 ч представлено в табл. 3.

Таблица 3

Зависимость переходного электрического сопротивления для систем покрытий 3 мкм сплава олово—никель—бор — 0,3 мкм золота от нагрузки до $R_п$ и после $R_{п1}$ температурной обработки

Нагрузка, Н (гс)	0,147 (15)	0,245 (25)	0,490 (50)	0,981 (100)
$R_п$, мОм	45	39	30	15
$R_{п1}$, мОм	57	49	41	25

Выход по току сплава олово—никель—бор при катодной плотности тока 0,5...1,5 А/дм^2 составляет 91...98 %. Сцепление электролитического покрытия олово—никель—бор удовлетворяет ГОСТ 9.301—88.

Заключение

Разработан электролит для нанесения сплава олово—никель—бор.

Исследованы физико-механические свойства сплава олово—никель—бор и показана возможность использования сплава в электронной промышленности и приборостроении в качестве паяемого покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Груев И.Д., Матвеев Н.И., Сергеева Н.Г.** Гальваническое золочение, серебрение и палладирование в производстве радиоэлектронной аппаратуры. М.: Радио и связь, 1981. 144 с.
2. **Новые** пути развития гальванотехники // Гальванотехник. 1987. № 3. С. 642—648.
3. **Holden C.A., Law H.H., Mattil C.A., Sapjeta J.** Nickel-phosphorus alloy a low-cost electrical contact material // Plating and Surface Finishing 1989. № 4. P. 58—61.
4. **Ivanov M.N., Crutskih V.M.** Химически осажденные борсодержащие никелевые покрытия как новый вид электроконтактных материалов // 31 Int Wiss. Kolloq., Ilmenau, 27—30 Oct. Ilmenau, 1986. P. 117—120.
5. **Флеров В.Н.** Химическая технология в производстве радиоэлектронных деталей. М.: Радио и связь, 1988. С. 83—84.
6. **Горбунова К.И., Иванов И.В.** Об основных областях применения и своеобразии строения химически осажденных покрытий // Журн. Всес. хим. о-ва. 1988. № 2. С. 157—164.
7. **Химическое** осаждение никель-борных покрытий взамен драгоценных металлов / А.И. Косов, Ю.В. Прусов, В.Ф. Макаров и др. Пенза: ПДНТП, 1986. С. 79—80.
8. **Электрохимические** покрытия никелем с малым содержанием бора для корпусов полупроводниковых приборов / А.Г. Ерусалимчик, Т.Г. Комарова, В.С. Баранова и др. // Электронная техника: Полупроводниковые приборы. ЦНИИ "Электроника". 1981. Сер. 2. Вып. 2. С. 72—74.
9. **Исследование** переходного сопротивления покрытий из сплава никель—бор / В.А. Дягилев, Е.И. Рябов и др. // Электронная техника: Полупроводниковые приборы / ЦНИИ "Электроника". 1987. Сер. 7. Вып. 1. С. 31—32.
10. **Sato T., Matsui Y., Murakawa K., Henmi Z.** Sliding properties of contacts plated with nickel // Plating and Surface Finishing. 1983. № 8. P. 47—48.
11. **Яшечкин Л.А., Постина С.К., Кисель Р.Х.** Применение электролитического сплава олово—никель для покрытия контактных поверхностей // Электротехническая промышленность. 1984. № 2. С. 16—17.
12. **Пат. 74540 (СРР).** Электролит для осаждения покрытий из сплава олово—никель / В.В. Гурылев, Е.И. Егорова, Л.Н. Симонова. № 2773223; заявл. 28.05.79; опубл. 28.02.81.
13. **А. с. 808563 СССР, МКИ С 25 Д 3/60.** Электролит для осаждения покрытий из сплава олово—никель / В.В. Гурылев, Е.И. Егорова, Л.Н. Симонова. № 2773223/22-02; заявл. 28.05.79; опубл. 28.02.81, Бюл. № 8. 3 с.
14. **Ямпольский А.М., Ильин В.А.** Краткий справочник гальванотехника. Л.: Машиностроение, 1981. 269 с.
15. **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.
16. **Круглова Е.Г., Вячеславов П.М.** Контроль гальванических ванн и покрытий. М.—Л.: Машгиз, 1961. 148 с.
17. **Мельников П.С.** Справочник по гальванопокрытиям в машиностроении. М.: Машиностроение, 1979. 296 с.
18. **Поперека М.Я.** Внутренние напряжения электролитически осаждаемых металлов. Новосибирск: Научно-сибирское книжное издательство, 1966. 336 с.
19. **Кошкин Н.И., Ширкевич М.Г.** Справочник по элементарной физике. М.: Наука, 1980. 208 с.
20. **Кудрявцева И.Д., Кукоз Ф.И., Балакай В.И.** Электроосаждение металлов из электролитов-коллоидов // Итоги науки и техники. М.: ВИНИТИ, 1990. Т. 33. С. 50—85.

УДК 621.785.532

В.А. Александров, О.В. Чудина, Б.А. Кудряшов
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет)
E-mail: Chudina_madi@mail.ru

Поверхностное упрочнение чугунов термодиффузионным легированием с последующим азотированием

Работа посвящена поверхностному упрочнению деталей гидромашин, работающих в условиях гидроабразивного изнашивания. Предложена технология поверхностного упрочнения серого чугуна, заключающаяся в поверхностном термодиффузионном легировании Al, Ti, Si и Cr с последующим азотированием. Показано, что максимальное повышение микротвердости до 1650 HV достигается при азотировании чугуна, предварительно легированного титаном, и до 1250 HV — алюминием и кремнием. Установлено, что в зависимости от типа насыщающего элемента износостойкость упрочненного слоя повышается в 1,5...3 раза по сравнению с неупрочненной поверхностью чугуна СЧ 28-48. Максимальную устойчивость поверхности чугуна к гидроабразивному износу обеспечивает легирование титаном с последующим азотированием, несколько ниже показатели стойкости имеют покрытия, полученные предварительным легированием алюминием, кремнием и хромом.

Ключевые слова: *поверхностное упрочнение, термодиффузионное легирование, азотирование, микротвердость, микроструктура, износостойкость, гидроабразивное изнашивание.*

Article is devoted to surface hardening of parts of the hydrocars which work in the conditions of hydroabrasive wear. The technology of surface hardening of grey cast iron consisting in surface thermal diffusion alloying by Al, Ti, Si and Cr with the subsequent nitriding is offered. It is shown that the maximum increasing of microhardness up to 1650 HV is reached by nitriding the cast iron which is previously alloyed by the titan and up to 1250 HV — by aluminum and silicon. It is established that in depending on type of the alloying element the wear resistance of the strengthened layer increases in 1.5...3 times in comparison with not strengthened surface of SCh 28-48 cast iron. The maximum resistance of the surface of cast iron to hydroabrasive wear provides alloying with titanium followed by nitriding, slightly lower resistance indicators have coatings obtained by pre-alloying with aluminum, silicon and chromium.

Keywords: *surface hardening, thermal diffusion alloying, nitriding, microhardness, microstructure, wear resistance, hydroabrasive wear.*

Введение

В различных отраслях промышленности используются гидромашины для транспортировки взвешенных веществ.

В настоящее время стоимость транспортировки единицы объема гидроабразивных веществ довольно высока. Детали насосов, перекачивающих абразивные жидкости, в результате эрозионного износа выходят из строя после нескольких месяцев эксплуатации. Это объясняется, главным образом, тем, что рабочие органы насосов изготовляются из материалов, имеющих низкую эрозионную прочность, вследствие чего они быстро разрушаются и выходят из строя. Ремонт и замена их вызывают простой оборудования и требуют больших затрат на материалы, монтаж и обслуживание. Наибольшей гидроэрозии в гидромашинах подвергаются статор и рабочее колесо насоса, проточная часть колеса и отвода, наружные поверхности дисков колес, примыкающие к ним поверхности крышек или корпуса и щелевые уплотнения, расположенные на всасывающей стороне насоса.

В рабочих органах насосных ступеней погружных центробежных насосов эрозия металла возникает в результате воздействия кавитации, которая усиливается в загрязненном потоке воды осо-

бенно в присутствии твердых частиц с большим удельным весом.

Различие удельного веса воды и твердых частиц, а также различие в скоростях их движения приводит к тому, что перед каждой частицей, движущейся в потоке, возникают вихри. Образование таких вихрей обусловлено обтеканием взвешенных частиц потоком воды. Отставание частиц от жидкости тем больше, чем они крупнее и тяжелее. Разная скорость движения частиц приводит к непрерывному хаотическому их соударению, что способствует увеличению нестационарности потока и образованию кавитационных пузырьков. Ударное воздействие потока одновременно сопровождается ударами и трением твердых частиц о поверхность детали, создавая условия для выламывания кусочков металла [1].

Детали насосов гидромашин нередко разрушаются от абразивного воздействия движущихся в потоке частиц, а при больших скоростях потока и сама жидкость оказывает на металл сильное разрушающее действие вследствие развития кавитации. На рис. 1 представлена поверхность рабочего колеса насоса, выполненного из чугуна СЧ 28-48 с характерными разрушениями, возникающими в процессе эксплуатации.

Применение дорогостоящих коррозионностойких сталей для изготовления деталей проточной части насосов несколько увеличивает срок их службы, но эрозионный износ деталей остается значительным.

В настоящее время ведется изыскание эрозионно-стойких материалов и конструктивных решений для проточной части колеса и отвода, при которых износ был бы наименьшим. Однако практика эксплуатации гидромашин показала, что конструктивные методы борьбы с эрозионным износом не дают положительных результатов. Очевидно, решение проблемы лежит в плоскости рационального выбора материала и эффективной упрочняющей обработки для повышения стойкости против гидроабразивного изнашивания путем целенаправленного формирования структурного состояния поверхностного слоя с высокой твердостью и коррозионной стойкостью.

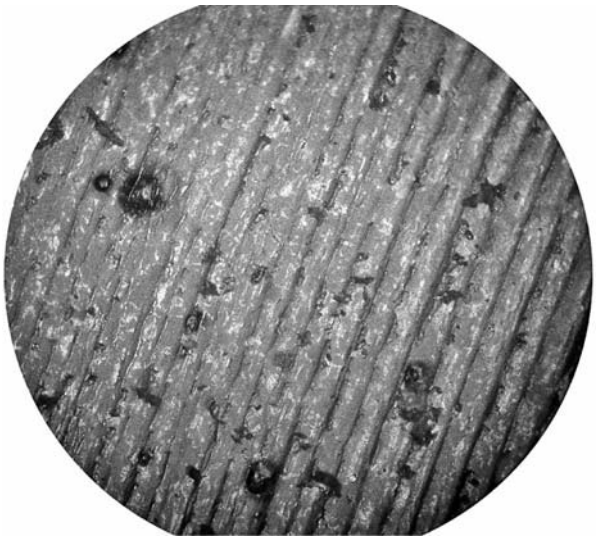


Рис. 1. Характерные разрушения поверхности рабочего колеса насоса, выполненного из чугуна СЧ 28-48

В настоящее время для поверхностного упрочнения металлов и сплавов широко применяется химико-термическая обработка, в частности азотирование или нитроцементация преимущественно для легированных сталей, в результате которой на поверхности изделия формируется структура легированных нитридов или карбонитридов железа, обладающих высокой твердостью, устойчивых к износу и коррозии [2].

В целях рационального использования дорогостоящих легирующих элементов и снижения себестоимости продукции при сохранении, а в некоторых случаях и существенном повышении эксплуатационных свойств, в работах [3—8] исследована возможность поверхностного легирования сталей и сплавов различными методами с последующим азотированием. Показано, что комбинированные способы поверхностного упрочнения позволяют значительно повысить поверхностную твердость, прочность и способность конструкционных сталей сопротивляться износу и коррозии. Подобные исследования для чугунов ранее не проводились, в связи с этим актуальным является изучение влияния термодиффузионного насыщения поверхности легирующими элементами с последующим азотированием на структуру и свойства серого чугуна.

Материалы и методика проведения эксперимента

Упрочнению подвергали образцы и детали из серого чугуна СЧ 28-48 (2,8... 3,1 % C; 1,1...1,5 % Si; 0,8...1,2 % Mn; < 0,2 % P; < 0,3 % Cr) по технологии, заключающейся в термодиффузионной металлизации поверхности алюминием, титаном, кремнием и хромом и последующем азотировании. Металлизацию проводили из шликерной обмазки, состоящей из порошка легирующего элемента (ЛЭ) и органического связующего, по режимам, представленным в табл. 1.

После металлизации детали обезжиривали и подвергали азотированию в печи шахтного типа

Таблица 1

Режимы металлизации

Легирующий элемент	Температура, °С	Длительность, ч
Al	650	12
Ti	1050	10
Si	1080	11
Cr	1100	8

в атмосфере аммиака при температуре 570 °С в течение 3 ч.

Металлографические исследования упрочненных слоев проводили на поперечных шлифах с использованием микроскопа Axiovert 25 CA. Микротвердость измеряли по толщине упрочненных слоев по стандартной методике на микротвердомере ПМТ-3. Балл хрупкости определяли по длине трещин при индентировании четырехгранной алмазной пирамидой.

Для проведения испытаний термодиффузионных покрытий на устойчивость к гидроабразивному изнашиванию была создана экспериментальная установка, в которой упрочненные образцы подвергали воздействию потока воды с абразивными частицами песка и мелкого гравия в условиях, близких к тем, что испытывают рабочие колеса насосов при перекачке жидкости с включениями твердых частиц (рис. 2).

Установка представляет собой замкнутый трубопровод, по которому помпой *1* из бака *2* перекачивали пульпу, состоящую из воды с частицами песка и мелкого гравия. Мерный бачок *3* предназначен для регулирования скорости движения пульпы по трубопроводу. Манометром *5* контролировали давление в трубопроводе на испытательном участке *4*. Испытания проводили со скоростью потока пульпы 5 м/с в течение 4 ч.

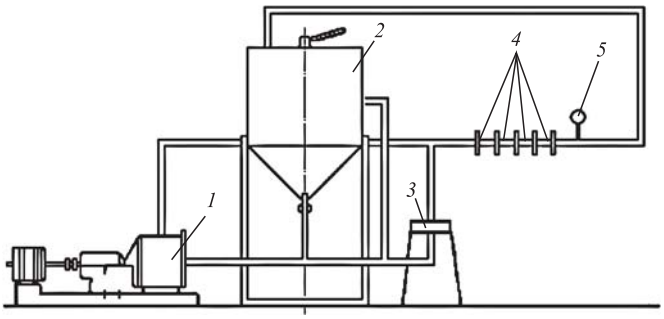


Рис. 2. Схема экспериментальной установки для проведения испытаний на гидроабразивный износ:
1 — помпа; *2* — бак; *3* — мерный бачок; *4* — испытательный участок; *5* — манометр

Аналогичные испытания проводили и на деталях с термодиффузионным покрытием, с той разницей, что пульпа состояла из крупных частиц (3...17 мм) горной породы (аргиллит) при их концентрации 16,6 г/л. Износ определяли взвешиванием деталей до и после испытания с точностью до 0,001 г.

Результаты исследований и их обсуждение

На первом этапе технологического цикла образцы и детали из серого чугуна на феррито-перлитной основе подвергали диффузионному насыщению Al, Ti, Si и Cr. Результаты измерения твердости, хрупкости и толщины диффузионного слоя представлены в табл. 2. В условиях выбранных режимов обработки на поверхности чугуна формируется металлизированный слой толщиной 600 мкм при насыщении титаном, 500 мкм — кремнием и алюминием и 300 мкм — хромом. Прирост твердости по сравнению с исходным значением (160 HV) незначителен, что объясняется, по-видимому, в основном твердорастворным упрочнением ферритной составляющей металлической основы, причем для покрытия кремнием при невысокой твердости характерна повышенная хрупкость.

Таблица 2

Результаты исследования диффузионного слоя

Легирующий элемент	Толщина упрочненного слоя, мкм	Твердость, HV	Балл хрупкости
Al	500	350...380	1
Ti	600	250...280	1
Si	500	300	3
Cr	300	180...230	1

Последующее азотирование позволяет существенно повысить микротвердость упрочненного слоя (рис. 3). Наибольшее повышение микротвердости до 1650 HV достигается при легировании чугуна титаном за счет образования нитридов TiN и в меньшей степени — при легировании алюминием и кремнием, преимущественно за счет образования легированной γ′-фазы, находящейся в различной степени когерентности с кристаллическими решетками матричной основы. Следует отметить, что балл хрупкости покрытия Si + N уменьшился до 2, покрытия Ti + N и Cr + N — остался без изменения, и, напротив, покрытие Al + N имеет балл хрупкости 2, что выше по сравнению с металлизацией.

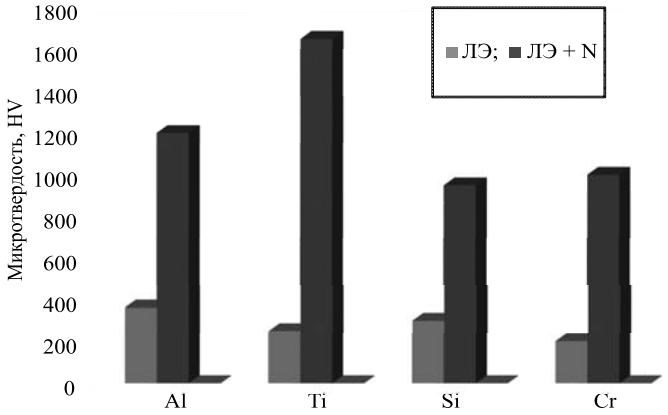


Рис. 3. Влияние типа легирующего элемента на микротвердость модифицированного слоя чугуна СЧ 28-48 до и после азотирования

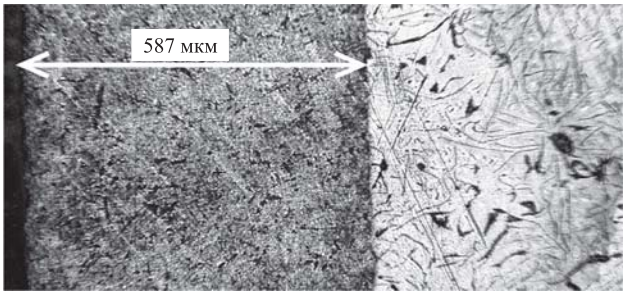


Рис. 4. Микроструктура чугуна СЧ 28-48 после термодиффузионного упрочнения Al + N. ×250

Рис. 5. Детали насоса после нанесения термодиффузионного покрытия

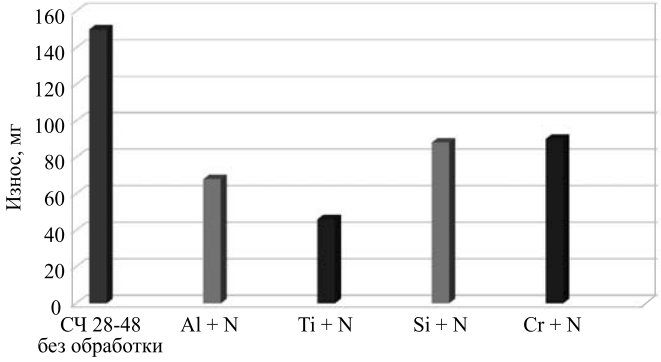


Рис. 6. Влияние модифицирования на гидроабразивную стойкость чугуна СЧ 28-48

На рис. 4 представлена микроструктура упрочненного слоя, полученного путем диффузионного насыщения поверхности чугуна СЧ 28-48 алюминием с последующим азотированием.

Видно, что на поверхности алитированного покрытия после азотирования формируется характерная структура азотированного слоя: ε-фаза толщиной около 20 мкм, ответственная за повышение коррозионной стойкости, и γ′-фаза в виде характерных игл нитридов, обеспечивающая высокую твердость и износостойкость покрытия. Отчетливо видна граница слоя, насыщенного алюминием. Установлено, что при нагреве в процессе азотирования диффузия алюминия продолжается вглубь практически на всю толщину азотированного слоя.

На рис. 5 изображены детали насоса из чугуна СЧ 28-48 после упрочнения с характерным для азотированных изделий равномерным покрытием серого цвета.

Результаты испытаний образцов и деталей в условиях гидроабразивного изнашивания представлены на рис. 6.

В результате проведенных испытаний выявлено, что все исследованные термодиффузионные покрытия в целом значительно повышают стойкость серого феррито-перлитного чугуна к гидроабразивному изнашиванию. Установлено, что максимальной устойчивостью к гидроабразивному износу обладают покрытия титаном с последующим азотированием, несколько ниже показатели стойкости у покрытия алюминием, что прогнозируемо и коррелирует с поверхностной микротвердостью упрочненных слоев.

Покрытия, обеспечивая высокую коррозионную стойкость, уменьшают склонность к образованию отложений на поверхности изделий (рис. 7), что может быть объяснено снижением свободной поверхностной энергии в присутствии нитридных фаз.

Таким образом, результаты проведенных исследований позволяют сделать вывод о возмож-

Рис. 7. Упрочненные детали после испытаний

ности азотирования серых обычных литейных чугунов, предварительно легированных алюминием, титаном, кремнием и хромом. Лучшие показатели поверхностной твердости, износостойкости и коррозионной стойкости достигаются насыщением поверхности алюминием и титаном с последующим азотированием. В целом получаемая структура и свойства чугунов после термодиффузионного упрочнения не уступают традиционно азотируемым дорогостоящим нитраллоям и значительно превышает твердость конструкционных сталей после цементации, закалки и низкого отпуска. Несмотря на некоторую сложность процесса, ожидаемый экономический эффект от его применения достигается за счет замены дефицитных дорогостоящих высоколегированных сталей на более дешевые материалы, например чугуны с термодиффузионными покрытиями.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Фатюхин Д.С., Александров В.А.** Изучение влияния кавитационной эрозии на деформацию и разрушение изделий из стали 45 // Деформация и разрушение материалов. 2012. № 10. С. 38—40.

2. **Лахтин Ю.М., Арзамасов Б.Н.** Химико-термическая обработка металлов. М.: Металлургия, 1985. 256 с.

3. **Чудина О.В.** Азотирование сталей, легированных при лазерном нагреве // Металловедение и термическая обработка металлов. 2004. № 1. С. 35—40.

4. **Чудина О.В., Кунавин С.А.** Сопротивление разрушению конструкционных сталей после лазерного легирования и азотирования // Металловедение и термическая обработка. 2006. № 7. С. 27—31.

5. **Александров В.А.** Комбинированный технологический способ ХТО для поверхностного упрочнения сталей // Металловедение и термическая обработка металлов. 2010. № 5. С. 27—31.

6. **Чудина О.В., Александров В.А., Брежнев А.А.** Разработка двухстадийной технологии металлизации конструкционных сталей с использованием лазерного и печного нагрева // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 6. С. 32—35.

7. **Александров В.А.** Получение многослойных комбинированных покрытий на поверхности стальных изделий для повышения эксплуатационных характеристик // Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 13—19.

8. **Демин П.Е., Петрова Л.Г., Александров В.А.** Повышение коррозионной стойкости стальных заглушек на двигателях способами комбинированной металлизации алюминием и титаном // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 9 (105). С. 20—23.

УДК 629.4.027.434:621.9.048.6:621.785.542

М.В. Фёдоров, С.А. Зайдес
(Иркутский национальный исследовательский технический университет)
E-mail: zsa@istu.edu

Оценка эффективности технологий упрочнения бандажей колесных пар локомотивов по результатам эксплуатационных испытаний

Представлены результаты исследования повышения износостойкости гребней колесных пар локомотивов магнитоплазменной обработкой и ультразвуковым поверхностно-пластическим деформированием. Анализ упрочняющих технологий сделан по данным эксплуатационных испытаний на кольцевых маршрутах Забайкальской железной дороги.

Ключевые слова: *эксплуатационные испытания, износ, магнитоплазменное упрочнение, ультразвуковая обработка, толщина гребня, твердость, шероховатость.*

The results of increasing of the wear resistance of locomotives wheelset flanges by magnetoplasma treatment and ultrasonic surface plastic deformation are presented. The analysis of strengthening technologies is based on the data of operational tests on the ring routes of the Trans-Baikal Railway.

Keywords: *operational tests, wear, magnetoplasma hardening, ultrasonic treatment, flange thicknesses, hardness, roughness.*

Введение

Регион Сибири и Дальнего Востока представляет собой сложный геоклиматический полигон, отличающийся тяжелыми условиями эксплуатации тягового подвижного состава железнодорожного транспорта: преобладание горно-перевальных участков, затяжные подъемы и спуски,

множество кривых малого радиуса, сложный профиль и план пути, резкие перепады среднесуточных температур, большая грузонапряженность — в совокупности приводят к усиленному износу контактирующих поверхностей, находящихся во фрикционном взаимодействии.

Детали и узлы подвижного состава представляют собой сложный комплекс трибологических систем, в результате реализуются различные виды трения качения и скольжения, а также ударные воздействия различной интенсивности и частоты [1].

Ведущее место среди технических отказов при эксплуатации тягового подвижного состава занимает повышенный износ бандажей колесных пар локомотивов. Ресурс бандажей колесных пар является одним из определяющих факторов величины межремонтных пробегов — не увеличив ресурс бандажей, невозможно продлить период между текущими ремонтами (ТР) локомотивов [2].

Статистический анализ причин износа бандажей колесных пар показывает, что основная доля износа поверхности катания бандажа приходится на его гребень. Интенсивность износа гребня непосредственно влияет на долговечность бандажей колесных пар. От работоспособности бандажей зависит срок службы всей колесной пары электровоза, так как при предельном износе бандажей необходимо производить выкатку колесно-моторного блока с изъятием локомотива из эксплуатации, что приводит к значительным эксплуатационным затратам всей компании ОАО "РЖД".

Для повышения износостойкости бандажей колесных пар в технологической практике используют плазменное поверхностное упрочнение и обработку поверхностным пластическим деформированием (ППД).

Цель работы — оценка эффективности упрочнения ультразвуковым ППД и магнитоплазменной обработкой бандажей колесных пар локомотивов по результатам эксплуатационных испытаний на кольцевых маршрутах Забайкальской железной дороги.

Методика проведения эксплуатационных испытаний

Для определения эффективности технологий упрочнения бандажей колесных пар локомотивов в подконтрольную эксплуатацию взято четыре локомотива серии 1.5ВЛ-80^{с}, приписанных к локомотиворемонтному депо "ТЧр Чита-1" Забайкальской ж.д., с одинаковым плечом обращения "Карымская — Хабаровск", прошедших текущий ремонт со вновь сформированными колесными парами. Бандажи изготовлены в соответствии с ГОСТ 398—2010 "Бандажи черновые для железнодорожного подвижного состава" [3]. Профили поверхности катания соответствовали профилю бандажа (обода) колеса по ГОСТ 11018—2011 с толщиной гребня 33 мм [4].

В соответствии с утвержденной программой и методикой эксплуатационных испытаний рассмотрены две упрочняющие технологии: магнитоплазменная обработка бандажей колесных пар локомотива и ультразвуковое поверхностное пластическое деформирование. Замеры и исследования бандажей проводили при каждой постановке локомотивов на плановый ремонт в объеме ТР-1 (27 500 км + 10 %).

Для проведения эксплуатационных исследований было использовано современное измерительное оборудование. Изменение геометрических параметров профиля поверхности катания контролировали лазерным профилометром серии ИКП-5. Поверхностную твердость рабочей зоны колес измеряли ультразвуковым твердомером ТКМ-459. Микротвердость определяли на приборе ПМТ-3.

Технология магнитоплазменного упрочнения

Технология плазменного упрочнения бандажей колесных пар локомотивов получила широкое распространение с середины 90-х гг. прошлого века. Для повышения износостойкости на поверхности изделия создается слой с другим фазовым и дисперсным составом, препятствующим износу. Известно достаточное количество работ, посвященных закалке металлических изделий, в том числе и колесных пар локомотивов [6—9].

Внедряемые по сети дорог установки плазменного упрочнения бандажей колесных пар локомотивов отличались конструктивным исполнением, имели различные основные узлы и конструкции плазматронов, использовали различные плазмообразующие газы, источники питания, но принцип увеличения износостойкости за счет термических фазовых и структурных превращений, происходящих при быстром концентрированном нагреве рабочей поверхности детали плазменной струей (дугой), одинаков [10].

Для снижения износа гребней колесных пар (КП) локомотивов в депо "ТЧр Чита-1" применяется технология магнитоплазменного упрочнения. Перед постановкой колесных пар под локомотив гребни бандажей упрочняли магнитоплазменной обработкой. Упрочнение проводили в соответствии с техническим описанием и инструкцией по

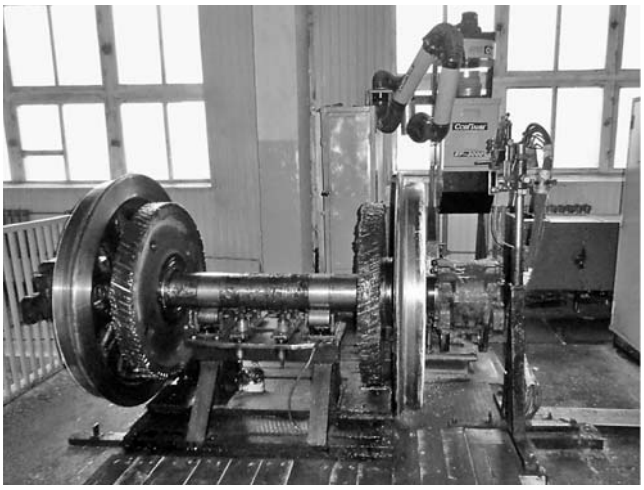


Рис. 1. Установка магнитоплазменного упрочнения "УПУ-1"

эксплуатации "Установки плазменного упрочнения гребней локомотивных колесных пар УПУ-1 (с выкаткой колесных пар)" (рис. 1).

Согласно техническим данным упрочнение проводится за один оборот колеса на высоту гребня шириной 40 мм. Параметры процесса обработки представлены ниже.

Скорость перемещения обрабатываемой поверхности, мм/с	10
Расход воздуха, $м^3$/ч	48
Сила тока, А	160
Напряжение на соленоидах, В	60
Угол наклона плазмотрона, °	45
Расстояние расположения плазмотрона от вершины гребня, мм	20
Расстояние от торца сопла до обрабатываемой поверхности, мм	36

Микротвердость в зоне максимальной глубины упрочненного слоя на расстоянии 0,1 мм от поверхности составила 694 HV0,2, что соответствует мартенситной структуре. На глубине от 0,66 до 0,70 мм от поверхности наблюдается снижение микротвердости от 447 до 365 HV0,2 (переходная зона — зона термического влияния (ЗТВ)). На глубине 0,74 мм и далее значения микротвердости соответствуют твердости основного металла бандажа (рис. 2).

Структура металла упрочненного слоя, переходной зоны и основного металла приведена на (рис. 3). Зона упрочненного слоя имеет структуру мартенсита, затем следует переходная зона, имеющая смешанную

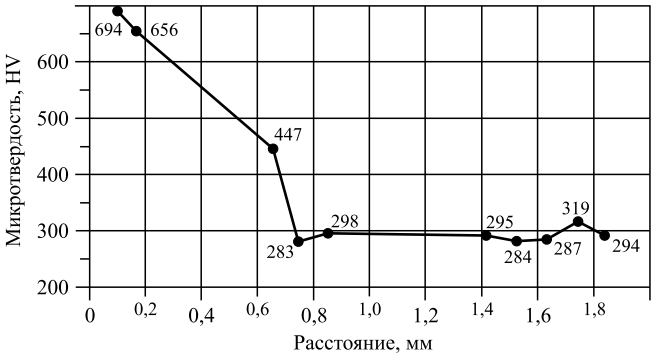


Рис. 2. Изменение микротвердости в поверхностном слое бандажа после магнитоплазменной обработки

структуру мартенсита и троостита. Структура основного металла бандажа состоит из перлита и феррита, выделившегося по границам перлитных зерен.

По результатам исследования макро- и микрошлифов на соответствие геометрических характеристик требованиям ТУ выявлено: микроструктура по глубине слоя соответствует распределению, характерному для поверхностной плазменной закалки, ширина и расположение от вершины гребня плазменно-упрочненного слоя соответствуют установленным пределам. Работоспособность колесных пар локомотива, упрочненных магнитоплазменной обработкой, оценивали по результатам измерения твердости и изменению геометрии поверхности катания бандажей. Результаты измерений показали, что после магнитоплазменного упрочнения гребней колесных пар изменение значений поверхностной твердости в зависимости от пробега непосредственно влияет на удельный износ гребней КП локомотива.

Для более детального понимания причин изменения параметров твердости и удельного износа бандажей КП локомотива, упрочненных маг-

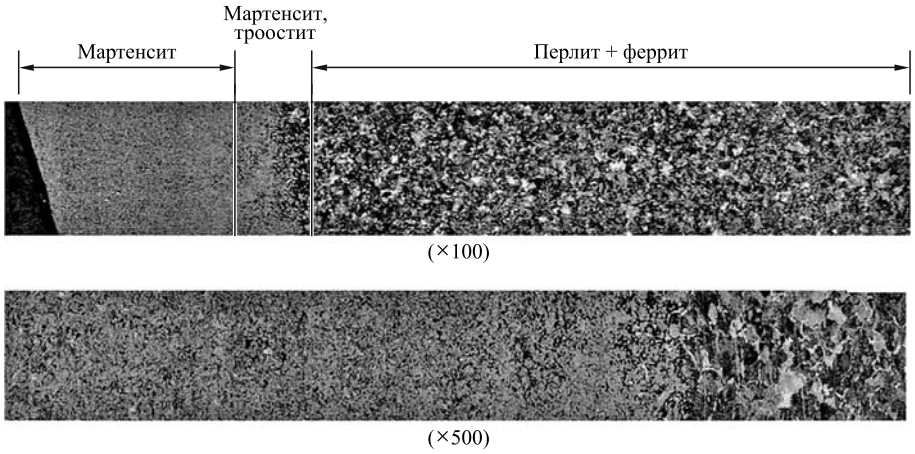


Рис. 3. Микроструктуры бандажа в месте упрочнения

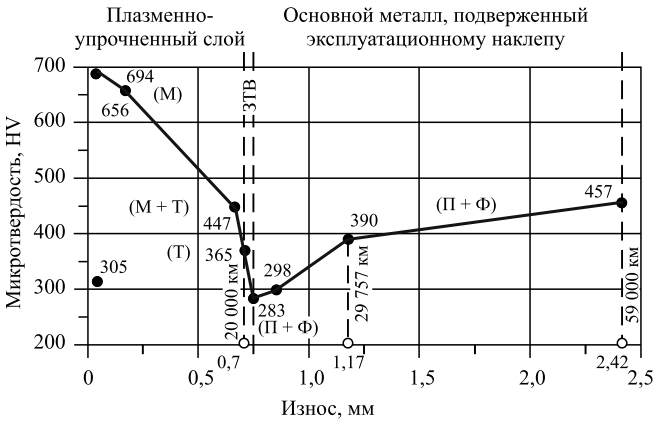


Рис. 4. Зависимость изменения твердости от износа поверхностного слоя при сопоставлении лабораторных исследований и эксплуатационных испытаний

нитоплазменной обработкой, рассмотрим график зависимости изменения твердости от износа поверхностного слоя (рис. 4) в сопоставлении с данными, полученными в результате эксплуатационных испытаний и лабораторных исследований.

Начальная твердость гребней КП после магнитоплазменного упрочнения (см. рис. 1) в среднем увеличилась в 2,3 раза (с 305 до 694 HV). В процессе эксплуатации на начальном этапе при прохождении первого цикла ТР1 твердость термически упрочненной поверхности уменьшилась в 1,8 раза (с 694 до 390 HV), удельный износ гребней составил $0{,}39 \cdot 10^{-4}$ мм/км (абсолютный износ — 1,17 мм). При последующей постановке локомотива на плановый ремонт второго цикла ТР1 на поверхности гребня наблюдался рост твердости (с 390 до 457 HV) с увеличением удельного износа — $0{,}41 \cdot 10^{-4}$ мм/км (абсолютный износ — 2,42 мм).

Анализируя кривую изменения твердости зоны упрочненного поверхностного слоя на начальной стадии эксплуатации локомотива, установили, что гребень работает практически без истирания, поскольку на поверхности катания модифицированы твердые закалочные структуры. При износе 0,10...0,66 мм наблюдается снижение поверхностной твердости (с 694 до 447 HV) с изменением структуры поверхностного слоя (мартенсит — троостит). При износе 0,70...0,74 мм наблюдается переходная зона (ЗТВ) с микроструктурой (троостит), резкое снижение твердости закалочной структуры (с 365 до 283 HV) до структуры основного металла (перлит + феррит). Это обуславливается разрушением тонкого упрочненного слоя в результате приработки трущихся поверхностей под действием переменных контактных напряжений и твердых частиц абразива, попадающих в область контакта гребня с головкой рельса.

При последующей эксплуатации наблюдается увеличение твердости поверхности бандажа за счет наклепа (с 298 до 390 HV), в результате полного изнашивания упрочненного слоя износ возрастает, происходит резкое изменение физико-механических свойств металла (структура, шероховатость, коэффициент трения), что приводит к увеличению интенсивности изнашивания поверхностного слоя — катастрофическому износу.

При последующей эксплуатации поверхность металла гребня блестящая, гладкая со стабильными свойствами и набирает эксплуатационную твердость за счет поверхностного наклепа (с 390 до 457 HV).

Таким образом, при магнитоплазменном упрочнении гребней колесных пар локомотивов было установлено, что глубина упрочненного слоя составляет около 0,7 мм; начальная твердость на поверхности гребней колесных пар увеличивается в 2,3 раза, но эта твердость резко снижается до твердости неупрочненной зоны, которая постепенно повышается за счет эксплуатационного наклепа.

Технология упрочнения ультразвуковым поверхностным пластическим деформированием

В рамках выполнения плана научно-технического развития ОАО "РЖД" по инициативе Забайкальской железной дороги проведена работа по разработке установки для упрочнения бандажей колесных пар локомотивов методом ультразвукового поверхностно пластического деформирования (УППД).

Принцип ультразвукового упрочнения обрабатываемой поверхности заключается в следующем. Ультразвуковой генератор, размещенный в блоке питания, преобразует электрическую энергию тока промышленной частоты 50 Гц в ток высокой частоты, подаваемый на ультразвуковой инструмент. Инструмент представляет собой колебательную систему, состоящую из ультразвукового магнитострикционного преобразователя и волновода-концентратора, к торцу которого присоединяется индентор. В процессе упрочняющей обработки инструмент прижимается к обрабатываемой поверхности, индентор под действием статической и динамической силы, создаваемой колебательной системой, пластически деформирует поверхностный слой детали, предварительно обработанной резанием, и тем самым сглаживает неровности поверхности и упрочняет поверхностный слой.

Рассматривая морфологию поверхности после токарной обработки и последующей ультразву-

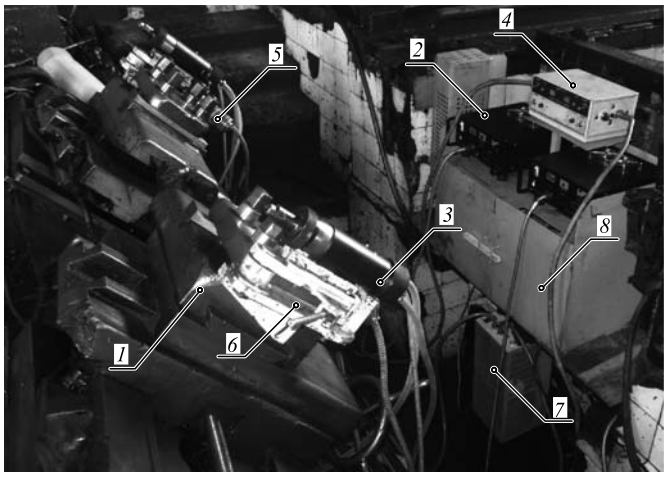


Рис. 5. Установка для ультразвуковой поверхностной обработки бандажей колесных пар локомотивов (УПО-1): *1* — суппорт обточного станка; *2* — ультразвуковой генератор; *3* — ультразвуковой инструмент; *4* — блок управления; *5* — электродвигатель; *6* — механизм перемещения; *7* — блок автономной системы охлаждения; *8* — приборный шкаф

ковой поверхностной обработки, рельеф поверхностного слоя после токарной обработки имеет определенную периодичность, заданную режимами точения. После УППД микрорельеф поверхности приобретает иную геометрию, поверхность значительно выглаживается, частично сохраняя наследственность рельефа точения. В процессе интенсивной деформации материал выступов заполняет впадины между ними, снижая шероховатость поверхности [1, 11].

При разработке установки за основу был взят универсальный обточной станок без выкатки колесных пар электровозов, тепловозов и моторвагонов. Установка ультразвуковой поверхностной обработки бандажей колесных пар локомотивов (УПО-1) состоит: из ультразвукового технологического комплекса "ИЛ-4/1-2.0" (ультразвуковой генератор и инструмент), механизма перемещения инструмента (блок управления, электродвигатель и поворотное устройство), автономной системы охлаждения (рис. 5).

Для отработки технологии ультразвуковой поверхностной обработки бандажей колесных пар локомотива, сравнительной оценки износостойкости и эксплуатационной надежности проведены работы по ультразвуковому упрочнению бандажей колесных пар двух локомотивов серии 1.5ВЛ-80^{с}.

Гребни бандажей колесных пар упрочнены на установке ультразвуковой поверхностной обработки УПО-1, смонтированной на обточном станке без выкатки колесных пар модели А-41, параметры процесса ультразвукового упрочнения указаны ниже.

Частота вращения колесной пары, мин$^{-1}$ . . . . . 25...30
Частота вращения ходового винта механизма перемещения инструмента, мин$^{-1}$. . . . . 10...13
Рабочая частота генератора, Гц. . . . . 21 650...21 950
Сила прижатия ультразвукового инструмента, Н 200
Подача ультразвукового инструмента вдоль обрабатываемой поверхности, мм/об. 0,16

Для определения наличия пластически деформированного слоя на упрочненной поверхности были проведены лабораторные исследования. По результатам металлографических исследований все образцы имели одинаковую структуру перлит + феррит + цементит, как на торцевых поверхностях, так и в глубине металла.

На поверхностном деформированном слое образцов наблюдается некоторая дефектность пластин цементита. Пластины цементита в результате приложенного ультразвукового воздействия разбиваются на отдельные частицы, разориентированные относительно друг друга.

Как показывают лабораторные исследования, на поперечном сечении образуется тонкий пластически деформированный поверхностный слой. Толщина этого слоя варьируется в зависимости от изменения параметра шероховатости обработанной поверхности в пределах 4...13 мкм и задается исходным микрорельефом.

По результатам полученных данных при проведении обследования бандажей колесных пар локомотивов, упрочненных ультразвуковой поверхностной обработкой, выявлено:

— после ультразвукового упрочнения гребней КП локомотивов поверхностная твердость в среднем увеличилась на 20...25 % (с 311...314 до 381...392 HV) (рис. 6);

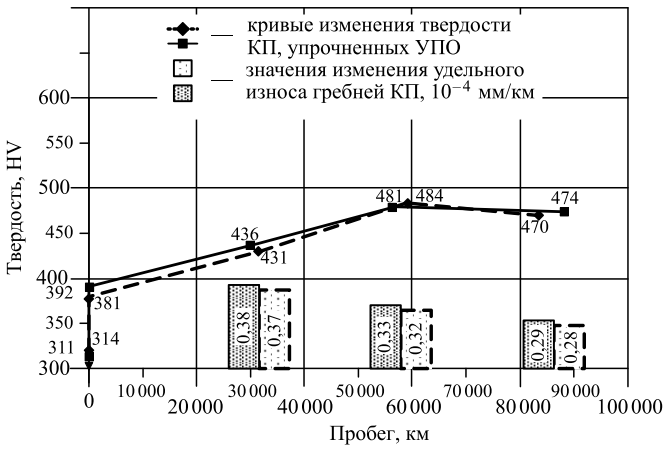


Рис. 6. Изменение твердости и удельного износа в зависимости от пробега после ультразвуковой поверхностной обработки гребней КП локомотивов

— в процессе последующей эксплуатации на поверхности гребня происходит монотонно увеличивающийся рост твердости за счет "эксплуатационного наклепа" (381 HV — 431 HV — 470 HV) в результате поверхностно-пластических деформаций микропрофиля по поверхности катания бандажа в системе "колесо—рельс";

— удельный износ гребней колесных пар локомотива после ультразвукового упрочнения при прохождении первого цикла текущего ремонта в объеме ТР1 составил $(0,37...0,38)\cdot10^{-4}$ мм/км;

— при постановке локомотивов на второй цикл текущего ремонта в объеме ТР1 удельный износ гребней КП опытных локомотивов снизился и составил $(0,32...0,33)\cdot10^{-4}$ мм/км, общий удельный износ гребней КП опытных локомотивов по окончании пробеговых испытаний при заходе локомотивов на третий цикл текущего ремонта в объеме ТР3 составил $(0,28...0,29)\cdot10^{-4}$ мм/км. Из приведенного графика видно, что в процессе эксплуатации опытных локомотивов средний удельный износ гребней монотонно уменьшается с последующей стабилизацией.

Для сравнения эффективности способов обработки бандажей колесных пар на рис. 7 представлен удельный и абсолютный износ до назначения ТО-4, когда проводят обточку бандажей колесных пар локомотивов. При исходной толщине гребня бандажа 33 мм обточка назначается при износе профиля на 8 мм, т.е. при достижении толщины 25 мм.

Из приведенного графика видно, что колесные пары на начальном этапе после плазменного упрочнения $(0,39\cdot10^{-4}$ мм/км), ультразвуковой обработки $(0,37\cdot10^{-4}$ мм/км) и без упрочнения $(0,52\cdot10^{-4}$ мм/км) испытывают усиленный износ (на рис. 7 показаны также величины абсолютного износа) в результате приработки поверхностного слоя. В дальнейшем при прохождении 60 000 км у колесных пар после УППД наблюдается стабилизация твердости (470...484 HV) и износа $(0,28\cdot10^{-4}$ мм/км).

Однако колесные пары с плазменным упрочнением и без обработки при прохождении 60 000 км сохраняют увеличенный удельный износ $(0,41...0,43)\cdot10^{-4}$ мм/км), близкий по значению к удельному износу ультразвуковой обработки при прохождении 30 000 км.

При дальнейшей эксплуатации в пределах от 70 000 до 80 000 км у колесных пар после плазменного упрочнения и без упрочнения за счет поверхностно пластических деформаций микропрофиля по поверхности катания бандажа в системе "колесо—рельс", поверхностная твердость стабилизируется и износ начинает монотонно уменьшаться по аналогии колесных пар после ультразвуковой обработки $((0,33...0,32)\cdot10^{-4}$ мм/км).

При пробеге более 100 000 км удельный износ стабилизируется и составляет $(0,28\cdot10^{-4}$ мм/км) у всех контрольных локомотивов.

Сделав экстраполяцию износа и зная, что удельный износ составляет $0,28\cdot10^{-4}$ мм/км, определен пробег эксплуатационных локомотивов до назначения ТО-4. Из приведенного рис. 7 видно, что применение технологии ультразвуковой обработки бандажей колесных пар локомотива увеличивает межремонтный пробег по обточке на 35 000 км и составляет 285 000 км.

Экспериментальные исследования и эксплуатационные испытания показывают, что технология ультразвукового поверхностно-пластического деформирования является более эффективной, повышающей износостойкость и снижающей абразивно-адгезионное изнашивание бандажей КП локомотивов, а также позволяет увеличить межремонтный пробег по обточке рабочих профилей КП локомотивов с запасом хода до 35 000 км.

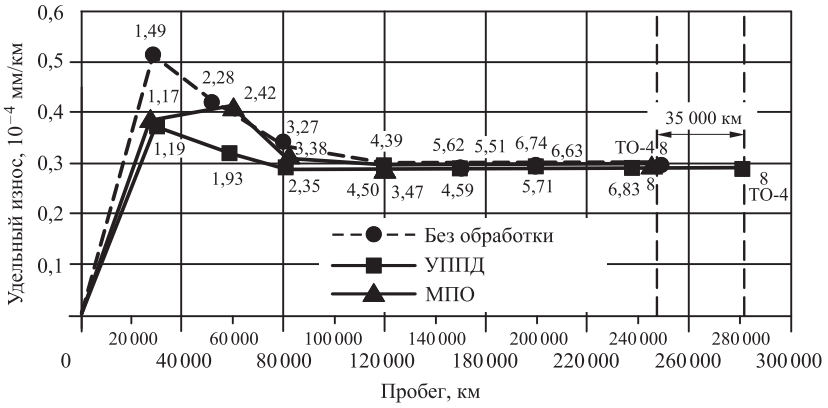


Рис. 7. Износ гребней колесных пар без упрочняющей обработки, после ультразвуковой (УППД) и магнитоплазменной обработки (МПО)

В процессе эксплуатации магнитоплазменный упрочненный слой изнашивается до основного металла, поскольку термически модифицированный слой (мартенсит + троостит + + перлито-феррит) в процессе эксплуатации пластически не деформируется (отсутствует наклеп) вследствие измененной микроструктуры, а после УППД структура не изменена, шероховатость уменьшена, поверхностная твердость в процессе эксплуатации набирает твердость до эксплуатационного максимума,

поэтому износ на начальном этапе несколько меньше и впоследствии уменьшается за счет пластически деформированного слоя.

Выводы

1. Недостаточная глубина упрочненного слоя (0,7 мм) и нестабильность микроструктуры после магнитоплазменного упрочнения поверхностного слоя гребней КП локомотива приводят к скачкообразному изменению твердости, что впоследствии влияет на увеличение износа после истирания закалочного слоя до основного металла.

2. Эффективность магнитоплазменного упрочнения колесных пар локомотива в условиях локомотиворемонтного депо "ТЧР Чита-1" дает некоторый эффект сохранения эксплуатационной долговечности при пробеге не более 20 000 км.

3. В результате ультразвуковой обработки гребней бандажей колесных пар локомотивов на обрабатываемой поверхности образуется пластический деформированный слой с предварительным запасом твердости за счет "технологического наклепа". Получение регулярного микрорельефа на поверхности гребня приводит к уменьшению удельного износа на начальных этапах эксплуатации и монотонному снижению при последующей эксплуатации за счет увеличения твердости.

4. При прохождении опытных локомотивов трех циклов текущего ремонта в объеме ТР1 установлено, что в процессе эксплуатации в промежутке между вторым и третьим циклом текущих ремонтов в объеме ТР1 (50 000...60 000 км) боковая поверхность гребня набирает необходимую эксплуатационную твердость для стабилизации износа "нормальный или эксплуатационный износ" в пределах 470...484 HV.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Федоров М.В., Неживляк А.Е., Гречнева М.В.** Ультразвуковое упрочнение гребней колесных пар локомотивов с получением модифицированной металлокерамической поверхности // Технологическая механика материалов: межвузовский сборник научных трудов / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2008. С. 9—17.
2. **Федоров М.В., Зайдес С.А., Неживляк А.Е.** Анализ влияния плазменного упрочнения гребней колесных пар локомотива на эксплуатационную долговечность в системе "колесо—рельс" // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 8. С. 28—32.
3. **ГОСТ 398—2010.** Бандажи черновые для железнодорожного подвижного состава. Технические условия.
4. **ГОСТ 11018—2011.** Тяговый подвижной состав железных дорог колеи 1520 мм. Колесные пары. Общие технические условия.
5. **ТУ 0943-218-01124323—2006.** Бандажные колеса с термическим упрочнением гребня.
6. **Лыков А.М., Маслов В.Э., Глибина Л.А.** Плазменное упрочнение гребней локомотивных и вагонных колес // Вестник ВНИИЖТ. 2005. № 1. С. 31—33.
7. **Петров С.В., Сааков А.Г.** Плазменные технологии упрочнения деталей подвижного состава // Бюллетень ОСЖД. 2004. № 1. С. 1—10.
8. **Киселев С.Н.** К вопросу о плазменном упрочнении гребней колес // Локомотив. 1999. № 4. С. 32—33.
9. **Плазменное** упрочнение гребней колесных пар подвижного состава / А.Е. Балановский, В.С. Глазков, Б.А. Мороз и др. // Сб. тр. СГУПС "Новые технологии на ВСЖД". Новосибирск: СГУПС, 1999. С. 57—65.
10. **Балановский А.Е.** Плазменное поверхностное упрочнение металлов. Иркутск: ИрГТУ, 2006. 180 с.
11. **Повышение** износостойкости бандажей колесных пар локомотивов модификацией поверхности ультразвуком / В.Е. Панин, В.А. Клименов, П.В. Ковалевская и др. // Сборник докладов научно-практической конференции "Современные проблемы взаимодействия подвижного состава и пути. Колесо—рельс 2003". М.: ООО "Интекст", 2003. С. 33—36.

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

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 04.12.2018 г. Подписано в печать 04.02.19 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**