ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 14
2018
№ 1 (157)
январь

Издается с января 2005 г.

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

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

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

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

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.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:
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

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.
Факс: (499) 269-48-97.
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

Безъязычный В.Ф., Тимофеев М.В., Прокофьев М.А., Киселёв Э.В. Динамический метод оценки модуля упругости и внутреннего трения модифицированного поверхностного слоя образцов 3

Ким В.А., Мокрицкий Б.Я., Якубов Ч.Ф. Влияние микроструктуры конструкционных и легированных сталей на износостойкость 7

Максимов М.В., Кириков С.В., Воробьев Р.А. Исследование прочностных свойств и механизмов разрушения плазменного покрытия диоксид циркония методом скретч-индентирования с увеличивающейся нагрузкой 11

Микаева С.А., Микаева А.С. Технологические исследования структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия 16

Нафиков М.З., Шакиров И.Р., Загиров И.И., Юнусбаев Н.М. Остаточные напряжения в металле покрытия, нанесенного электроконтактной приваркой двух растянутых проволок 19

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Дружков С.С., Волков Д.И., Киселев Э.В. Повышение производительности магнетронного напыления износостойких 3D-нанокомпозитных покрытий на основе параметрической оптимизации давления газа в вакуумной камере 23

Овчаренко П.Г., Лещев А.Ю., Тарасов В.В., Трифонов И.С. Сравнительная характеристика износостойкости поверхностных слоев, полученных электроискровым легированием 27

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Александров В.А., Петрова Л.Г., Сергеева А.С., Косачев А.В., Александров В.Д. Повышение стойкости режущего инструмента методом модифицирования поверхности с нанесением покрытий из соединений вольфрама в высокочастотном разряде 30

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Методы упрочняющей технологии как средство совершенствования процесса резания 36

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2017 г. 44

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

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней 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", 2018

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 14
2018
№ 1 (157)
January

Since 2005, January

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

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

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

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

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

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

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogue "Pressa Rossii" **39269**) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 268-47-19.
Fax: (499) 269-48-97
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

Bezjazychnyi V.F., Timofeev M.V., Prokofiev M.A., Kiselev E.V. Dynamic method for estimating the modulus of elasticity and internal friction of a modified surface layer of samples 3

Kim V.A., Mokritsky B.Ya., Yakubov Ch.F. Influence of the microstructure structural and alloyed steels on wear resistance 7

Maximov M.V., Kirikov S.V., Vorobyov R.A. Study of strength properties and failure mechanisms of zirconium dioxide plasma coating by the method of scratch indetermine with increasing load 11

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S. Technological studies of the structure and exterior of surface protective coatings 16

Nafikov M.Z., Shakirov I.R., Zagirov I.I., Yunusbaev N.M. Residual stresses in the metal coating claded by resistance welding of two stretched wires 19

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Druzhkov S.S., Volkov D.I., Kiselev E.V. Improving the performance of magnetron spraying of wear resistant 3D-nanocomposit coatings based on parametric optimization of gas pressure in the vacuum chamber 23

Ovcharenko P.G., Leshchev A.Yu., Tarasov V.V., Trifonov I.S. Comparative analysis of wear resistance of surface layers obtained by spark-alloying 27

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Aleksandrov V.A., Petrova L.G., Sergeeva A.S., Kosachev A.V., Aleksandrov V.D. Cutting tool resistance increase by surface modification technique with tungsten compounds coatings application in high-frequency discharge 30

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Technology of hardening methods as a means for improvement of the cutting process 36

INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

The index of the articles published in 2017 44

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

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science speciality: 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", 2018

УДК 538.951-405

В.Ф. Безъязычный, М.В. Тимофеев, М.А. Прокофьев, Э.В. Киселёв
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)
E-mail: technology@rsatu.ru

Динамический метод оценки модуля упругости и внутреннего трения модифицированного поверхностного слоя образцов*

Предложен динамический метод количественной оценки модуля упругости и внутреннего трения, основанный на использовании модели составных образцов. Метод позволяет исследовать поведение упругих и диссипативных характеристик материала поверхностного слоя, модифицированного в результате поверхностного пластического деформирования, обработки резанием, химико-термической обработки.

Ключевые слова: *модуль упругости, поверхностный слой, внутреннее трение.*

A dynamic method for the quantitative estimation of the modulus of elasticity and internal friction based on the use of a model of composite samples is offered. The method makes it possible to investigate the behavior of the elastic and dissipative characteristics of the surface layer material modified as a result of surface plastic deformation, cutting, chemical-thermal treatment.

Keywords: *elastic module, surface layer, internal friction.*

Закономерности поведения упругих характеристик, в частности модуля Юнга, металлических материалов представляют особый интерес для изучения структурных изменений в тонких поверхностных слоях металлов при различных видах внешнего силового воздействия, химико-термической обработки и других видах модифицирования.

Выбор именно этой характеристики не случаен и обусловлен ее некоторыми преимуществами перед другими характеристиками. Во-первых, модуль Юнга обладает значительной информативной емкостью, поскольку является мерой сил межатомного взаимодействия, и благодаря большой чувствительности и точности измерений структурно чувствительным свойством [1, 2]. Во-вторых, имеется возможность одновременного совместного измерения модуля упругости и ряда других свойств на одном и том же образце и в одних и тех же условиях опыта (при этом методы измерения остаются независимыми). Относительно простые обработка и интерпретация результатов измерений повышают достоверность и надежность последних. В-третьих, поскольку формально модуль Юнга представляет собой коэффициент в зависимости деформации от приложенных механических напряжений (и наоборот), он присутствует практически во всех уравнениях теории упругости. Поэтому учет его изменения как реакции на какое-либо воздействие представляет интерес при построении моделей формирования напряженно-деформированного состояния материала.

Внутреннее трение в общем случае выражается в уменьшении амплитуды (затухании) свободных упругих колебаний, создаваемых в веществе при соответствующем воздействии. Затухание колебаний является исключительно чувствительным индикатором изменения свойств металлов в зависимости от температуры и времени. Поэтому метод измерения внутреннего трения используют для изучения внутренней структуры металлов и

*Работа выполнена в рамках проекта "Роботизированный комплекс автоматизированной штамповки лопаток компрессора ГТД", договор с Минобрнауки России № 02.G25.31.0156 от 01.12.2015.

up_118.indd 3 28.12.2017 11:05:45

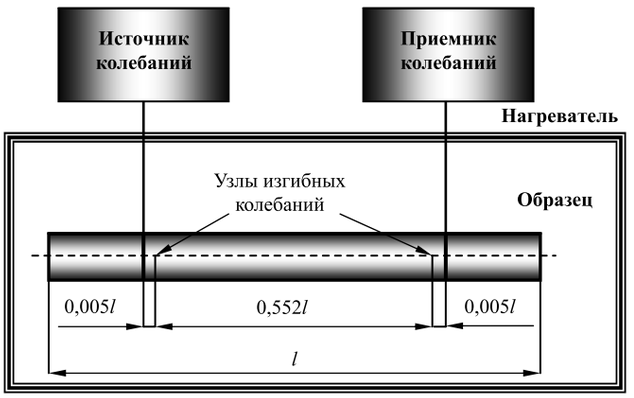


Рис. 1. Схема подвески образца при определении модуля Юнга

ее изменений в зависимости от самых различных факторов [2].

Определение модуля Юнга и температурной зависимости внутреннего трения выполнялось динамическим методом одновременно на одном и том же образце с помощью специальной установки, входящей в состав измерительного комплекса. Методика динамического определения модуля Юнга основана на измерении частоты собственных колебаний длинномерного образца, подвешенного на некотором расстоянии от узлов колебаний на тонких нерастяжимых нитях. Схема подвески образца приведена на рис. 1.

Для определения частоты собственных колебаний используется явление резонанса — резкого увеличения амплитуды колебаний, регистрируемых приемником, при совпадении собственной частоты образца и частоты вынуждающей силы, формируемой источником колебаний (рис. 1).

Дифференциальное уравнение, характеризующее колебательный процесс в данной упругой системе, в общем случае имеет вид

$$\rho F \frac{d^2y}{dt^2} + EI \frac{d^4y}{dx^4} = 0, \qquad (1)$$

где ρ — плотность материала образца; F — площадь поперечного сечения образца; E — модуль Юнга материала образца; I — осевой момент инерции поперечного сечения образца; x, y — координаты упругой линии; t — время.

Искомое значение модуля Юнга определяется после интегрирования уравнения (1) следующим выражением:

$$E = \frac{4\pi^2}{A^4} f^2 \frac{\rho F l^4}{I}, \qquad (2)$$

где A — частотный коэффициент, для балки со свободными концами при основной форме колебаний $A = 4{,}73$; f — частота собственных колебаний; l — длина образца.

Следовательно, зная геометрические характеристики поперечного сечения образца, его длину и плотность материала, можно по измеренной частоте собственных колебаний найти значение модуля Юнга, а проводя измерения в диапазоне температур (в процессе нагрева образца в электрической печи) — температурную зависимость модуля Юнга.

Следует отметить, что вывод расчетной зависимости проведен в предположении изотропности свойств по всему объему образца. В связи с этим формула (2) не может быть непосредственно применена при определении модуля Юнга модифицированного поверхностного слоя, поскольку глубина распространения изменений имеет, как правило, порядок $10^{-3}...10^{-1}$ мм и, следовательно, объем материала с измененными свойствами несоизмеримо мал по сравнению с объемом всего образца. Один из возможных путей решения этой проблемы, позволяющий извлечь дополнительную информацию из измерений, заключается в использовании модели составного образца, широко применяемой при изучении образцов с покрытиями [3].

Рассмотрим образец с круглым поперечным сечением. В качестве первого приближения сделаем следующие допущения:

изменения структуры и свойств материала в результате модификации локализованы в пределах поверхностного слоя, представляющего собой цилиндрическую оболочку с некоторой толщиной X_c;

свойства материала оболочки (модуль Юнга и плотность) постоянны в пределах ее объема. Тогда, используя принцип аддитивности, образец можно представить в виде составной оболочковой модели (рис. 2). Ядро этой модели представляет собой исходный материал с модулем Юнга E_0 и плотностью ρ_0, а оболочкой служит измененный материал с модулем Юнга E_1 и плотностью ρ_1.

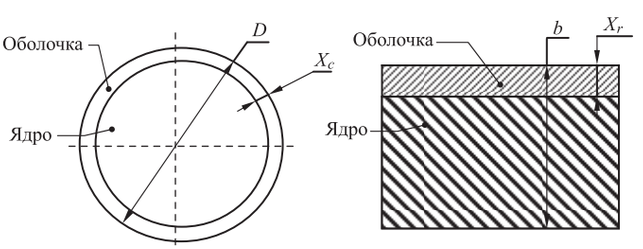


Рис. 2. Поперечные сечения моделей круглого и прямоугольного составных образцов

up_118.indd 4 28.12.2017 11:05:46

Тогда выражение для расчета квадрата частоты собственных колебаний составного образца будет иметь вид

$$f_c^2 = \frac{A^4\left(E_0 I_0 + E_1 I_1\right)}{4\pi^2 l^4\left(\rho_0 F_0 + \rho_1 F_1\right)}, \qquad (3)$$

где индекс 0 относится к ядру, индекс 1 — к оболочке модели; f_c — частота собственных колебаний составного образца.

"Исходным" будем называть такой образец, который имеет те же геометрические характеристики, что и составной, а свойства материала (модуль Юнга и плотность) — идентичные свойствам ядра составного образца. Тогда справедливо следующее отношение квадратов частот собственных колебаний исходного f и составного f_c образцов:

$$k_{f2} = \frac{f^2}{f_c^2} = \frac{I_0 + I_1}{F_0 + F_1}\frac{F_0 + k_\rho F_1}{I_0 + k_E I_1};\ k_\rho = \frac{\rho_1}{\rho_0};\ k_E = \frac{E_1}{E_0}. \qquad (4)$$

Выполнив подстановку соответствующих формул для площади и осевого момента инерции поперечного сечения, а также отбросив все члены второго порядка малости, получаем следующие уравнения для моделей составных образцов с круглым и прямоугольным поперечными сечениями:

$$X_c = \frac{D}{8}\frac{1 - k_{f2}}{\frac{1}{2}\left(1 - k_\rho\right) - k_{f2}\left(1 - k_E\right)}, \qquad (5)$$

$$X_r = \frac{b}{3}\frac{1 - k_{f2}}{\left(1 - k_\rho\right) - k_{f2}\left(1 - k_E\right)}. \qquad (6)$$

Используя уравнения (5), (6), можно решить как прямую, так и обратную задачу. Методика позволяет определить значение и температурную зависимость модуля Юнга материала модифицированного поверхностного слоя образцов, а также дает возможность провести количественную оценку толщины поверхностного слоя материала, если модуль Юнга измерен независимым методом, например индентированием.

При решении обратной задачи полученные выражения позволяют определить условную толщину слоя материала с измененными свойствами (модулем Юнга и плотностью) в предположении их постоянства по всему объему слоя. Однако в общем случае изменение указанных свойств может иметь другую закономерность, поэтому необходимо проводить корректировку значений толщины X.

Если известна функциональная зависимость модуля Юнга по толщине поверхностного слоя $E(h)$, например по результатам испытания непрерывным вдавливанием шарового индентора, то из условия сохранения частоты собственных колебаний вытекает требование постоянства изгибной жесткости образца (изменением плотности материала пренебрегаем):

$$\int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}-X} E_0 y^2 dy + \int_{\frac{b}{2}-X}^{\frac{b}{2}} k_E E_0 y^2 dy = \int_{-\frac{b}{2}}^{\frac{b}{2}-X_h} E_0 y^2 dy + \int_{\frac{b}{2}-X_h}^{\frac{b}{2}} E\left(\frac{b}{2} - y\right) y^2 dy, \qquad (7)$$

где X_h — уточненное значение толщины слоя материала с измененными свойствами; X — условная толщина слоя материала, рассчитанная по зависимостям (5), (6).

Поскольку толщина деформированного слоя мала по сравнению с размерами поперечного сечения образца, изменение свойств по глубине поверхностного слоя, как правило, удовлетворительно описывается линейным законом. В этом случае частное решение уравнения (7) относительно X_h для функции $E(h) \sim h$ будет иметь вид $X_h = 2X$.

Внешний вид экспериментальной установки, позволяющей реализовать методику динамического определения модуля Юнга длинномерных образцов, показан на рис. 3. Данная установка

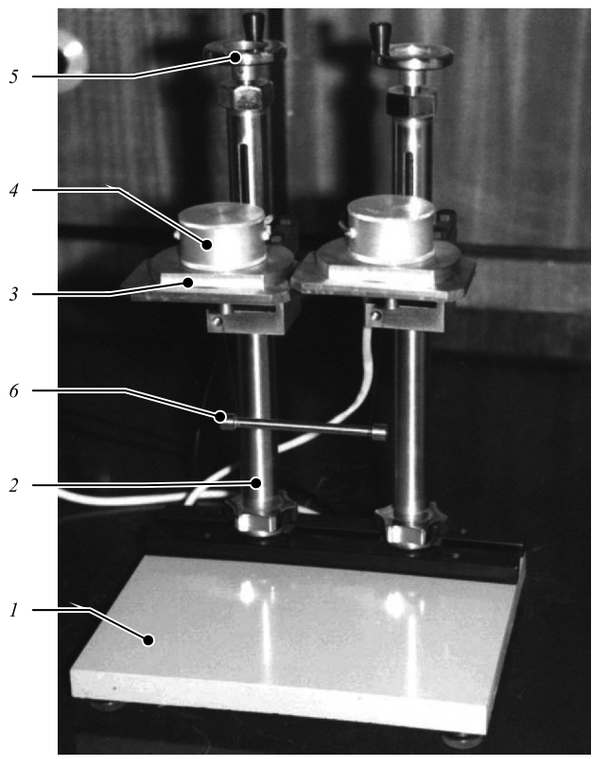


Рис. 3. Установка для динамического определения модуля Юнга длинномерных образцов

up_118.indd 5 28.12.2017 11:05:46

применяется в качестве лабораторного оборудования при изучении влияния самых различных внешних факторов на упругие и неупругие свойства металлических материалов. Установка включает в себя массивное основание *1* с установленными на нем подвижными стойками *2*. Стойки имеют горизонтальные площадки *3*, на которых зафиксированы пьезоэлектрические преобразователи *4* для возбуждения и приема механических колебаний. К датчикам на тонких нитях подвешивается образец *6* в соответствии со схемой, приведенной на рис. 1. При помощи регулировочных винтов *5* добиваются горизонтального положения образца. Для проведения измерений модуля Юнга в диапазоне температур от 20 до 600 °С на основание *1* дополнительно устанавливают электрический нагреватель.

Измерение проходит в полностью автоматическом режиме с помощью системы управления на базе компьютера. Это, в свою очередь, позволяет гибко изменять конфигурацию измерительной системы и дает возможность при необходимости проводить исследование целого ряда физико-механических характеристик материалов в заданном интервале температур.

Определение температурной зависимости внутреннего трения образцов проводится динамическим методом одновременно с измерением модуля Юнга на той же установке. Алгоритм работы измерительной системы (рис. 4) заключается в следующем. В исходном состоянии электрический нагреватель отключен и образец имеет начальную температуру, равную комнатной. Генератор сигнала возбуждения включен постоянно и находится в режиме автоматического захвата частоты резонанса образца. После подачи питания на нагреватель одновременно с этим активизируется интервальный таймер. Через каждые 60 с по сигналу таймера прекращается подача сигнала возбуждения на образец с помощью ключа и включается счетчик, который подсчитывает число колебаний образца, амплитуда которых не меньше определенного значения.

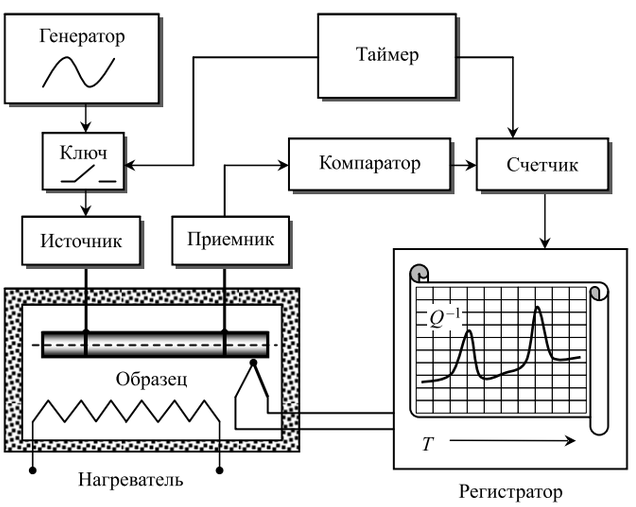


Рис. 4. Схема измерительной системы при определении температурной зависимости внутреннего трения

Поскольку вследствие диссипации энергии колебаний их амплитуда монотонно уменьшается, процесс подсчета занимает конечный промежуток времени, по окончании которого генератор снова выводит образец на резонансный режим, и через 60 с цикл повторяется. По числу колебаний, подсчитанному счетчиком в конце каждого цикла измерения, рассчитываются логарифмический декремент затухания δ и коэффициент внутреннего трения Q^{-1}:

$$\delta = \frac{1}{n}\ln\left(\frac{A_0}{A_n}\right);\ Q^{-1} = \frac{\delta}{\pi}, \qquad (8)$$

где A_0 — начальная амплитуда колебаний; A_n — конечная амплитуда колебаний; n — число колебаний за время уменьшения амплитуды от A_0 до A_n.

Заключение

Динамический метод оценки модуля упругости и внутреннего трения, основанный на использовании модели составных образцов, является инструментом для исследования упругих и диссипативных характеристик материала поверхностного слоя, модифицированного в результате поверхностного пластического деформирования, обработки резанием, химико-термической обработки и воздействия другими методами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Проблемные** вопросы упрочнения поверхностных слоев металлов и сплавов при пластической деформации и представление о наклепе / В.Ф. Безъязычный, Б.М. Драпкин, М.А. Прокофьев, М.В. Тимофеев // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 1. С. 3—6.

2. **Влияние** силового воздействия на качество поверхностных слоев металлических материалов / В.Ф. Безъязычный, И.Н. Аверьянов, В.К. Кононенко и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 4.

3. **Yasunori Tanji, Hiroshi Moriya, Yasuaki Nakagawa.** Measurement of Young's Modulus of Thin Plate by the Composite Vibrator Method // Metals: Journal of the Japan Institute. 1977. Vol. 41. No. 7. P. 737—741.

up_118.indd 6 28.12.2017 11:05:46

УДК 669.01: 539.538

В.А. Ким, Б.Я. Мокрицкий
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет),
Ч.Ф. Якубов
(Крымский индустриально-педагогический университет)
E-mail: kmtnm@knastu.ru

Влияние микроструктуры конструкционных и легированных сталей на износостойкость

При использовании методов компьютерной металлографии предложены количественные показатели микроструктуры поликристаллических материалов — плотность границ и фрактальная размерность, позволяющие оценивать структурную организацию материала при структурных превращениях. Показано изменение плотности границ и фрактальной размерности при закалке конструкционных и инструментальных легированных сталей и их отпуске. Установлено, что разложение мартенсита приводит к повышению фрактальной размерности и незначительному снижению плотности границ. Экспериментально определена износостойкость сталей экспресс-методом и установлена связь между количественными показателями интерфейса структурного состояния закаленных и отпущенных сталей и эмпирическими показателями уравнения интенсивности изнашивания.

Ключевые слова: *микроструктура, плотность границ, фрактальная размерность, интенсивность изнашивания, трение, конструкционные стали, инструментальные легированные стали.*

Using methods of a computer metallography quantitative indices of a microstructure of polycrystalline materials — density of borders and fractal dimension allowing to estimate the structural organization of material at structural transformations are offered. Change of density of borders and fractal dimension is shown when training constructional and tool alloyed steels and their tempering. Thus it is established that decomposition of martensite leads to increase of fractal dimension and insignificant decrease in density of borders. Wear resistance of steels is experimentally determined by express method and connection between quantitative indices of the interface of a structural state tempered and released steels and empirical indicators of the equation of intensity of wear is established.

Keywords: *microstructure, density of borders, fractal dimension, intensity of wear, friction, structural steels, tool alloyed steels.*

Введение

Изнашивание представляет собой комплексный процесс поверхностного разрушения, включающий множество механизмов. При этом сопротивляемость материала по отношению к каждому из них реализуется через разные физико-механические свойства и структурные показатели [1, 2].

Интенсивность изнашивания J материала и пары трения часто представляют степенной зависимостью [2]

$$J = Kp^n,$$

где p — номинальное нормальное давление, МПа; K, n — эмпирические постоянные, зависящие от состава, структуры и свойств трущихся материалов и условий контактного взаимодействия.

Изображение микроструктуры по формальным признакам представляет собой геометрическое множество различных объектов, объединенных в группы с разной степенью упорядоченности. При этом всегда можно выделить отдельные составляющие, несущие наиболее полную информацию о структурной организации материала. К таким элементам относят границы микроструктурных объектов, которым часто присваивают статус интерфейса структурного состояния [3, 4].

С развитием компьютерных технологий обработки изображений появилась возможность представлять цифровые фотографии микроструктур в виде числовых массивов и на их основе создавать различные количественные комплексы, раскрывающие особенность структурной организации материала, степень их неоднородности, упорядоченности и неравновесности [5—7]. Использование количественных структурных показателей позволяет выйти на новый уровень представления кинетики структурных изменений, уравнений разрушения и изнашивания. При этом многие структурные свойства материала могут быть представлены более точными количественными соотношениями.

Необходимо помнить, что все реальные микроструктурные объекты на изображениях микроструктур теряют единицу мерности. То есть ли-

up_118.indd 7 28.12.2017 11:05:46

нейные объекты на самом деле являются поверхностями, а поверхностные объекты — объемными. Поэтому для перевода вычисленной фрактальной размерности границ в реальную необходимо увеличить ее на единицу.

В статье представлены результаты исследований по установлению связи между количественными показателями микроструктур конструкционных и инструментальных легированных сталей, полученных различной термической обработкой, и эмпирическими показателями уравнения интенсивности изнашивания.

Методика исследований

Исследования проводили на образцах из сталей 45, У10 и ХВГ, различающихся химическим составом, микроструктурами и термической устойчивостью, которые обеспечивали соответствующим видом и режимами термической обработки. Термическую обработку осуществляли в печах марки SNOL. Режимы термообработки и структурное состояние исследуемых образцов приведены в табл. 1.

Таблица 1

Режимы термической обработки и микроструктуры исследуемых сталей

Материал	Структура	Режим термической обработки
Сталь 45	Мартенсит	Закалка, температура нагрева 850 °С, охлаждение в воду. Отпуск при температуре выдержки 200 °С
	Троостит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 500 °С
	Сорбит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 600 °С
	Феррит + перлит	Температура нагрева 850 °С, охлаждение с печью
У10	Мартенсит	Закалка, температура нагрева 900 °С, охлаждение в масле. Отпуск при температуре выдержки 200 °С
	Троостит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 500 °С
	Сорбит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 650 °С
	Перлит	Температура нагрева 900 °С, охлаждение с печью
ХВГ	Мартенсит	Закалка, температура нагрева 850 °С, охлаждение в масле. Отпуск при температуре выдержки 200 °С
	Троостит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 500 °С
	Сорбит	Отпуск после закалки. Температура выдержки 650 °С
	Перлит	Температура нагрева 850 °С, охлаждение с печью

Травление металлографических шлифов проводили 4,0%-ным раствором азотной кислоты в спирте. Микроструктуры фиксировали с помощью металлографического микроскопа "Микро-200" при 1000-кратном увеличении. Цифровые фотографии микроструктур обрабатывали программой Image.Pro.Plus.5.1. Обработка включала корректировку изображения, снятие контрастной маски, выделение границ зерен и раздела фаз, измерение периметра P_i каждого микроструктурного объекта и его площади S_i, а также характеристики развитости границ раздела — фрактальной размерности D_i. На основании полученных данных рассчитывали среднюю плотность границ микроструктурных объектов, зафиксированных на одной фотографии [4]:

$$q = \frac{1}{N}\sum_{N}\left(\frac{P_i}{S_i}\right),$$

где N — число микроструктурных объектов, зафиксированных на одной фотографии микроструктуры.

Вычисление плотности границ осуществляли по трем фотографиям изображений микроструктур, при этом на одной фотографии фиксировалось число микрообъектов N = 1800...2400. Это обеспечивало большой объем выборки, гарантирующий высокую статистическую точность.

Интенсивность изнашивания материала определяли ускоренным методом при трении ребра призматического образца. Образец представлял собой призму с сечением в виде равностороннего треугольника со стороной 20 мм и толщиной 10 мм. Трение осуществлялось о диск из серого чугуна СЧ21, который слабо подвержен деформационному упрочнению [2, 8]. Режимы контактного взаимодействия соответствовали граничному трению в среде масла "Индустриальное-20". Нормальное усилие прижима образца обеспечивалось его нагружением с помощью рычажной системы и гири и равнялось 18 и 28 Н, что создавало номинальное нормальное давление p в диапазоне 2,0...150 МПа. Скорость скольжения составляла 4,0 м/с.

Интенсивность изнашивания определяли по скорости увеличения фаски износа, а нормальное контактное давление вычисляли как частное от деления усилия прижима образца на площадь

up_118.indd 8 28.12.2017 11:05:47

Таблица 2

Значения параметров эмпирической степенной зависимости для интенсивности изнашивания и количественные характеристики микроструктуры

Материал	Структура	$K \cdot 10^{-11}$	n	D	q, 1/мкм
Сталь 45	Феррит + перлит	5,845	1,326	1,223	0,725
	Сорбит	5,427	1,265	1,232	0,207
	Троостит	4,112	1,116	1,185	0,104
	Мартенсит	2,556	0,795	1,172	0,573
У10	Перлит	5,045	1,167	1,345	0,455
	Сорбит	4,856	1,054	1,275	0,476
	Троостит	3,455	0,893	1,267	0,552
	Мартенсит	2,267	0,697	1,256	0,723
ХВГ	Перлит	3,815	1,287	1,283	0,084
	Сорбит	3,345	1,055	1,255	0,123
	Троостит	1,843	0,736	1,237	0,215
	Мартенсит	0,725	0,497	1,205	0,632

фаски износа. По полученным результатам строили зависимость интенсивности изнашивания от номинального нормального контактного давления и рассчитывали уравнение тренда в виде показательной функции. На основании полученной зависимости определяли значения коэффициента K и показателя n. Результаты вычисления эмпирических показателей как средние по трем измерениям приведены в табл. 2. Там же представлены средние значения фрактальной размерности и плотности границ микроструктурных объектов исследуемых образцов. Более высокая износостойкость материала соответствует низкими величинами эмпирических показателей K и n.

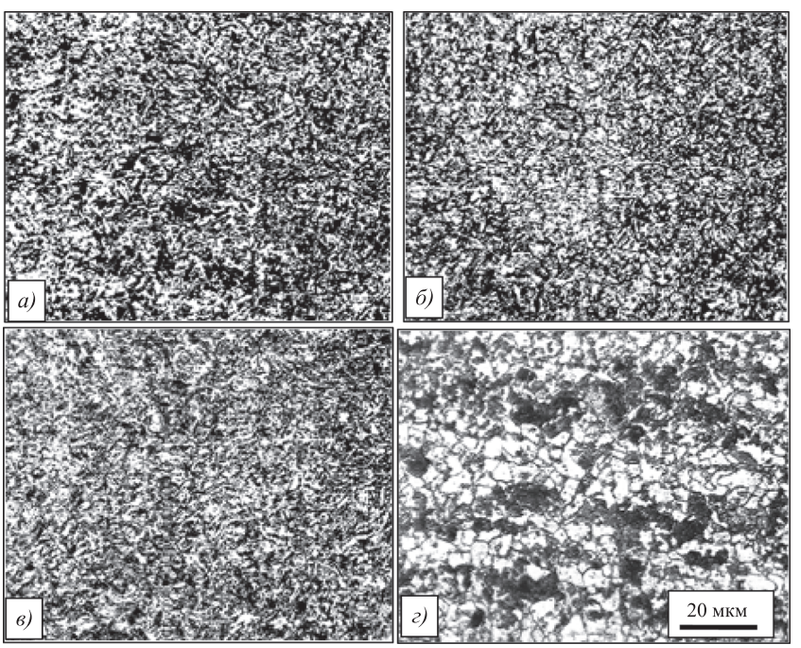
Результаты исследований и их анализ

На рисунке представлены микроструктуры стали 45 после термической обработки. Аналогичные изображения были получены для сталей У10 и ХВГ.

Микроструктуры стали 45, полученные закалкой и низко- и среднетемпературным отпуском, визуально трудно различимы, но они четко идентифицируются по количественным структурным показателям, такими как фрактальная размерность и плотность границ. В мартенситной структуре из-за повышенной плотности двойниковых границ фрактальная размерность D принимает низкие значения, а средняя плотность границ микроструктурных объектов q — относительно высокие значения. При разложении мартенсита в результате отпуска образуется троостит, а затем — сорбит, отличающиеся высокой степенью дисперсности ферритно-цементитных пластин по сравнению с перлитом. Границы между ними становятся более развитыми по сравнению с двойниковыми границами. В результате фрактальная размерность возрастает, а плотность границ снижается.

По мере дальнейшего разложения мартенсита формируется ферритно-перлитная структура, которая подвергается рекристаллизации с образованием мелких зерен равноосной формы. В результате фрактальная размерность границ принимает более высокие значения, и это влечет за собой повышение плотности границ микроструктурных объектов.

Анализ полученных результатов показывает, что фрактальная размерность границ микроструктурных объектов принимает наибольшее значение у отожженных структур по сравнению со структурами, полученными закалкой и отпуском, при этом с повышением температуры отпуска фрактальная размерность границ D снижается. Такой характер изменения фрактальной размерности, на первый взгляд, не укладывается в традиционную дина-



Микроструктуры стали 45 после закалки и различных видов отпуска: *а* — мартенсит; *б* — сорбит; *в* — троостит; *г* — феррит + перлит

up_118.indd 9 28.12.2017 11:05:47

мику развития зеренной микроструктуры, когда упрочнение сталей при закалке связывают с развитием более развитых границ, тормозящих скольжение дислокаций при пластической деформации [6]. Полученные результаты объясняются особенностью отображения структурной организации закаленных сталей. В мартенситной и трооститной структурах при обычном травлении не выявляется зернистость, а видимые прямолинейные отрезки представляют собой границы двойников или их наследственные образования. В сорбитной структуре границы двойников преобразуются в линейные микроструктурные образования и начинают проявляться зеренные границы. На основании изложенного можно заключить, что мартенсит и структуры, получаемые при его отпуске, необходимо выделить в особую группу, в которой кинетику структурных изменений нужно рассматривать с позиций изменения границ двойников. При этом чем выше плотность двойниковых границ, тем выше твердость закаленных сталей.

Единичная двойниковая граница имеет прямолинейную форму, которая не относится к категории фрактальных объектов. Но их совокупность с учетом пересечений и наложений образует геометрические фигуры, характеризующиеся фрактальностью. Следовательно, фрактальная размерность закаленных структур в большей степени характеризует структурную организацию двойников, а не сами границы двойников.

Увеличение фрактальной размерности и снижение плотности границ при разложении закаленной мартенситной структуры при отпуске также проявляются у сталей У10 и ХВГ. Однако если в процессе нагрева закаленной структуры происходят процессы рекристаллизации, то это приводит к повышению плотности границ и фрактальной размерности. Такой характер структурных изменений более выраженно проявляется у сталей с пониженной жаропрочностью. У стали 45 этот эффект носит выраженный характер, у стали У10 — проявляется незначительно, а у ХВГ, в состав которой входят легирующие компоненты, повышающие их жаропрочность, — отсутствует.

С повышением общего содержания легирующих элементов наблюдается слабая тенденция увеличения фрактальной размерности границ микроструктурных объектов. При этом наибольшее влияние на эту зависимость оказывает содержание углерода.

Износостойкость материала является величиной, обратной интенсивности изнашивания. Выполненные исследования подтверждают известный факт, что максимальной износостойкостью обладает мартенситная структура, характеризующаяся повышенной микротвердостью [1]. По мере разложения мартенсита его микротвердость и износостойкость снижаются. Такой характер влияния структурной организации на изнашивание указывает, что механическая прочность в значительной степени обеспечивает сопротивляемость материала изнашиванию.

Изнашивание представляет собой процесс поверхностного диспергирования, и отрыву частицы износа предшествует пластическая деформация поверхности трения. Более развитые внутренние границы раздела поликристаллических материалов являются препятствием для скользящих дислокаций и активными диссипативными структурами, рассеивающими подводимую механическую энергию в тепло. С повышением фрактальной размерности границ микроструктурных объектов повышаются их развитость и способность блокировать скользящие дислокации и другие носители пластической деформации. Общая тенденция повышения износостойкости сталей с увеличением фрактальной размерности границ проявляется по отношению ко всем исследуемым сталям.

Полученные результаты не отражают всю полноту реального процесса. Поверхности трения подвергаются приработке, и состояния микрорельефа вторичных поверхностей и динамических диссипативных структур могут сильно разниться в структурном отношении с исходными. Тем не менее выполненные исследования можно использовать для прогнозирования износостойкости конструкционных и инструментальных легированных сталей после термической обработки, при этом повышенные значения плотности границ являются гарантией более высокой износостойкости материала.

Заключение

При использовании компьютерных программ обработки изображений микроструктур предложены комплексные показатели структурной организации материала — плотность границ и их фрактальная размерность, учитывающие развитость границ микроструктурных объектов, их периметр, площадь и общее число микрообъектов, зафиксированных на одной фотографии.

Показан характер изменения фрактальной размерности и плотности границ при закалке и отпуске конструкционных и инструментальных легированных сталей. С повышением суммарного содержания легирующих элементов фрактальная размерность увеличивается.

up_118.indd 10 28.12.2017 11:05:47

Установлено, что при разложении мартенсита закалки при отпуске имеет место тенденция повышения фрактальной размерности и снижения плотности границ, износостойкость при этом уменьшается. Если процесс разложения мартенсита сопровождается рекристаллизацией, то плотность границ повышается. Но эта особенность проявляется только по отношению к углеродистым и инструментальным легированным сталям, в структуре которых весомую долю составляют двойниковые границы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Рыбакова Л.М., Куксенова Л.И.** Структура и износостойкость металла. М.: Машиностроение, 1982. 212 с.

2. **Справочник** по трибонике / под ред. М. Хебды, А.В. Чичинадзе. В 3 т. Т. 1. Теоретические основы. М.: Машиностроение, 1989. 400 с.

3. **Поверхностные** слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Р.Р. Балахонов и др.; отв. ред. В.Е. Панин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.

4. **Синергетика** и фракталы в материаловедении / В.С. Иванова, А.С. Баланкин, И.Ж. Бунин, А.А. Оксогоев. М.: Наука, 1994. 338 с.

5. **Ким В.А., Башков О.В., Попкова А.А.** Методика цифровой обработки изображений микроструктуры алюминиевых сплавов в среде MATLAB // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2013. Т. 79, № 10. С. 34—40.

6. **Статистическая** оценка количественной металлографии / В.А. Ким, Р.В. Евдокимова, С.В. Золоторева и др. // Ученые записки КнАГТУ. 2013. № II-1 (14). С. 76—82.

7. **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.

8. **Способ** определения износостойкости: Пат. на изобретение № 243384 / Ким В.А., Башков О.В., Хвостиков А.С., Саблин П.А. Заявл. 21.04.2009; Опубл. 10.11.2011. Бюл. № 31.

УДК 539.42

[1]М.В. Максимов, [2]С.В. Кириков, [1]Р.А. Воробьев
([1] АО "ЦНИИ "Буревестник", г. Нижний Новгород,
[2] Институт проблем машиностроения РАН, г. Нижний Новгород)
E-mail: ksv.kirikov@yandex.ru

Исследование прочностных свойств и механизмов разрушения плазменного покрытия диоксид циркония методом скретч-индентирования с увеличивающейся нагрузкой

Предложен метод скретч-индентирования с увеличивающейся нагрузкой для исследования прочностных (когезионных) свойств и механизмов разрушения плазменного керамического покрытия диоксид циркония. Показано, что параметры, фиксируемые при испытании: акустическая эмиссия, сила трения, глубина проникновения индентора, позволяют судить об интенсивности разрушения покрытия. Установлены три стадии скретч-индентирования, отличающиеся механизмами разрушения покрытия, и приведены критические нагрузки, характеризующие эти стадии.

Ключевые слова: *скретч-тест, диоксид циркония, плазменное покрытие, механика разрушения покрытий, акустическая эмиссия.*

The proposed method is a scratch test with increasing load for research strength (cohesive) properties and failure mechanisms of plasma ceramic coating of zirconium dioxide. It is shown that the parameters recorded during the test: acoustic emission, friction, penetration depth of the indenter allows to judge about the intensity of destruction of the coating. There are three stages of the scratch test, different failure mechanisms of coatings, and provides the critical loads that characterize these stages.

Keywords: *scratch test, zirconium dioxide, plasma coating, fracture mechanics of coatings, acoustic emission.*

Введение

Керамическое покрытие диоксид циркония применяют для защиты от высокотемпературной газовой коррозии, высокого перепада температур при пусковых нагрузках и эрозионного износа рабочих поверхностей турбинных лопаток газотурбинных двигателей, а также для повыше-

up_118.indd 11 28.12.2017 11:05:47

ния износостойкости контактирующих поверхностей деталей пар трения, используемых в машиностроении. Ресурс керамических покрытий во многом определяется их прочностными и износостойкими свойствами [1]. Для оценки прочности сцепления покрытий с основным материалом обычно применяют испытания на отрыв, определение адгезии методом Х-образных надрезов (ГОСТ 32702.2—2014), определение прочности сцепления на сдвиг, удар и разрыв.

В настоящее время набирает популярность метод царапания покрытия (скретч-тест) с помощью алмазного индентора. Скретч-тест является современным усовершенствованным методом склерометрии, который был популярен до 40-х гг. прошлого столетия при оценке твердости материалов. В современном понимании склерометрами принято называть любые устройства, реализующие метод царапания материала, независимо от того, какие характеристики материала подлежат оценке: твердость, пластичность, износостойкость или иные механические параметры.

Имеющиеся методы количественной оценки прочностных свойств керамических покрытий являются трудоемкими и технологически сложными. Поэтому **цель данной работы** — адаптация метода скретч-индентирования для количественной оценки когезионных свойств и характеристик материала покрытия, а также апробация данного метода на примере керамического покрытия диоксида циркония.

Объект и методика эксперимента

В качестве объекта исследования выбрали покрытие, сформированное методом высокоэнергетического плазменного напыления из сферической порошковой смеси диоксида циркония ZrO_2 с диаметром основной фракции частиц ~ 80 мкм с содержанием стабилизирующей добавки оксида иттрия (7 % Y_2O_3) (на жаростойком интерметаллидном подслое системы Ni—Co—Cr—Al—Y) [2—4].

Для определения когезионной прочности, а также для исследования механизма разрушения покрытия провели скретч-тесты на адгезиметре Revetest RST при постепенно увеличивающейся нагрузке. Метод заключается в контролируемом царапании образца с помощью индентора. При некоторой критической нагрузке на покрытии появляются трещины, начинается его разрушение. При этом фиксируются глубина проникновения индентора h, сила трения $F_{тр}$, амплитуда сигнала акустической эмиссии (АЭ). После царапания, используя видеомикроскоп и наложение изображения на графики сигналов, можно определить критические нагрузки в моменты возникновения первых микротрещин, полного растрескивания, первого и полного отслаивания. Испытания проводили при следующих условиях: скорость перемещения индентора типа "Роквелл С" 5 мм/мин (радиус закругления индентора 200 мкм), длина царапины составляла 5 мм, нагрузка увеличивалась от 1 до 195 Н.

Фазовый состав порошковых смесей и покрытий исследовали методом рентгеноструктурного анализа на дифрактометре ДРОН-3М (с применением Cu K_α-излучения в геометрии по Брегу—Брентано).

Металлографические исследования покрытия проводили на растровом электронном микроскопе TESCAN VEGA 2 и TESCAN VEGA 3.

Шероховатость поверхности покрытий определяли по параметру *Ra* согласно ГОСТ 2789—73 на профилометре TR-200.

Результаты исследования и их обсуждение

Структура и фазовый анализ покрытия. В поперечном сечении теплозащитное покрытие состоит из интерметаллидного подслоя состава Ni—Co—Cr—Al—Y толщиной ~ 200 мкм и рабочего керамического слоя ZrO_2 толщиной ~ 400 мкм. Морфология поверхности покрытия (рис. 1) представляет собой сочетание оплавленных частиц неправильной и сферической формы размером 1...5 мкм.

Поперечное сечение двухслойного теплозащитного покрытия (Ni—Co—Cr—Al—Y + ZrO_2) показано на рис. 2. В поперечном сечении диоксида циркония

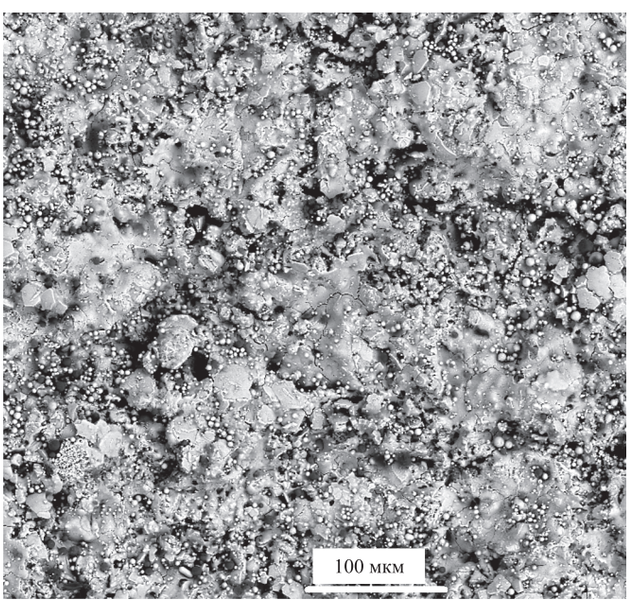


Рис. 1. Морфология поверхности покрытия ZrO_2

up_118.indd 12 28.12.2017 11:05:47

просматриваются прослойки толщиной ~ 2,5 мкм, состоящие из зерен со столбчатой структурой (рис. 2, *б*).

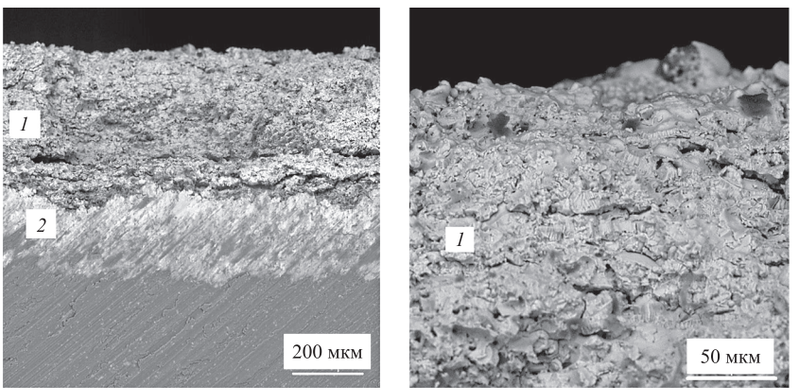
Поперечный размер столбиков находится в интервале от 0,1 до 1 мкм. При большом увеличении (рис. 3, *б*) хорошо видно, что структура имеет "сотовый" вид. В поперечном сечении имеются микропоры и микротрещины. Можно предположить, что при приложении внешних нагрузок по границам слоев будет происходить расслоение и отрыв покрытия от подложки.

Методом рентгеноструктурного анализа установлено, что керамическое покрытие представляет собой фазу диоксида циркония T-ZrO_2 с тетрагональным типом кристаллической решетки (таблица).

Анализ результатов диаграммы скретч-индентирования (рис. 4) с прогрессирующей нагрузкой плазменного покрытия диоксид циркония показал наличие четко выделенных стадий разрушения покрытия и соответствующие им пороговые значения критической нагрузки.

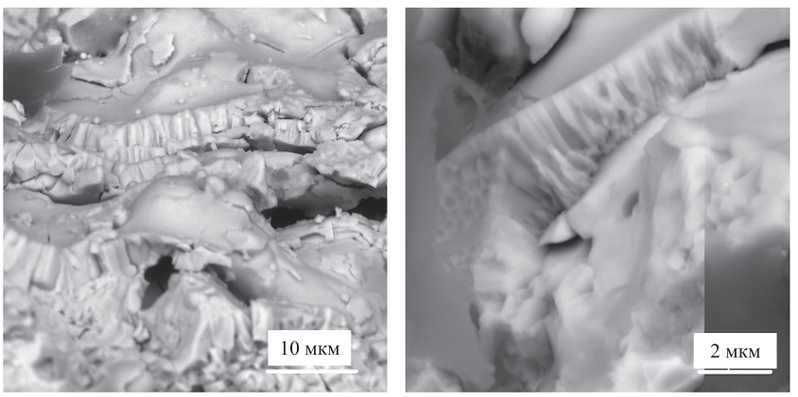
Установлены три стадии разрушения, характерные для данного покрытия:

Стадия 1 (0...20 Н) — стадия пластического оттеснения материала покрытия. Особенностями данной



а) *б)*

Рис. 2. Поперечное сечение покрытия:
а — рабочий слой покрытия (*1*) и интерметаллидный подслой (*2*); *б* — керамическое покрытие диоксид циркония (*1*)



а) *б)*

Рис. 3. Столбчатая структура зерен диоксида циркония в теплозащитном покрытии при различном увеличении

Данные рентгеноструктурного анализа покрытия диоксид циркония

2θ, °	*d*, нм	*I*, отн. ед.	(*hkl*)	Фаза
30,1	0,2965	1	(111)	T-ZrO_2
34,7	0,2587	0,08	(002)	T-ZrO_2
35,3	0,2544	0,18	(200)	T-ZrO_2
50,3	0,1813	0,38	(202)	T-ZrO_2
59,4	0,1557	0,12	(113)	T-ZrO_2
60,0	0,1542	0,29	(311)	T-ZrO_2
62,8	0,1480	0,08	(222)	T-ZrO_2
73,2	0,1293	0,03	(004)	T-ZrO_2
74,2	0,1278	0,07	(400)	T-ZrO_2

Обозначения: θ — угол Брэгга—Вульфа; *d* — межплоскостное расстояние; *I* — интенсивность дифракционного максимума; (*hkl*) — индексы Миллера.

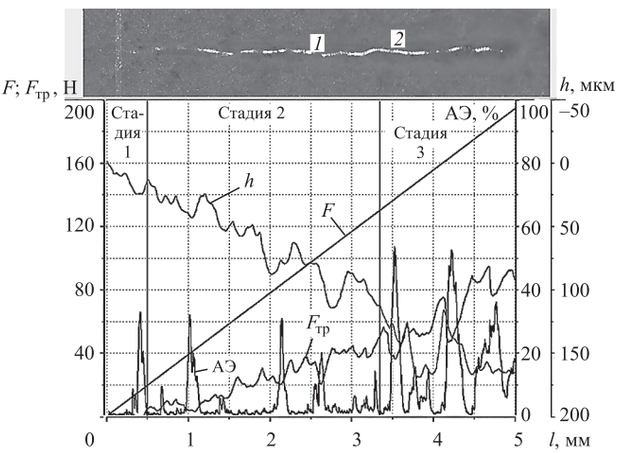


Рис. 4. Скретч-тест с прогрессирующей нагрузкой:
F — нагрузка; $F_{тр}$ — сила трения; *l* — длина царапины; АЭ — сигнал акустической эмиссии; *h* — глубина индентирования; *1*, *2* — зоны резкого и равномерного погружения индентора соответственно

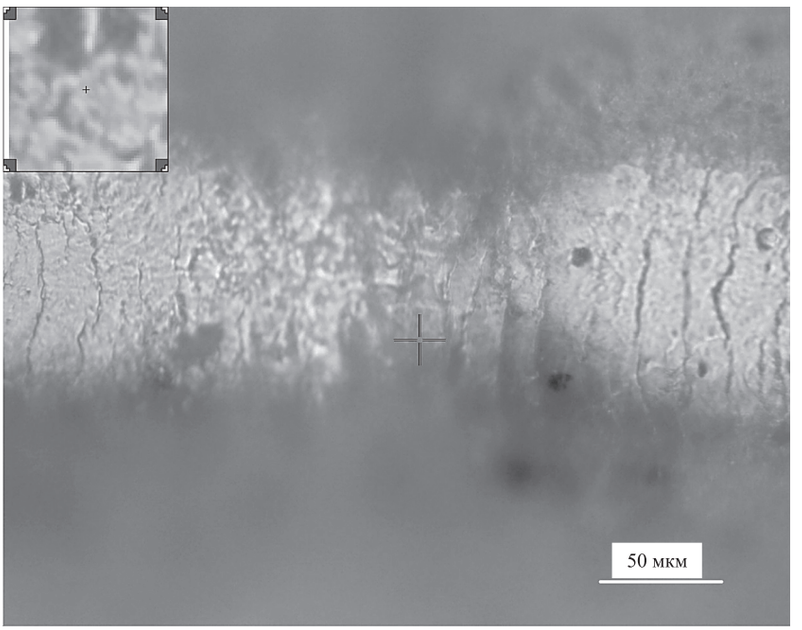
up_118.indd 13 28.12.2017 11:05:47

стадии являются непрерывный вид (нет пиков высокой интенсивности, кривая гладкая) сигнала акустической эмиссии и плавное изменение глубины проникновения и силы трения. Разрушение поверхности покрытия носит характер пластического оттеснения — индентор при скольжении образует след в виде царапины. При этом микросколы и микротрещины на покрытии не образуются, что подтверждает электронно-микроскопический анализ вида царапины.

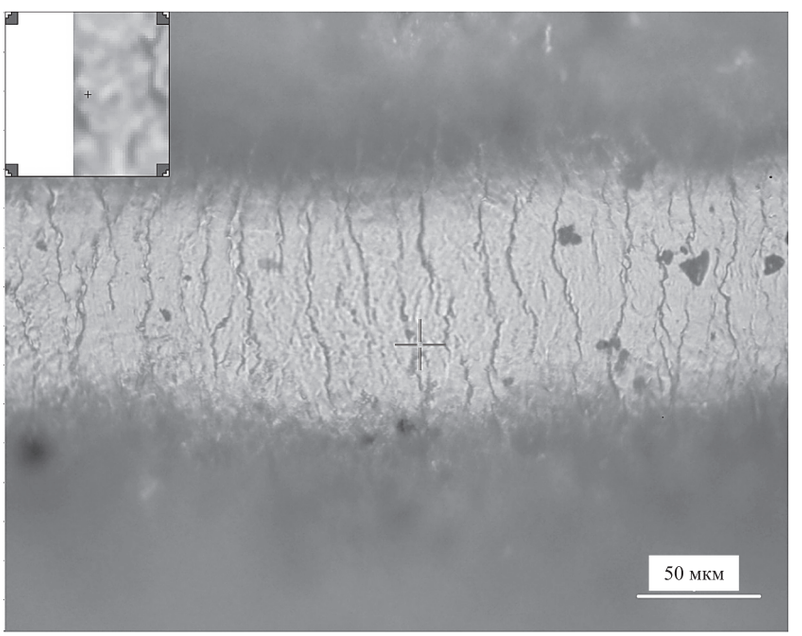
Известно [4], что в поверхностных слоях покрытия присутствует множество одновременно возбуждаемых акустических источников различной энергии (шероховатость покрытия), которые случайным образом распределены по поверхности контакта. В процессе скретч-индентирования происходит высвобождение данных источников энергии (срезание неровностей поверхности покрытия индентором), что проявляется низкоамплитудным ($A_ш < 5$ %, $A_ш$ — амплитуда шума) высокочастотным шумом АЭ.

Стадия 2 (20...135 Н) — стадия микроразрушения покрытия. На этой стадии скретч-теста по мере возрастания нагрузки до 135 Н происходит неравномерное погружение индентора. Вид амплитудно-временно́й зависимости акустической эмиссии становится дискретным с явно выраженными высокоамплитудными пиками. Колебание акустического сигнала с амплитудой $A \approx 10$ % с одновременным падением силы трения обусловлено процессом возникновения микротрещин и структурной неоднородностью покрытия. Более высокие амплитуды акустического сигнала ($A \approx 30$ %) совместно с резким падением силы трения связаны с фрагментарным выкрашиванием и отслоением. Физические причины данных процессов известны и состоят в исчерпании запаса пластичности материала покрытия, вследствие чего релаксация упругих напряжений происходит не в виде пластической деформации, а в виде образования микротрещин и микросколов.

Все изложенное выше подтверждают микроскопические изображения структуры покрытия (рис. 5, 6). При царапании преимущественно происходит хрупкое разрушение покрытия, крупных микротрещин и микросколов не обнаружено. Характерный размер данных микродефектов изменяется от 1 до 10 мкм. При этом на данной стадии фрагмен-



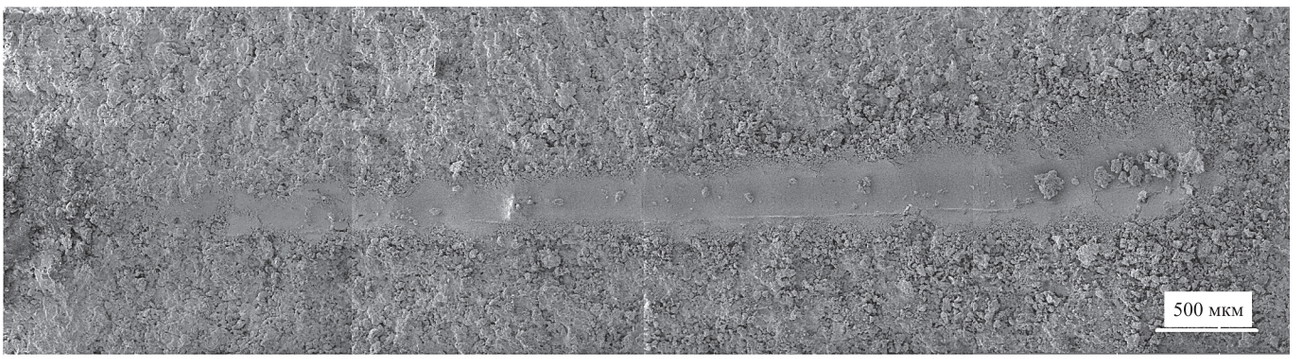
а)



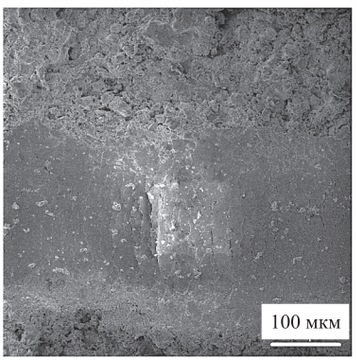
б)

Рис. 5. Характерные зоны царапины:
а — зона резкого погружения индентора; *б* — зона равномерного погружения индентора

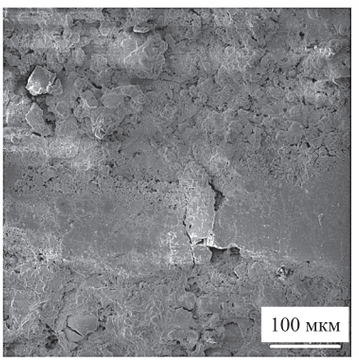
up_118.indd 14 28.12.2017 11:05:48



а)



б)



в)

Рис. 6. Электронное изображение царапины: *а* — панорама; *б* — зона резкого погружения индентора в покрытие (светлая область); *в* — зона частичного отслоения

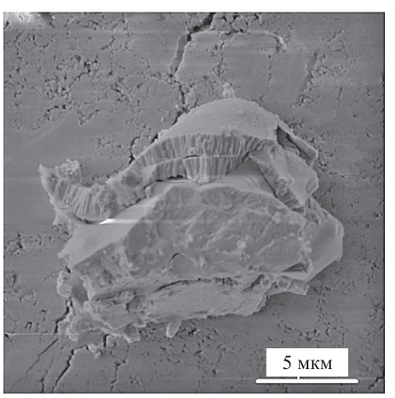
ты сколов имеют преимущественно столбчатую структуру (рис. 7, *а*).

Стадия 3 (135...195 Н) — стадия интенсивного разрушения покрытия. Данная стадия диаграммы скретч-индентирования характеризуется резким увеличением амплитуд пиков акустической эмиссии. В работах [5, 6] показана корреляционная взаимосвязь между амплитудой АЭ и размерами разрывов сплошности в материале. Как показано в [6], информативным параметром состояния материала является интегральная амплитуда пиков АЭ A_Σ,

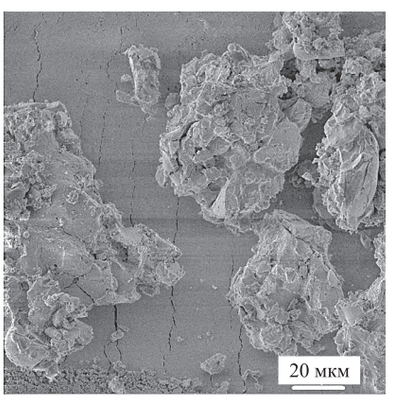
$$A_\Sigma = \frac{\sum A_i}{t},$$

где A_i — амплитуда пика АЭ ($A_i \gg A_ш$); t — время индентирования.

Данная величина служит мерой суммарной длины всех трещин, образовавшихся за единицу времени, следовательно, связана и с интенсивностью разрушения материала. Увеличение A_Σ в 3,2 раза на стадии 3 по сравнению со стадией 2 говорит о потере способности материала покрытия сопротивляться нагрузке и об увеличении масштабов процесса разрушения материала покрытия. Причина состоит в том, что увеличение усилия ведет к увеличению масштаба разрушения. Следует отметить, что отсутствие трещин за пределами царапины после скретч-теста, кроме трещин, которые присутствовали ранее в структуре, говорит о высокой трещиностойкости покрытия.



а)



б)

Рис. 7. Микроструктура частицы скола

На электронно-микроскопическом изображении структуры покрытия (рис. 7, *б*) наблюдается резкое увеличение количества и размеров микротрещин и микросколов. Характерный размер данных мезодефектов составляет 50...100 мкм.

up_118.indd 15 28.12.2017 11:05:48

Выводы

1. По результатам проведенных исследований установлено, что для покрытия диоксид циркония ZrO_2, сформированного методом высокоэнергетического плазменного напыления, характерны три основные стадии разрушения.

2. Для каждой стадии приведены критические нагрузки: стадия оттеснения материала покрытия — 0...20 Н, стадия микроразрушения — 20...135 Н, стадия интенсивного разрушения — 135...195 Н. Данные нагрузки можно принять за количественную характеристику когезионной прочности материала покрытия.

3. Разрушение покрытия происходит между тонкими прослойками со столбчатой структурой зерен диоксида циркония. При достижении нагрузкой критического значения 135 Н происходит фрагментированное хрупкое микроскалывание покрытия с размером сколов от 50 до 100 мкм. Образующиеся при склерометрии микротрещины имеют шевронный вид и не распространяются за пределы русла царапины.

4. Метод скретч-индентирования с нарастающей нагрузкой позволяет получить количественные характеристики когезионной прочности материала покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Теплозащитные** покрытия диоксида циркония, полученные методом высокоэнергетического плазменного напыления, для турбинных лопаток газотурбинных двигателей / Ю.П. Тарасенко, И.Н. Царева, О.Б. Бердник, Д.Г. Федорченко // Вестник Самарского аэрокосмического университета. 2014. № 4. С. 90—98.

2. **Плазменное** напыление износостойких покрытий из порошков самофлюсующихся сплавов / В.И. Кузьмин, С.П. Ващенко, И.П. Гуляев и др. // Вестник Югорского государственного университета. 2015. № 2. С. 45—52.

3. **Повышение** эффективности плазменного напыления порошковых покрытий / В.И. Кузьмин, Е.В. Картаев, С.П. Ващенко и др. // Вестник Югорского государственного университета. 2014. № 2. С. 7—14.

4. **Александров А.С., Елесин В.Ф., Щавелин В.М.** Акустическое излучение при фрикционном взаимодействии шероховатых поверхностей // Поверхность Физика, химия, механика. 1985. № 8. С. 127—132.

5. **Алексеев И.Г., Кудря А.В., Штремель М.А.** Параметры акустической эмиссии, несущие информацию об одиночной хрупкой трещине // Дефектоскопия. 1994. № 12. С. 29—34.

6. **Гусев О.В.** Акустическая эмиссия при деформировании монокристаллов тугоплавких металлов. М.: Наука, 1982. 108 с.

УДК 621.793

С.А. Микаева, А.С. Микаева
(Московский технологический университет, МИРЭА)
E-mail: mikaeva@npo.lit.ru

Технологические исследования структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия

Статья посвящена исследованиям структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия на основе оксида иттербия в зависимости от числа его слоев. Рассмотрено влияние характеристик покрытия на эффективность защиты внутренней стенки кварцевой колбы от воздействия плазмы дугового разряда низкого давления в смеси неона и аргона.

Ключевые слова: *слой, покрытие, трубка, колба, поверхность, технология, исследования.*

The article is devoted to studies of the structure and the exterior surface of protective coating based on oxide of ytterbium, depending on the number of layers. Examined the impact of characteristics of the coating on the efficiency of protection of the inner wall of the quartz bulb from exposure to the plasma arc discharge of low pressure mixture of neon and argon.

Keywords: *layer, coating, tube, flask, surface, technology, research.*

Цель работы — исследование структуры и внешнего вида поверхности защитного покрытия на основе оксида иттербия в зависимости от числа его слоев, а также влияния характеристик покрытия на эффективность защиты внутренней стенки кварцевой колбы от воздействия плазмы

up_118.indd 16 28.12.2017 11:05:48

дугового разряда низкого давления в смеси неона и аргона.

Была проведена оценка внешнего вида поверхности покрытия на основе Yb_2O_3 с разным числом слоев (от одного до четырех). Покрытие наносили на кварцевые колбы, из которых вырезали образцы для исследований [1—4].

Исследование поверхности защитного оксидного покрытия проводили с помощью электронного микроскопа Zeiss Evo 40. Для оценки эффективности использования рассматриваемых покрытий для защиты от воздействия плазмы дугового разряда были изготовлены безамальгамные лампы с внутренним диаметром кварцевой трубки 25 мм и межэлектродным расстоянием 1460 мм. Наполнение — смесь неона с аргоном с соотношением 60/40; давление 0,3 мм рт. ст. Лампы зажигали при помощи электронного пускорегулирующего аппарата (ЭПРА), обеспечивающего их питание переменным током 3,2 А на частоте около 45 кГц. Время горения ламп с разным числом слоев оказалось различным.

При исследованиях покрытий Yb_2O_3 с различным числом слоев и ресурсных испытаниях безамальгамных ламп с этими покрытиями получены следующие результаты.

Однослойное покрытие. Образцы поверхности покрытия брали с разных участков колбы. На образцах видно, что сплошной слой защитного покрытия на кварце выглядит по-разному в разных частях колбы. Это связано с особенностями сушки защитного слоя. Колба сушится в вертикальном положении. Сверху, у штенгеля, слой получается тоньше, чем в середине и на противоположном от штенгеля конце. Соответственно, в нижней части колбы участок слоя самый толстый. Таким образом, при нанесения одного слоя оксида иттербия получается "клин" по толщине слоя. При испытаниях двух ламп с таким покрытием одна проработала 4 ч, вторая — 6 ч.

Двухслойное покрытие. На образцах покрытия на кварце виден довольно плотный слой с вкраплениями и центрами кристаллизации. Предположительно, при нанесении второго слоя увеличивается толщина покрытия. Сушка слоя происходит также вертикально, однако колба висит в положении штенгелем вниз, чтобы выровнять "клин" по толщине покрытия. На образце, вырезанном из края колбы, на котором после первого нанесения покрытия была максимальная его толщина, слой покрытия более ровный и плотный, чем на других частях колбы, также наблюдаются очаги кристаллизации и нет отверстий в слое. Время горения двух ламп с таким покрытием — 24 и 25 ч.

Трехслойное покрытие. Вид поверхности слоя на разных участках колбы практически не различается. Это плотное покрытие практически без отверстий и трещин. Третий слой сушится при положении колбы, аналогичном ее положению при сушке первого слоя, — вертикально, штенгелем вверх. Таким образом, еще больше увеличивается толщина покрытия, "клин", предположительно, сводится к минимуму. Третий слой представляет собой плотное покрытие практически без дефектов, что отразилось и на его защитной способности. Это видно из ресурса двух ламп с таким покрытием. Эти лампы горели значительно дольше, чем лампы с одно- и двухслойным покрытиями, время горения составило 120 и 145 ч.

Четырехслойное покрытие. Вид поверхности покрытия на образцах, вырезанных из разных участков колбы, мало различается. Это плотное покрытие, практически без дефектов и кратеров, вероятно, из-за большого числа слоев. На образцах видно рельефное покрытие (был проведен анализ вещества в темных "впадинах", это также оксид иттрия), скорее всего, при таком числе слоев самый большой по толщине участок покрытия приобретает более развитую поверхность.

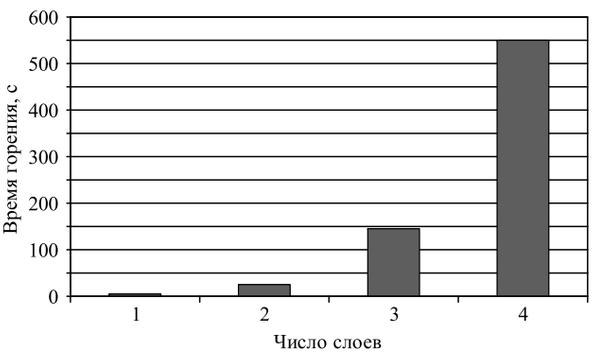
На рисунке приведена зависимость среднего времени работы экспериментальных ламп с дуговым разрядом низкого давления от числа слоев защитного покрытия.

Полученные результаты экспериментальных исследований позволяют сделать следующие выводы:

толщина защитного слоя нелинейно увеличивается при увеличении числа слоев;

увеличение числа слоев увеличивает защитную способность покрытия;

с увеличением числа слоев покрытие становится более плотным, без дефектов, повышается сплошность оксидного слоя, а следовательно, и его защитные свойства.



Зависимость времени горения экспериментальных ламп от числа слоев защитного покрытия

up_118.indd 17 28.12.2017 11:05:48

Усредненное относительное уменьшение пропускания трубки ДДС-30 с покрытиями с различным числом слоев

Место определения усредненного пропускания излучения	Один слой		Два слоя, новые		Два слоя, регенерация	
	Значение	Отклонение	Значение	Отклонение	Значение	Отклонение
Вся трубка	6,3	2,8	6,7	2,8	8,7	4,5
Центр	5,8	2,3	7,0	2,9	7,6	5,2
59 см от центра (рядом со штенгелем)	8,1	3,6	7,2	4,4	11,9	7,0
40 см от центра	—	—	6,0	3,2	6,7	4,8
53 см от центра (в сторону от штенгеля)	5,0	3,5	—	—	—	—

Далее экспериментальные исследования покрытий проводили на трубках дуговых бактерицидных ультрафиолетовых ламп ДДС-30 мощностью 30 Вт. Для исследований использовали монохроматор с шириной щели 0,7 мм; решетка 1200; реплика 1. Монохроматор выставляли на длину волны 254 нм, напряжение питания фотоэлектронного умножителя (ФЭУ) 1,9 кВ. ФЭУ нагружался на резистор с сопротивлением 1 МОм, напряжение на котором измерялось мультиметром MY-63.

Пропускание излучения определяли как квадратный корень отношения сигналов с ФЭУ при наличии трубки и без нее. Положение трубки проверяли визуально по расположению падающего пучка излучения. Для наблюдения пучка излучения использовали лист белой бумаги, которая флуоресцирует под действием ультрафиолетового луча излучения.

Для каждой трубки измеряли пропускание излучения в трех сечениях, расположенных на различных расстояниях по длине трубки. В каждом сечении проводили измерения при трех положениях трубки:

для трубок с двухслойным покрытием при расположении штенгеля горизонтально в сторону ДДС-30, вертикально вверх и для минимального уровня сигнала;

для трубок с однослойным покрытием при расположении штенгеля горизонтально в сторону ДДС-30, вертикально вверх и при угле наклона 45° к вертикали в сторону монохроматора.

Усредненное относительное уменьшение пропускания излучения слоями покрытия представлено в таблице.

Анализируя результаты проведенных экспериментальных исследований, можно сделать следующие выводы:

1. Измерение пропускания излучения для кварца с защитным покрытием на длине волны 254 нм не позволяет сделать заключение о качестве покрытия.

2. Основным препятствием служит рассеяние кварца частицами покрытия при его шелушении. Лишь для кварца без шелушения измерение пропускания излучения может давать информацию о качестве покрытия (точнее, не сам результат измерения, а сравнение пропускания излучения для трубок с покрытием и без него для кварца одной партии).

3. Неясно, насколько обеспечивает свои защитные свойства шелушащееся покрытие: возможно, что в зоне шелушения между шелушинками покрытия нет.

4. В настоящее время только по визуальным признакам может быть забраковано до 30 % колб.

5. В настоящее время контроль может осуществляться лишь в процессе нанесения слоя покрытия: по интенсивности восстановленного металла во время отжига, визуально по отсутствию шелушения и по технологическим пробам (время работы до погасания ламп с покрытием).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат, 2004. С. 210.

2. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Экспериментальные исследования характеристик перспективных источников света, приборов и систем. М.: РУСАЙНС, 2017. С. 136.

3. **Микаева С.А.** Разработка и исследование технологии производства компактных люминесцентных ламп информационно-измерительных приборов и систем. М., МГУПИ, 2007. С. 286.

4. **Микаева С.А., Микаева А.С.** Технология производства для нанесения покрытия на компактные люминесцентные лампы // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 11. С. 24—29.

up_118.indd 18 28.12.2017 11:05:48

УДК 621.791/.792

М.З. Нафиков, И.Р. Шакиров, И.И. Загиров, Н.М. Юнусбаев
(Башкирский государственный аграрный университет, г. Уфа)
E-mail: nafikovmz@rambler.ru

Остаточные напряжения в металле покрытия, нанесенного электроконтактной приваркой двух растянутых проволок

Предлагается восстанавливать изношенные детали сельскохозяйственной техники электроконтактной приваркой двух растянутых проволок. Проведены исследования по определению остаточных напряжений на восстановленных образцах из стали 45 и 30ХГСА. Сделано сравнение полученных результатов с данными по другим способам восстановления.

Ключевые слова: *электроконтактная приварка, металлопокрытие, растягивание, остаточные напряжения.*

It is proposed to restore worn parts of agricultural machinery by the resistance welding of two stretched wires. Studies are undertaken to determine the residual stresses on the restored samples of the steel 45 and 30KhGSA. The comparison of the obtained results is made with data from other methods of the restoration.

Keywords: *resistance welding; metal coating; stretching; residual stress.*

Введение

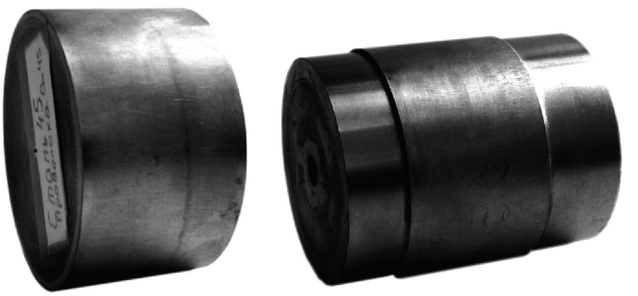
При восстановлении изношенных деталей сварочными методами при остывании металлопокрытий в них формируются растягивающие остаточные напряжения термической природы. Неоднородность температурных полей при наплавке деталей по винтовой линии способствует неоднородности структуры металла покрытия, а также отклонениям значений остаточных напряжений от средних значений. Нередко значения остаточных напряжений в покрытиях превышают предел текучести основного и присадочного металлов. Из-за этого в сварных швах возникают закалочные трещины, снижается усталостная прочность восстановленных деталей. Одним из немногих способов восстановления, при которых в покрытии могут формироваться благоприятные сжимающие остаточные напряжения, является способ электроконтактной приварки стальных проволок (ЭКПП) [1, 2].

В Башкирском ГАУ разработана технология электроконтактной приварки одним роликом-электродом одной или одновременно двух растянутых присадочных проволок. Дополнительное силовое воздействие на проволоки приводит к увеличению их осевой пластической деформации, позволяет полностью исключить явление непровара в стыках смежных сварных валиков [3]. Однако возникло опасение, что дополнительное растяжение проволок при их приварке приведет к появлению в металлопокрытии неблагоприятных напряжений сжатия.

Цель исследования — получить данные об остаточных напряжениях в деталях, восстановленных электроконтактной приваркой растянутых проволок, и сравнить результаты с данными для традиционно применяемых технологий ЭКПП.

Метод и методика измерения остаточных напряжений

Для экспериментов изготовили образцы цилиндрической формы диаметром 57 мм: № 1 из стали 45, № 2 из стали 30ХГСА (рис. 1). Для приварки на наплавочной установке ЭКП 011-1-02 конструкции ГосНИТИ применяли присадочные проволоки диаметром 1,8 мм, химический состав которых соответствовал сталям 65Г и 30ХГСА. Образцы наваривали одним роликом-электродом диаметром 300 мм одновременно двумя касающи-



а) *б)*

Рис. 1. Образцы № 1 (*а*) и № 2 (*б*)

up_118.indd 19 28.12.2017 11:05:48

мися образующими присадочными проволоками. При приварке проволоки растягивали, каждую усилием 40 Н.

Режим приварки по винтовой линии подбирали исходя из условия обеспечения максимально высокой осевой пластической деформации проволок; он обеспечивал прочность сварного соединения, равную прочности основного металла образцов.

Остаточные напряжения в поверхностном слое образцов с нанесенным покрытием определяли разработанным в Челябинском государственном аграрном университете методом, основанным на использовании упругопластического контактного взаимодействия (метод пенетрации). Принцип метода заключается в использовании закономерностей взаимосвязи между деформированным состоянием поверхности в условиях локального (точечного) упругопластического контактного нагружения и остаточными напряжениями в поверхностном слое детали. Метод относится к неразрушающим способам контроля, является малотрудозатратным и дает возможность определять остаточные напряжения в конкретной точке поверхности [4—6]. В качестве индентора использовали шарик диаметром 10 мм, усилие вдавливания составляло 1471,3 Н. Измерение предела текучести металла покрытия $\sigma_т^{м.п}$ выполняли при тех же параметрах вдавливания индентора.

Для измерения перемещений применяли оптический метод электронной спекл-интерферометрии с регистрацией нормальной компоненты вектора перемещения, а в качестве исходной информации — нормальные деформационные перемещения.

Результаты измерения остаточных напряжений и их обсуждение

Схема замеров остаточных напряжений на поверхности металла покрытия представлена на рис. 2.

Образец № 1: число измерений — 5; среднее значение предела текучести основного металла (сталь 45) — (430 ± 30) МПа, среднее значение предела текучести металла покрытия (сталь 65Г) — (890 ± 40) МПа.

Образец № 2: число измерений — 5; среднее значение предела текучести основного металла (сталь 30ХГСА) — (610 ± 40) МПа, среднее значение предела текучести металла покрытия (сталь 30ХГСА) — (1480 ± 70) МПа.

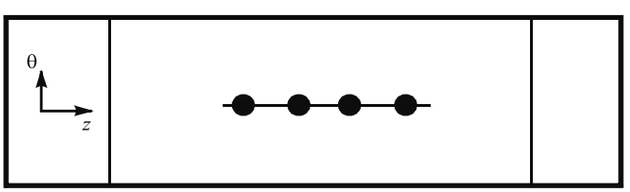


Рис. 2. Схема измерений напряжений на образцах

Измерение поверхностных остаточных напряжений образцов проводили в разных зонах наваренной поверхности за пределами участков краевого эффекта.

По результатам измерений определено, что в поверхностном слое образцов как осевые (действующие вдоль продольной оси образца) σ_z, так и окружные σ_θ остаточные напряжения по величине незначительны.

В образце № 1 осевые остаточные напряжения σ_z составляют 0,022 ± 0,03 от предела текучести металла покрытия, окружные σ_θ равны −0,01 ± 0,03 от предела текучести металла покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: σ_z = = 21 ± 28 МПа, σ_θ = −9 ± 27 МПа.

В образце № 2 осевые остаточные напряжения σ_z составляют 0,081 ± 0,06 от предела текучести металла покрытия, окружные σ_θ равны −0,017 ± 0,08 от предела текучести металла покрытия. Абсолютные значения остаточных напряжений: σ_z = = 122 ± 95 МПа, σ_θ = −18 ± 116 МПа.

В образце № 1 интенсивность остаточных напряжений, определяемая по энергетической теории, находится в пределах 25...75 МПа; в образце № 2 — в пределах 130...310 МПа. Это позволяет сделать заключение о невысокой загруженности поверхностного слоя образцов.

Результаты измерения остаточных напряжений в образцах № 1 и 2 иллюстрируются графиками, приведенными на рис. 3.

Для сравнения в таблице представлены данные по остаточным напряжениям в покрытиях, сформированных электроконтактной приваркой различных присадочных материалов. Данные заимствованы из работ [1, 6—9] и др.

Можно заметить, что при контактной наплавке металлических лент и напекании металлических порошков различного состава в покрытиях формируются очень большие по величине неблагоприятные по направлению растягивающие остаточные напряжения термической природы. Неблагоприятные остаточные напряжения формируются и в металлопокрытиях, нанесенных электродуговыми способами.

При всех вариантах ЭКПП в нанесенном слое остаточные напряжения практически нулевые, в некоторых случаях они, хоть и небольшие по величине, но благоприятные, сжимающие. Термические по физической природе напряжения при рассматриваемом способе восстановления в момент их зарождения снимаются в результате термомеханического воздействия со стороны ро-

up_118.indd 20 28.12.2017 11:05:49

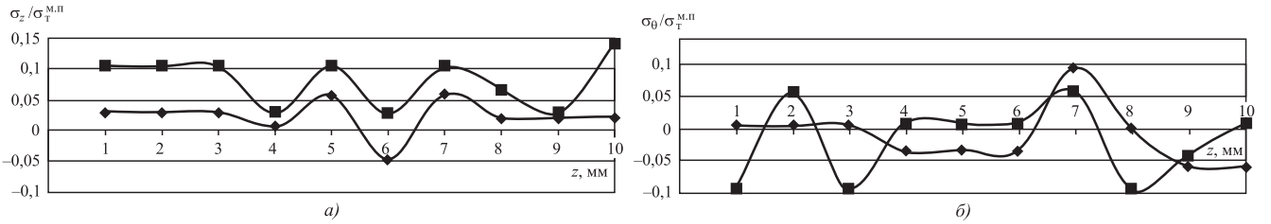


Рис. 3. Результаты измерения осевых (*а*) и окружных (*б*) остаточных напряжений:
-◆- образец № 1; -■- образец № 2

Остаточные напряжения (средние значения) на поверхностях деталей, восстановленных электроконтактными способами с применением различных присадочных материалов

Основа	Покрытие	$\sigma_z/\sigma_т$	$\sigma_\theta/\sigma_т$
Чугун ВЧ 60	ПЖ-2	0,14	0,49
Чугун ВЧ 60	70С2ХА (проволока)	0,26	0,22
Чугун ВЧ 60	ПЖ-2 + металлическая сетка	0,41	0,52
Чугун ВЧ 60	Сталь У8А	0,73	0,71
Сталь 45	Сталь 45 (лента)	0,88	0,87
Сталь 20Х13	Сталь 20Х13 (лента)	0,72	0,64
Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т (лента)	0,78	0,62
Сталь 45	ПР-Х11Г4СР (порошок + металлическая лента)	0,67	0,68
Сталь 45	СЧ-18 (порошок)	0,92	0,88
Чугун ВЧ 60	ПЖ-2	0,14	0,49
Сталь 45	Сталь 65Г ПК-2 (две проволоки)	0,124	−0,079
Сталь 30ХГСА	Проволока 30ХГСА (две проволоки)	0,142	−0,099
Сталь 45	Сталь 45 ПК-2 (две проволоки)	−0,03	0,04
Сталь 45	Сталь 65Г ПК-2 (две проволоки с растяжением)	0,022	−0,01
Сталь 30ХГСА	Проволока 30ХГСА (две проволоки)	0,081	−0,017
Сталь 65Г	ПГ12Н-02 (ТУ 48-19-383, толщина слоя 2 мм)	0,17	0,18
Сталь 65Г	ПГ12Н-02 (ТУ 48-19-383, толщина слоя 1,5 мм)	0,29	0,29
Сталь 65Г	ПГ12Н-02 (ТУ 48-19-383, толщина слоя 1 мм)	0,27	0,24
Сталь 45	Сталь 12Х18Н10Т (ГОСТ 5632—72, лента)	0,93	0,9
Сталь 45	Сталь 45 (приварка ленты, два прохода)	0,25	0,21
Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т (сетка, три слоя)	0,09	−0,15
Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т (сетка, два слоя)	0,11	−0,12
Сталь 12Х18Н10Т	Комбинированная присадка (порошок 316L + сетка 12Х18Н10Т + + 10 % чугунного порошка КЧ30-6)	0,08	−0,12
Сталь 12Х18Н10Т	Сталь 12Х18Н10Т (лента)	0,78	0,64
Сталь 45	ПР-Х11Г4СР (порошок + металлическая сетка)	0,67	0,68
Сталь 45	Сталь 45 (тканая сетка)	0,3	0,27
Сталь 45	Сталь 65Г (вибродуговая наплавка проволокой ПК-2 + + термомеханическая обработка)	0,04...−0,26	−0,33...−0,75

up_118.indd 21 28.12.2017 11:05:49

лика-электрода на разогретый до пластического состояния присадочный металл.

Таким образом, присадочный материал в форме проволок выгодно отличается в плане формирования остаточных напряжений от металлических лент и порошков. Этим предотвращается значительное снижение усталостной прочности восстановленных деталей.

Выводы

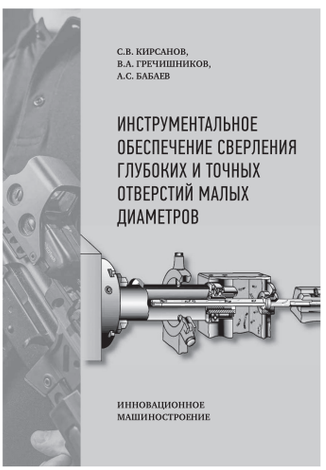
Анализ литературных источников позволяет заключить, что почти при всех способах восстановления изношенных деталей в металлопокрытиях образуются значительные по величине остаточные напряжения растягивающего характера. В этом плане выгодно отличается способ ЭКПП, позволяющий формировать хоть и небольшие, но благоприятные по направлению остаточные напряжения. Такой эффект объясняется термомеханическим воздействием инструмента — ролика-электрода на металл присадки, разогретый до пластического состояния.

Значения как осевых, так и окружных остаточных напряжений в покрытии, сформированном ЭКПП растянутой проволоки, практически такие же, как и при приварке нерастянутой. Дополнительное растяжение проволок при их приварке не оказывает существенного влияния на процесс формирования остаточных напряжений в поверхностном слое детали.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Электроконтактная** приварка. Теория и практика / Р.А. Латыпов, В.В. Булычев, Бурак П.И. и др. // Курск: Университетская книга, 2016. 392 с.
2. **Ибрагимов В.С., Мамлеев Ч.М., Нафиков М.З.** Электроконтактная наплавка автотракторных валов // Техника в сельском хозяйстве. 1980. № 12. С. 40—42.
3. **Контактная** приварка растянутой присадочной проволоки / М.З. Нафиков, И.И. Загиров, Н.М. Юнусбаев и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 5 (149). С. 198—204.
4. **Игнатьев А.Г., Третьяков А.А.** Измерение остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора // Агропродовольственная политика России. 2015. № 1 (13). С. 48—51.
5. **Игнатьев А.Г., Третьяков А.А.** Новая методика измерения остаточных напряжений в восстановленных деталях с использованием конического индентора // Контроль. Диагностика. 2015. № 6. С. 26—30.
6. **Игнатьев А.Г.** Диагностирование поверхностных остаточных напряжений в металлических покрытиях, нанесенных при восстановлении деталей сельскохозяйственной техники: дис. ... д-ра техн. наук. Челябинск, 2008. 324 с.
7. **Фархшатов М.Н.** Ресурсосберегающие технологии восстановления деталей сельскохозяйственных техники и оборудования электроконтактной приваркой коррозионно-стойких и износостойких материалов: дис. ... д-ра техн. наук. Уфа, 2007. 527 с.
8. **Нафиков М.З., Загиров И.И., Игнатьев А.Г.** Остаточные напряжения в металлопокрытии, нанесенном электроконтактной наплавкой // Технология металлов. 2008. № 9. С. 29—32.
9. **Исследование** остаточных напряжений в упрочненных и восстановленных деталях / А.Ф. Фаюршин, Р.Р. Хакимов, И.И. Багаутдинова, А.А. Третьяков // Ремонт, восстановление, модернизация. 2016. № 1. С. 39.

ИнМаш ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



Кирсанов С.В., Гречишников В.А., Бабаев А.С.

ИНСТРУМЕНТАЛЬНОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ СВЕРЛЕНИЯ ГЛУБОКИХ И ТОЧНЫХ ОТВЕРСТИЙ МАЛЫХ ДИАМЕТРОВ

Под общ. ред. С.В. Кирсанова. 2016 г. 188 с.

Цена 600 руб.

Рассмотрены современные конструкции ружейных свёрл с твердосплавными стеблями, применяемые для сверления глубоких и точных отверстий малых диаметров. Даны рекомендации по их проектированию, изготовлению и эксплуатации. Приведены сведения о технологических возможностях этих инструментов.

Для технологов и конструкторов машиностроительных предприятий, может быть полезна студентам втузов.

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

up_118.indd 22 28.12.2017 11:05:49

УДК 621.793

С.С. Дружков, Д.И. Волков, Э.В. Киселев
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва)
E-mail: drugkov.s.s@rambler.ru

Повышение производительности магнетронного напыления износостойких 3D-нанокомпозитных покрытий на основе параметрической оптимизации давления газа в вакуумной камере

Рассмотрена возможность повышения эффективности процесса магнетронного напыления упрочняющих покрытий металлорежущего инструмента. Для решения данной задачи предлагается методика параметрической оптимизации давления газа в процессе напыления 3D-нанокомпозитных покрытий металлорежущего инструмента, обеспечивающая максимизацию производительности установки для напыления без ухудшения качественных характеристик получаемых покрытий. Рассмотрено применение методики для конкретной установки магнетронного напыления Unicoat 400.

Ключевые слова: *магнетронное напыление, производительность, параметрическая оптимизация, рабочее давление.*

Discusses the possibility of increasing the efficiency of the process magnetron sputtering hard coatings of cutting tools. To solve this problem is proposed the methodology of parametric optimization of gas pressure in the process of deposition of 3D nanocomposite coatings of cutting tools, ensuring maximization of productivity for the deposition without deterioration of the quality characteristics of the obtained coatings. Reviewed application techniques for specific installation magnetron sputtering "Unicoat 400".

Keywords: *magnetron deposition, performance, parametric optimization, working pressure.*

Введение

Применение инструмента с износостойкими покрытиями является в настоящее время одним из эффективных средств достижения высокого уровня производительности металлообработки. Износостойкие покрытия, обладающие необходимыми служебными характеристиками, будучи нанесенными на рабочую поверхность режущего инструмента, передают их ему, не изменяя при этом свойств основного материала. Применение такого металлорежущего инструмента позволяет повысить производительность обработки, изготавливать детали из труднообрабатываемых материалов, а также способствует развитию автоматизированного производства.

Наиболее перспективным методом нанесения упрочняющих покрытий является магнетронное напыление, обеспечивающее формирование совершенной нанокомпозитной структуры покрытия с высокой гладкостью поверхности, обладающей низким коэффициентом трения и гарантирующей эффективную защиту от износа и окисления при повышенных температурах. Несмотря на это данный метод нанесения покрытий не получает промышленного распространения ввиду низкой скорости их осаждения. Таким образом, поиск способов повышения производительности установок магнетронного синтеза упрочняющих 3D-нанокомпозитных покрытий для металлорежущего инструмента является актуальной научно-технической задачей, решение которой позволит обеспечить распространение данного метода и выпуск конкурентоспособного отечественного металлорежущего инструмента.

В данной работе предлагается методика параметрической оптимизации давления газа в процессе напыления 3D-нанокомпозитных покрытий

up_118.indd 23 28.12.2017 11:05:49

металлорежущего инструмента, обеспечивающая максимальную (в существующих условиях) производительность установки для напыления без ухудшения качественных характеристик получаемых покрытий. Методика разработана на основе исследования и математического анализа зависимости между основными параметрами магнетронной системы и давлением газа в вакуумной камере магнетронной установки Unicoat 400. В результате предложен научно обоснованный аналитический подход параметрической оптимизации процесса магнетронного нанесения упрочняющих покрытий для металлорежущих инструментов. Достоинством методики является то, что она позволяет без проведения длительных и трудоемких экспериментальных исследований, лишь на основании первоначально сформированной модели, определить оптимальное значение рабочего давления в процессе синтеза упрочняющих покрытий, соответствующее максимально возможной производительности напыления и максимально достижимому качеству покрытий, с учетом действующих технологических условий.

Постановка задачи исследований

Упрочняющие нанокомпозитные покрытия, получаемые методом магнетронного напыления, характеризуются высокой твердостью, вязкостью, теплостойкостью и низким коэффициентом трения. Эти свойства покрытий предопределяются малым размером кристаллов и большой объемной долей границ зерен. Механизм повышения рабочих характеристик основан на том, что данные материалы имеют сбалансированное соотношение между твердостью, определяющей износостойкость, и прочностными характеристиками. Однако скорость осаждения покрытия при магнетронном методе его формирования существенно ниже в сравнении с другими методами нанесения покрытий, что препятствует его промышленному распространению. Поэтому в качестве параметра оптимизации в данном случае была выбрана скорость осаждения покрытия, математическая модель которой формируется при интеграции эмпирических зависимостей для основных ее составляющих, определяемых путем автоматизированной обработки экспериментальных данных по исследованию конкретной установки, с теоретическими формулами.

Рабочее давление газа в процессе магнетронного напыления является количественным выражением действующего комплекса качественных условий процесса. Кроме того, оно находится в динамической взаимосвязи с другими технологическими параметрами процесса (разрядным током и напряжением разряда, током и напряжением смещения, концентрацией реактивного газа, скоростью прокачки, расходов газов). Следовательно, путем целенаправленной манипуляции давлением газа в вакуумной камере можно оказать влияние на ход процесса напыления и качество получаемых покрытий. Поэтому давление газа в вакуумной камере выбрано в качестве оптимизируемого параметра.

В связи с изложенным осуществление параметрической оптимизации давления может быть выполнено за два этапа.

Планируемые этапы исследований

Первый этап заключается в получении регрессионных зависимостей для основных факторов, определяющих процесс осаждения покрытия:

зависимости напряжения разряда от давления газа $U_d = f(p)$;

зависимости напряжения разряда от силы разрядного тока $U_d = f(I_d)$;

зависимости разрядного тока от напряжения и давления газа $I_d = f(U_d, p)$;

зависимости показателя эффективности процесса напыления от давления газа $\eta = f(p)$.

Необходимость получения уравнений регрессии для конкретных условий процесса магнетронного напыления обусловлена тем, что они в наиболее достоверной форме по сравнению с теоретическими зависимостями универсального характера отражают соответствующие взаимосвязи режимных параметров установки. Данная задача в предлагаемой методике решается путем использования табличного процессора Microsoft Excel для статистической обработки экспериментальных данных. Благодаря полному использованию функциональных возможностей данной программы происходит быстрое преобразование числового массива данных экспериментов в регрессионные зависимости.

Второй этап состоит в построении и графическом отображении оптимизационной модели с учетом полученных уравнений регрессии. Эта задача решается путем использования программной среды MathCAD, в которой осуществляется формирование оптимизационной модели из ее условно-постоянных элементов, характеризующихся общностью для широкого диапазона условий, и переменных элементов, которыми являются полученные в ходе экспериментов уравнения регрессии. Математическое выражение оптимизационной модели имеет графическое представление для быстрого поиска экстремальных состояний. Таким образом, предлагаемая методика параметрической оптимизации давления газа в процессе магнетронного напыления реализуется по схеме, представленной на рис. 1.

up_118.indd 24 28.12.2017 11:05:50

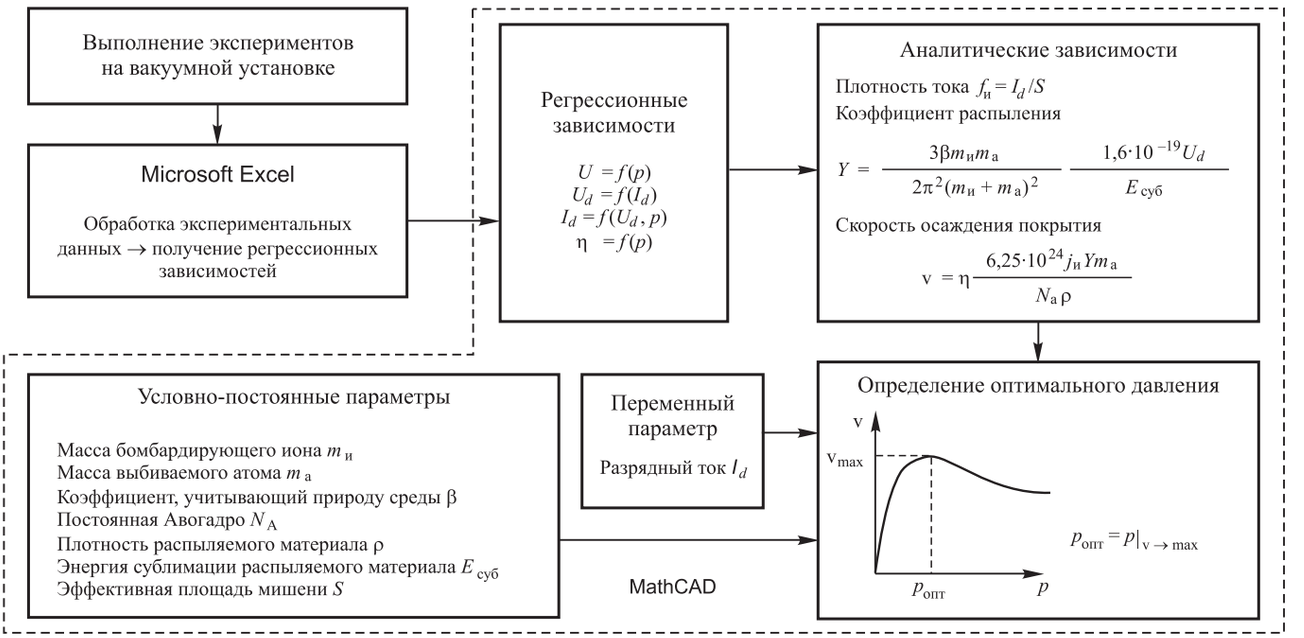


Рис. 1. Схема определения оптимального давления газа по критерию скорость осаждения покрытия

Выполнение исследований

В рамках выполненных исследований проводили оптимизацию давления газа в вакуумной камере установки магнетронного напыления модели Unicoat 400 при непосредственной реализации процессов магнетронного напыления упрочняющих покрытий.

Экспериментальные исследования взаимосвязи составляющих элементов скорости процесса напыления с давлением газа в процессе работы дуальной несбалансированной магнетронной распылительной системы свидетельствовали о необходимости частичной корректировки либо полной замены существующих их математических описаний эмпирическими аналогами, которые в большей степени соответствуют реальности [1].

При корректировке модели коэффициента распыления ограничились лишь замещением переменной ее части, соответствующей функции зависимости энергии ионов от давления. В результате определили непосредственную взаимосвязь коэффициента распыления с давлением газа в камере:

$$Y = \frac{3\beta m_{\text{и}} m_{\text{а}}}{2\pi^2 \left(m_{\text{и}} + m_{\text{а}}\right)^2} \frac{450 \cdot 10^{-19}}{E_{\text{суб}} p^{0,21}}, \qquad (1)$$

где Y — коэффициент распыления, атом/ион; β — коэффициент, функционально определяемый по соотношению масс атома и иона; $m_{\text{и}}$ — мольная масса бомбардирующего иона, кг/моль; $m_{\text{а}}$ — мольная масса выбиваемого атома, кг/моль; $E_{\text{суб}}$ — энергия сублимации, Дж.

Модель зависимости плотности ионного тока от давления газа была сформирована на основании результатов исследований вольт-амперных характеристик (ВАХ) магнетронной системы установки Unicoat 400 при различных значениях давления газа в камере. Статистическая обработка результатов экспериментов позволила получить модель зависимости напряжения разряда от силы разрядного тока и давления газа, которая с учетом условий эксперимента впоследствии была преобразована в модель плотности ионного тока

$$j_{\text{и}} = 2083 \ln\left(1,44 \mathrm{e}^{0,04 I_d} p^{0,21}\right), \qquad (2)$$

где $j_{\text{и}}$ — плотность ионного тока, А/м^2; I_d — разрядный ток, А.

Экспериментальное определение взаимосвязи давления газа и эффективности напыления состояло в многократной реализации технологического процесса нанесения покрытия на образцы-свидетели при различных значениях рабочего давления, что сопровождалось измерением масс распыляемых мишеней и образцов-свидетелей до и после напыления. Статистическая обработка результатов эксперимента позволила определить эмпирическую зависимость эффективности процесса напыления от давления газа в вакуумной камере

$$\eta = 0,047 p^{-0,79}, \qquad (3)$$

где η — показатель эффективности процесса напыления.

up_118.indd 25 28.12.2017 11:05:50

Таким образом, автоматизированная обработка экспериментальных данных в среде Microsoft Excel позволила получить математические модели основных составляющих скорости осаждения покрытия. Интеграция составляющих элементов скорости осаждения происходит в среде MathCAD в соответствии с теоретическими зависимостями [2—5]. Таким образом, для осуществления расчета необходимо задать:

эмпирические уравнения;

теоретические составляющие (для коэффициента распыления, плотности тока и обобщенной зависимости скорости осаждения);

значения постоянных факторов формул в рамках условий оптимизируемого процесса (функцию β от соотношения масс атома и иона, массу бомбардирующего иона $m_и$, массу выбиваемого атома $m_а$, число Авогадро $N_А$, плотность распыляемого материала ρ, энергию сублимации распыляемого материала $E_{суб}$);

области допустимых значений переменных факторов (разрядного тока I_d и давления газа в вакуумной камере p).

Значения постоянных факторов в формулах принимаются на основании справочной литературы. Области допустимых значений переменных факторов полностью определяются конструктивными особенностями и функциональными возможностями установки для нанесения покрытий. В рамках выполненных исследований границы варьирования выбранных параметров были определены на основании технической документации к магнетронной установке Unicoat 400 (p = 0,1...0,5 Па; I_d = 0,5...6 А) [6].

В рамках выполненной работы путем объединения полученных эмпирических зависимостей (1), (2), а также с учетом теоретических зависимостей [4, 5] была определена теоретико-экспериментальная зависимость скорости осаждения покрытия от давления газа в вакуумной камере

$$v = \frac{4,2 \cdot 10^{10} \beta m_и m_а^2}{\pi^2 (m_и + m_а)^2 N_А \rho E_{суб}} \frac{\ln\left(1,44 p^{0,21} e^{0,04 I_d}\right)}{p}. \quad (4)$$

Данная математическая модель может рассматриваться как целевая функция для оптимизации давления газа в вакуумной камере и реализации энергоэффективных условий протекания процессов ионно-плазменного магнетронного напыления.

Результаты исследований

Программная среда MathCAD позволила преобразовывать сложные математические зависимости в графические интерпретации функции нескольких переменных. Графическая интерпретация зависимости (4) представлена на рис. 2.

Анализируя график, приведенный на рис. 2, можно заключить, что он хорошо отражает характер протекания процесса напыления покрытия при одновременном варьировании значениями разрядного тока и давления газа. Отрицательные значения скорости осаждения покрытия в области давлений 0...0,1 Па на всем диапазоне варьирования тока объясняются неспособностью используемых несбалансированных магнетронов НМ-И-400 обеспечить поддержание тлеющего разряда в данных условиях. Кроме того, очевидно, что на всем диапазоне варьирования силы тока разряда I_d = 0,5...6 А оптимальные значения давления заключены в пределах 0,15...0,4 Па, причем меньшим значениям тока соответствуют бóльшие значения давления, что свидетельствует о необходимости увеличения давления газа при снижении разрядного тока для достижения максимально возможной скорости осаждения.

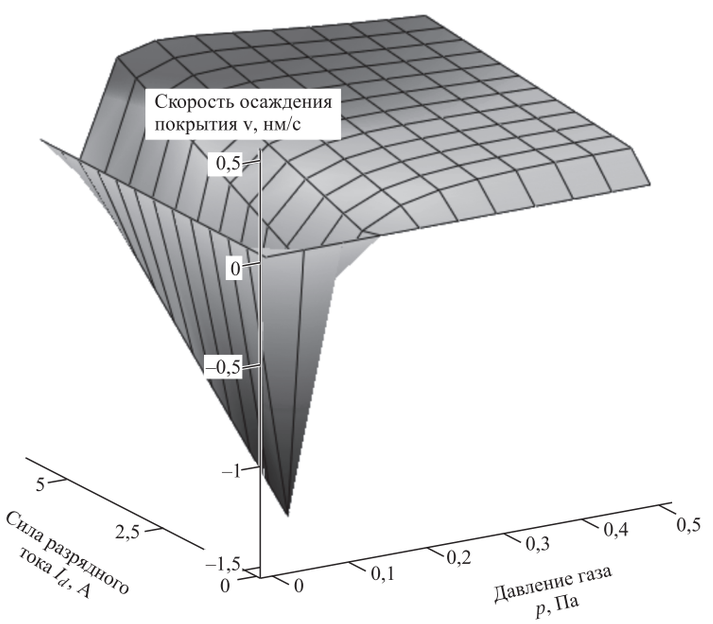


Рис. 2. Зависимость скорости осаждения покрытия v от давления газа p и разрядного тока I_d (установка Unicoat 400; материал ВТ1-0; рабочий газ — аргон; максимальное напряжение разряда $U_{d\,max}$ = 650 В; параметры блока смещения: U_b = 40 В; I_b = 1 А)

Заключение

1. В ходе выполненного анализа математического описания и практической специфики ионно-плазменного магнетронного синтеза упрочняющих покрытий установлено,

up_118.indd 26 28.12.2017 11:05:50

что наиболее рациональным способом повышения эффективности процесса магнетронного напыления является параметрическая оптимизация давления газа по скорости осаждения покрытия.

2. Предложенная методика параметрической оптимизации давления газа в процессе напыления 3D-нанокомпозитных покрытий металлорежущего инструмента позволяет получить теоретико-экспериментальную зависимость скорости осаждения покрытия от физических параметров процесса напыления для установки Unicoat 400 и рассчитать оптимальное значение давления газа в вакуумной камере, соответствующие максимальной скорости осаждения покрытия.

3. Параметрическая оптимизация давления газа в вакуумной камере установки магнетронного напыления по критерию скорость осаждения покрытия с учетом конкретных условий выявила необходимость увеличения давления газа при снижении разрядного тока для достижения максимально возможной скорости осаждения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Дружков С.С.** Математическое моделирование процесса магнетронного распыления // Вестник УГАТУ. 2013. Т. 17, № 8 (61). С. 128—133.

2. **Ключарев А.Н., Мишаков В.Г., Тимофеев Н.А.** Введение в физику низкотемпературной плазмы. СПб., СПбГУ, 2008. 214 с.

3. **Райзер Ю.П.** Физика газового разряда. М.: Наука, 1992. 536 с.

4. **Григорьев Ф.И.** Осаждение тонких пленок из низкотемпературной плазмы и ионных пучков в технологии микроэлектроники. М., Моск. гос. ин-т электроники и математики, 2006. 35 с.

5. **Данилин Б.С., Киреев В.Ю.** Ионное травление микроструктур. М.: Советское радио, 1979. 103 с.

6. **Агабеков Ю.В., Сутырин А.М., Мачикин В.С.** Лабораторная вакуумная установка магнетронного нанесения многофункциональных нанокомпозитных покрытий "UNICOAT 400". Руководство по эксплуатации. Дзержинск: Элан-Практик, 2010. 56 с.

УДК [669.14:621.9.048.4]:620.178.162

П.Г. Овчаренко, А.Ю. Лещев, В.В. Тарасов
(Институт механики Уральского отделения РАН, г. Ижевск),
И.С. Трифонов
(Ижевский государственный технический университет им. М.Т. Калашникова)
E-mail: ovcpg@yandex.ru

Сравнительная характеристика износостойкости поверхностных слоев, полученных электроискровым легированием

Представлены результаты сравнительных испытаний на абразивное изнашивание поверхностных слоев, сформированных электроискровым легированием на образцах из материала Р6М5. Показано влияние материала электрода на характеристики износостойкости. Для поверхностного легирования электроискровым способом применяли графитовый, твердосплавный (ВК10) и феррохромовый (ФХ010) электроды. Отражена зависимость фазового состава и структуры легированного поверхностного слоя от материала упрочняемого электрода.

Ключевые слова: *износостойкость, электроискровое легирование, упрочняющие электроды, поверхностные слои.*

The results of comparative tests by the abrasive wear of surface layers formed on samples from the P6M5 material by electrospark alloying are presented. The influence of the electrode material on the wear resistance characteristics is shown. For surface alloying with an electric spark method, graphite, carbide (BK10) and ferrochrome (ФХ010) electrodes were used. The dependence of the phase composition and structure of the alloyed surface layer on the material of the hardened electrode is reflected.

Keywords: *wear resistance, electrospark alloying, hardening electrodes, surface layers.*

Введение

Электроискровое легирование (ЭИЛ) в качестве технологии поверхностной обработки широко используется для упрочнения деталей, изготовленных из различных железоуглеродистых сплавов. ЭИЛ позволяет формировать упрочненные слои, содержащие карбиды, нитриды и закалочные структуры на поверхности обрабатываемой детали, с помощью искрового разряда, возникающе-

up_118.indd 27 28.12.2017 11:05:50

го в воздушной среде. Искровой разряд большой плотности интенсифицирует процессы физико-химического взаимодействия между электродом, материалом обрабатываемой детали (или ее отдельными компонентами) и воздухом, что позволяет получать диффузионный упрочненный слой.

На характеристики износостойкости в значительной мере оказывают влияние состав и структура упрочненных поверхностных слоев, которые, в свою очередь, зависят от химического состава обрабатываемой детали (матрицы), материала электрода и режимов легирования.

При оценке влияния ЭИЛ на износостойкость использовали образцы из стали Р6М5, подвергнутые обработке графитовым, твердосплавным (ВК10) и феррохромовым (ФХ010, Cr ~ 65 %, C ~ 0,1 %) электродами.

Материалы и методика проведения исследований

Материал упрочняющих электродов (анода) в процессе ЭИЛ переносился на торец цилиндрического образца из стали Р6М5 (катода) диаметром 6 мм при напряжении холостого хода 300 В и токе короткого замыкания 3 А; емкость конденсаторных батарей, формирующих искровой разряд, составляла 400 мкФ.

Износостойкость материалов определяли на трехкоординатном фрезерном станке с ЧПУ «КХ3А» (Profi, Германия) [1, 2] по изменению массы образцов. Для измерения массы применяли аналитические лабораторные весы ВЛА-200г-М. В качестве абразивного материала использовали электрокорундовую шкурку с зернистостью М40, 4-Н, 5-Н на тканевой основе КК19XW (по ГОСТ 13344—79). Образцы, закрепленные в шпинделе станка, вращающегося с частотой 750 мин$^{-1}$, перемещали по поверхности шкурки по прямолинейной траектории на пути трения 285 мм с подачей 750 мм/мин; усилие прижима образцов к шкурке составляло 7 Н.

Результаты исследований и их обсуждение

Структура легированного слоя, полученного на образцах из стали Р6М5 (рис. 1) состоит из двух областей — белого слоя и переходной зоны. Согласно [3] после электроискрового упрочнения белый слой обладает наибольшей твердостью и содержит наряду с карбидами и нитридами закалочные структуры, появляющиеся вследствие мощного локального теплового воздействия. В настоящей работе установлено, что на экспериментальных образцах твердость белого слоя составила 897...954 HV, причем она несущественно зависит от материала упрочняющего электрода.

Переходная зона, являющаяся результатом диффузии элементов упрочняющего электрода в основной металл [4], состоит из распределенных в матрице структурных составляющих легированного слоя, по глубине в несколько раз превышает белый слой, но заметно уступает ему по твердости (711...754 HV).

Наибольшая глубина белого слоя (~50 мкм) наблюдается при упрочнении графитовым электродом, что объясняется значительной диффузионной подвижностью углерода по сравнению с металлокерамикой и феррохромом. Толщина белого слоя, полученного с применением электродов из ВК10 и ФХ010, примерно одинакова и составляет ~20 мкм. Глубина переходной зоны на всех образцах соизмерима между собой и находится в пределах 250...300 мкм.

Фазовый состав легированного слоя, упрочненного графитовым электродом, представлен карбидами железа (Fe_3C, Fe_5C_2, Fe_7C_3) и вольфрама (WC, W_3C). При упрочнении электродом из ВК10 поверхностный слой содержит карбиды (WC, W_3C) и нитриды вольфрама переменного состава ($W_{1,1}N$, $W_{2,5}N_4$). Легирование электродом из феррохрома ведет к образованию в упрочненном слое карбидов (наиболее явный Cr_7C_3) и нитридов хрома (Cr_2N), а также твердого раствора хрома в железе. Фазовый состав упрочненных слоев показал,

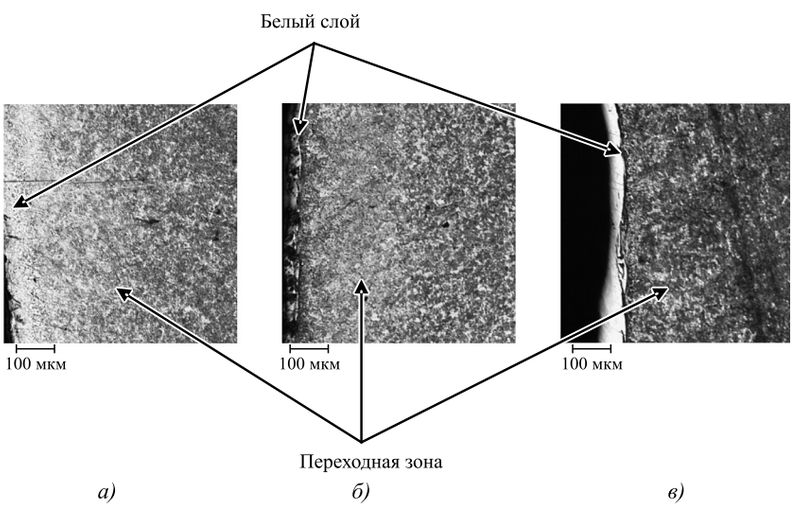


Рис. 1. Структура легированных слоев:
а — графитовый электрод; *б* — твердосплавный электрод ВК10; *в* — электрод из феррохрома ФХ010

up_118.indd 28 28.12.2017 11:05:51

что в процессах формирования легированного слоя участвует наряду с материалом упрочняющего электрода и матрицы также азот воздуха, способствующий возникновению нитридных составляющих. Нитриды образуются при упрочнении электродами из ВК10 и ФХ010, а применение графитового электрода вызывает появление только карбидных соединений в обрабатываемом материале. Вероятно, это вызвано тем, что при искровом разряде в зоне контакта графитового электрода и обрабатываемой детали образуется оксид углерода CO, который затрудняет участие азота в процессах взаимодействия в области реакции. Использование электрода из ВК10 приводит к переносу карбидов вольфрама (основа электрода) на поверхность обрабатываемой детали, часть из которых, взаимодействуя с азотом, образует нитриды, не характерные для материала электрода. Аналогичные закономерности наблюдаются при использовании электрода из феррохрома. В общем случае процесс формирования легированного слоя сводится к переносу материала упрочняющего электрода к обрабатываемой поверхности и его взаимодействию с упрочняемым металлом и компонентами газовой атмосферы, образующейся в зоне контакта при искровом разряде.

Массовый износ образцов на абразивной шкурке с зернистостью М40 (28...40 мкм) представлен на рис. 2. Видно, что закалка Р6М5 (~65 HRC) повышает износостойкость по сравнению с материалом без термообработки в 2,5...3 раза, а последующее ЭИЛ позволяет дополнительно увеличить износостойкость закаленных образцов. Лучшие результаты по увеличению износостойкости показали образцы, упрочненные графитовым электродом. Это можно объяснить тем, что толщина белого слоя в этом случае примерно в два раза превышает толщину слоя, полученного с помощью электродов из ВК10

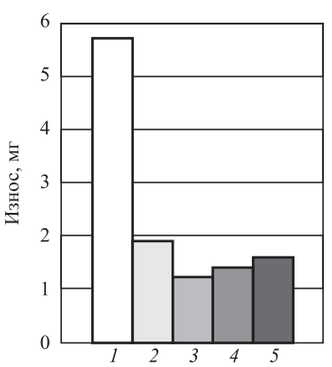


Рис. 2. Массовый (весовой) износ образцов из стали Р6М5: *1* — образец без покрытия и термообработки; *2* — закаленный; *3* — упрочненный графитовым электродом; *4* — упрочненный твердосплавным электродом ВК10; *5* — упрочненный электродом из феррохрома ФХ010

и ФХ010. С увеличением зернистости абразивного материала количественные показатели износа растут, но качественная картина остается неизменной. В общем случае ЭИЛ позволяет дополнительно повысить износостойкость закаленной стали Р6М5 при использовании графитового электрода на 25...30 %, электрода из ВК10 — на 15...25 % и электрода из ФХ010 — на 10...15 % соответственно.

При реализации полученных результатов необходимо учесть, что в работе представлены исследования применительно к условиям сухого трения. Очевидно, на практике при наличии таких факторов окружающей среды, как влага, агрессивные условия, температура и др., количественные характеристики износа изменятся [5, 6].

Таким образом, проведенные исследования на примере стали Р6М5 показали высокую эффективность ЭИЛ в сочетании с предварительной закалкой.

Заключение

Комбинирование термической обработки (закалки) с последующей ЭИЛ позволяет значительно увеличить эффективность упрочнения стали Р6М5. Материал применяемого электрода является важным фактором повышения износостойкости, в частности использование графитового электрода при ЭИЛ позволяет снизить суммарный износ в 4,7 раза, электрода из ВК10 — в 3,9 раза, а электрода из ФХ010 — в 3,6 раза соответственно по сравнению с исходным материалом.

Увеличение износостойкости обусловлено формированием поверхностного легированного слоя, содержащего карбиды и нитриды, образующиеся при взаимодействии электрода с обрабатываемым материалом в искровом разряде в присутствии воздушной атмосферы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тарасов В.В., Трифонов И.С.** Развитие метода изнашивания материалов по закрепленному абразиву // Химическая физика и мезоскопия. 2015. Т. 17. № 1. С. 143—149.

2. **Пат. 2601502 РФ,** МПК G01N3/56. Способ испытания материала на абразивное изнашивание / Тарасов В.В., Трифонов И.С., Пузанов Ю.В., Бажин А.Г. Приоритет от 5.11.2014; Опубл. 10.11.2016. / Офиц. бюл. "Изобретения. Полезные модели" № 31.

3. **Молодык Н.В., Зенкин А.С.** Восстановление деталей машин: справочник. М.: Машиностроение, 1989. 480 с.

4. **Иванов Г.П.** Технология электроискрового упрочнения инструментов и деталей машин. М.: Машгиз, 1961. 303 с.

5. **Чугун:** справочное издание / под ред. А.Д. Шермана и А.А. Жукова. М.: Металлургия, 1991. 576 с.

6. **Цыпин И.И.** Белые износостойкие чугуны. М.: Машиностроение, 1983. 176 с.

up_118.indd 29 28.12.2017 11:05:51

УДК 621.789

В.А. Александров, Л.Г. Петрова, А.С. Сергеева, А.В. Косачев, В.Д. Александров
(Московский автомобильно-дорожный государственный технический университет (МАДИ))
E-mail: sergeevamadi@yandex.ru

Повышение стойкости режущего инструмента методом модифицирования поверхности с нанесением покрытий из соединений вольфрама в высокочастотном разряде*

Обсуждаются результаты исследований по поверхностному упрочнению инструмента из различных сталей, в том числе быстрорежущих, а также безвольфрамовых и с пониженным содержанием вольфрама. Предложен способ модифицирования поверхности азотированием с предварительным нанесением покрытия оксид вольфрама в высокочастотном безэлектродном разряде, позволяющий вследствие химических реакций сформировать покрытие на основе нитрида вольфрама. Приведены результаты экспериментальных исследований строения покрытий на разных сталях, их твердости, а также стойкостных испытаний. Показано повышение стойкости режущих кромок инструмента из сталей 4Х5МФС и В2Ф с покрытиями, что делает целесообразным замену быстрорежущей стали с высоким содержанием вольфрама на данные стали с покрытиями.

Ключевые слова: *инструментальная сталь, высокочастотный разряд, азотирование, оксид вольфрама, поверхностное упрочнение.*

This paper discusses the results of research of tools surface hardening made of different steels including high-speed steels with low content of tungsten. The method of surface modification is proposed consisting in nitriding of pre-applied tungsten oxide coating in high-frequency discharge; because of chemical reactions, a coating based on tungsten nitride is formed. For various steels, the results of experimental studies of coatings structure, hardness, and resistance tests are presented. It is shown the increase of tool cutting edges resistance for steels 40Х5МФС and В2Ф with the coatings, that makes the appropriate replacement of high-tungsten high-speed steel on these steel with coatings.

Keywords: *tool steel, high-frequency discharge, nitriding, tungsten oxide, surface hardening.*

Введение

Рабочая часть инструмента в процессе резания подвергается действию больших давлений и трения, что приводит к повышению температуры в зоне контакта и вызывает износ инструмента. Поэтому инструментальные стали должны обладать особыми физико-механическими свойствами: высокими твердостью, прочностью, износостойкостью в сочетании с достаточными ударной вязкостью и теплостойкостью. Традиционно для повышения теплостойкости инструментальных сталей в них вводят легирующие элементы, в основном дорогостоящий вольфрам [1]. С точки зрения ресурсосбережения и снижения стоимости инструмента является актуальным уменьшение в составе стали содержания дефицитных легирующих элементов.

Для повышения ресурса работы режущего инструмента широкое применение получили методы модифицирования изнашиваемой поверхности [2—5]. Диффузионное насыщение поверхности различными элементами дает возможность легирования стального изделия на ограниченную глубину. Поверхностное легирование влияет на структуру и фазовый состав диффузионного слоя, а также на строение матричной основы: зернистость материала, строение и энергетическое состояние границ зерен, благодаря чему модифицированный материал приобретает комплекс особых свойств [6—8].

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда (проект № 17-19-01473).

up_118.indd 30 28.12.2017 11:05:51

Для износостойкого модифицированного поверхностного слоя является благоприятной структура, состоящая из матрицы с включениями упрочняющих фаз. В качестве упрочняющих фаз используются карбиды, нитриды, бориды, карбонитриды металлов [9—11]. Влияние твердых включений на износостойкость сплава определяется их размерами и количеством, а также возможностью матрицы надежно удерживать армирующие частицы. Повышение износостойкости таких сплавов обусловлено дисперсностью частиц упрочняющей фазы и прочностью их связи с матрицей. Крупные частицы, имеющие слабую связь с матрицей, легко выкрашиваются при соударении с обрабатываемой деталью, что ведет к снижению износостойкости.

В настоящей работе предпринята попытка формирования модифицированного износостойкого слоя на инструментальной стали путем нанесения слоя ультрадисперсного оксида вольфрама в безэлектродном высокочастотном разряде с последующим азотированием.

Цель работы — исследование строения и свойств модифицированных слоев в инструментальных сталях после низкотемпературного газового азотирования с предварительным нанесением на поверхность оксида вольфрама, а также изучение возможности изготовления режущего инструмента из сталей с пониженным содержанием вольфрама без потери режущих свойств по сравнению с быстрорежущими сталями.

Методика проведения исследований

Сущность процесса осаждения в безэлектродном высокочастотном разряде. Для процесса модифицирования поверхности инструмента оксидами вольфрама использовали специально разработанное в МАДИ устройство для возбуждения безэлектродного высокочастотного разряда (*H*-разряда) [12]. Схема устройства показана на рис. 1.

По виду возбуждения и характеру протекания процесса различают два вида высокочастотного разряда: *E*- и *H*-разряд. Возбуждение *E-разряда* происходит в газе, помещенном между обкладками конденсатора или внутри волновода; электроды при этом могут быть расположены как внутри разрядной камеры, так и снаружи. При достаточно большой частоте и размерах разрядной камеры высокочастотный разряд может гореть без электродов (*H*-разряд). Его получают, помещая разрядную камеру в колебательный контур; разряд имеет индуктивную связь с внешними токами. Для реализации способа необходимо применение более мощного высокочастотного генератора.

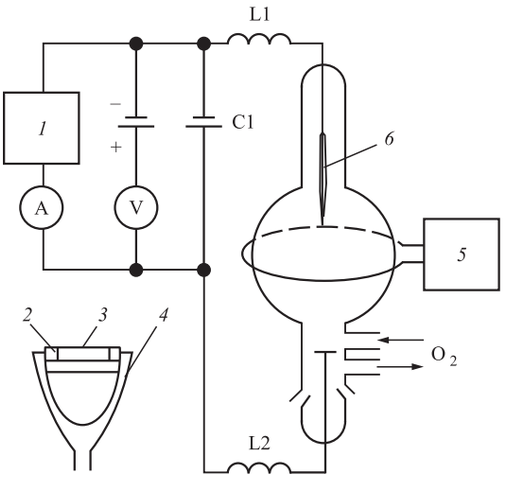


Рис. 1. Функциональная схема установки для нанесения оксидов металла на поверхность изделия:
1 — источник постоянного напряжения; *2* — стеклянное кольцо; *3* — изделие; *4* — электрододержатель; *5* — высокочастотный генератор; *6* — вольфрамовый электрод

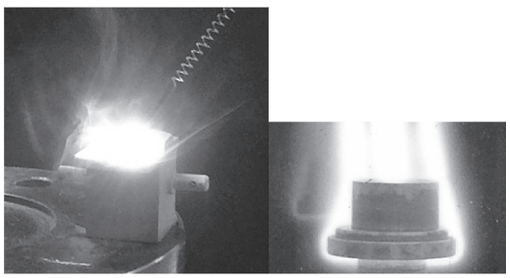
Получение оксида вольфрама в безэлектродном высокочастотном разряде имеет свои особенности по сравнению с получением оксидов в плазме тлеющего разряда постоянного тока. В высокочастотном разряде амплитуда колебаний распыляемых частиц такова, что большинство из них не испытывает соударений со стенками разрядной камеры или электродами. При этом могут быть получены большие скорости осаждения частиц, достигается эффект осаждения оксида вольфрама равномерным слоем по площади изделия.

Объект исследования — режущие инструменты. В качестве режущих инструментов для исследования выбраны сменный зуб торцевой фрезы цилиндрической формы, сменная треугольная пластина токарного резца, а также спиральные сверла и метчики. Зуб торцевой фрезы и сменная пластина токарного резца были изготовлены из сталей 4Х5МФС, ХВСГ, В2Ф; для сравнительных испытаний эти же изделия были изготовлены из стали Р6М5. Спиральные сверла и метчики были изготовлены из стали Р6М5. Для металлографического и дюрометрического исследований были изготовлены образцы-свидетели из указанных сталей.

Описание процесса формирования модифицированных покрытий. Модифицирование поверхности режущего инструмента осуществляли в несколько этапов.

Этап 1. Получение триоксида вольфрама на поверхности изделий. Нанесение слоя триоксида вольфрама WO_3 проводили путем распыления

up_118.indd 31 28.12.2017 11:05:52



а) *б)*

Рис. 2. Процесс нанесения слоя триоксида вольфрама (*а*) и формирование окситетрахлорида вольфрама (*б*)

вольфрамового электрода в кислородосодержащей атмосфере (рис. 2, *а*) при температуре 500 °С по реакции

$$2W + 3O_2 \rightarrow 2WO_3. \quad (1)$$

Этап 2. Получение на поверхности окситетрахлорида вольфрама. Использовали то же устройство, на котором осуществляли нанесение оксида вольфрама. Изделие с нанесенным покрытием из триоксида вольфрама помещали в хлорсодержащую атмосферу (пары HCl) при температуре 530 °С (рис. 2, *б*). При этом триоксид вольфрама переходит в окситетрахлорид вольфрама ($WOCl_4$).

Этап 3. Азотирование инструмента с нанесенным покрытием окситетрахлорид вольфрама. Азотирование проводили в смеси аммиака с парами ацетона на разработанной установке для химико-термической обработки в многокомпонентных средах. Температура азотирования — 550 °С. При этом аммиак реагирует с окситетрахлоридом вольфрама, образуя нитрид вольфрама W_2N_3 по реакции

$$4WOCl_4 + 8NH_3 \rightarrow$$
$$\rightarrow 2W_2N_3 + 16HCl + 4H_2O + N_2. \quad (2)$$

При достижении необходимой толщины нитридного покрытия охлаждение садки проводили в атмосфере чистого аммиака до температуры 150...200 °С, после чего происходила выгрузка готовых изделий.

Методы исследования строения и свойств модифицированных покрытий. Для изучения строения модифицированного слоя проводили металлографические исследования поперечных шлифов образцов. Для выявления микроструктуры упрочненного слоя на образцах из сталей 4Х5МФС, ХВСГ, В2Ф использовали 4%-ный раствор азотной кислоты в этиловом спирте. Для стали Р6М5 проводили электролитическое травление в водном растворе щавелевой кислоты. Микроструктуры исследовали с помощью оптических инверсионных микроскопов Axiovert 40 MAT и Axiovert 25CA при увеличениях от 100 до 1000. За толщину азотированного слоя принимали расстояние от поверхности до участка с твердостью, на 500 МПа превышающей твердость сердцевины. Микротвердость азотированного слоя и покрытия измеряли по стандартной методике на микротвердомерах ПМТ-3 при нагрузке 50 гс и MicroMet 5101 при нагрузках 50 и 10 гс. Толщину зоны химических соединений определяли по изменению твердости, которую измеряли на микротвердомере ПМТ-3.

Тонкое строение модифицированных слоев исследовали с помощью сканирующего электронного микроскопа HITACHI S-800.

Стойкостные испытания инструмента проводили следующим образом.

Сравнительные испытания пластин, изготовленных из стали 4Х5МФС с модифицированной поверхностью, и пластин, изготовленных из стали Р6М5, прошедших стандартную термообработку, проводили на вертикально-фрезерном станке ЕМ12ПС по закаленной стали ХВГ (40...45 HRC) и серому чугуну СЧ20 (206 НВ) фрезами диаметром 160 мм, $Z = 10$. За критерий затупления при обработке чугуна принято увеличение параметра шероховатости $Ra > 1{,}25$ мкм и $Ra > 0{,}63$ мкм при обработке стали.

Сравнительные испытания обработанных и необработанных сверл из стали Р6М5 диаметром 25 мм при сверлении стали 40Х проводили с использованием в качестве смазочно-охлаждающей жидкости 5%-ной эмульсии ЭТ-2. Режим сверления: скорость 27,9 м/мин; подача 0,28 мм/об; глубина сверления 100 мм. Стойкость инструмента фиксировали по достижении износа задней поверхности, равного 1 мм.

Сравнительные испытания обработанных и необработанных метчиков из стали Р6М5 проводили при операции нарезания резьбы в глухом отверстии глубиной 38 мм в корпусе из чугуна СЧ21 (170...241 НВ). Режим резания: скорость — 2,6 м/мин; охлаждение — керосин (смачивание). Период работы инструмента до его снятия определяли визуальной оценкой его состояния.

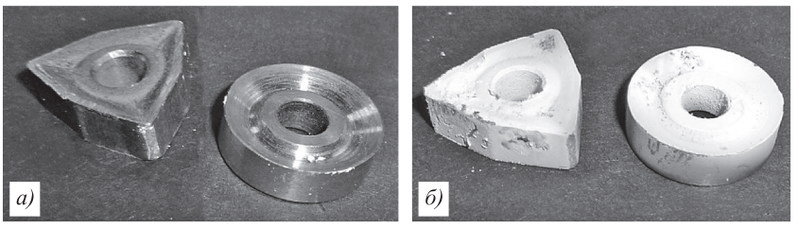
Стойкость инструмента оценивали по числу обработанных деталей до наступления указанных признаков износа.

Результаты исследований и их обсуждение

После этапа 1 процесса модифицирования — осаждения оксида вольфрама в высокочастотном

up_118.indd 32 28.12.2017 11:05:52

Рис. 3. Внешний вид изделий:
а — без оксида вольфрама на поверхности; *б* — с нанесенным на поверхность оксидом вольфрама



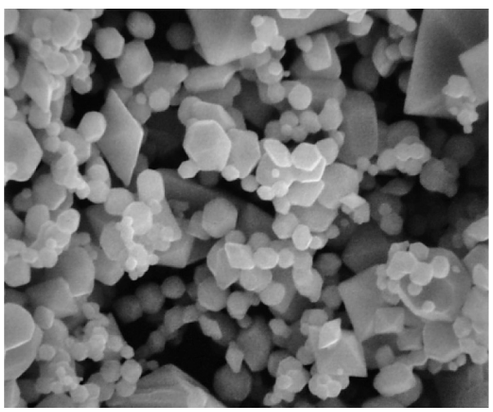


Рис. 4. РЭМ-изображение порошка триоксида вольфрама на стали 4Х5МФС

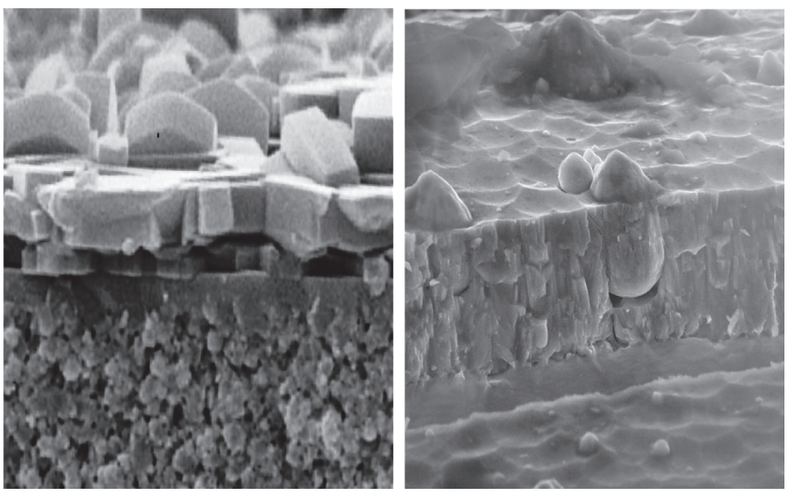


Рис. 5. РЭМ-изображения нитридных покрытий на сталях Р6М5 (*а*) и В2Ф (*б*)

разряде на изделиях наблюдали характерный для триоксида вольфрама WO_3 налет порошка белого цвета (рис. 3). Исследования с помощью растрового электронного микроскопа показали, что порошок является нанодисперсным: дисперсность частиц оксида составляет от 50 до 100 нм (рис. 4).

После этапа 2 процесса на поверхности образуется слой порошка окситетрахлорида вольфрама, а в результате последующего азотирования (этап 3) под слоем порошка формируется нитридное покрытие (рис. 5).

Внешний вид изделий с покрытиями различается в зависимости от химического состава стали (рис. 6), что позволяет предположить различия в их фазовом составе.

Твердость и толщина покрытий на разных сталях имеют свои особенности (рис. 7, 8). Твердость модифицированного слоя закономерно максимальна у быстрорежущей стали Р6М5, она соответствует твердости нитридов и карбидов вольфрама (рис. 7). Толщина нитридного покрытия составляет около 10 мкм (рис. 8, *а*).

На рис. 7 видно, что твердость зоны химических соединений в сталях 4Х5МФС и В2Ф значительно выше твердости матрицы (более чем в 3 раза). Твердость упрочненных слоев в этих сталях близ-

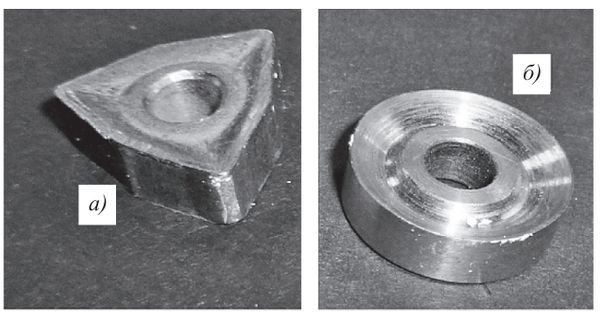


Рис. 6. Изделия после модифицирующей обработки, состоящей из осаждения оксида вольфрама и азотирования: *а* — сталь ХВСГ; *б* — сталь Р6М5

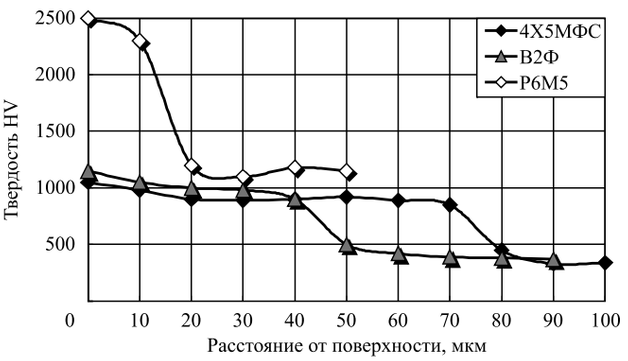
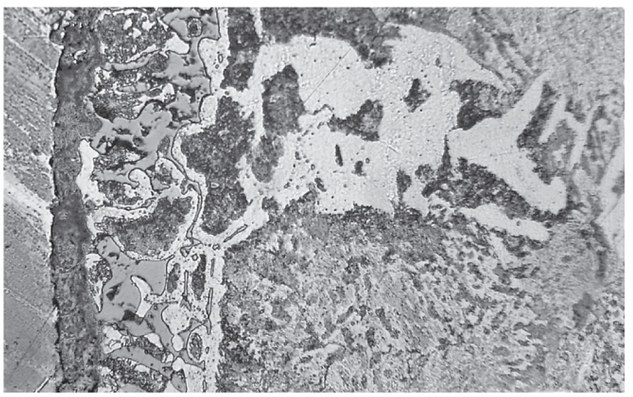


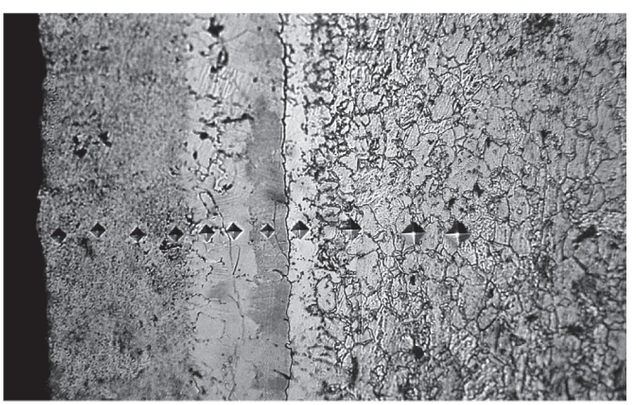
Рис. 7. Распределения твердости в модифицированных сталях

up_118.indd 33 28.12.2017 11:05:52



а)

б)



в)

Рис. 8. Микроструктуры модифицированных слоев в сталях Р6М5 (*а*), В2Ф (*б*) и 4Х5МФС (*в*)

ка к твердости быстрорежущей стали Р6М5, прошедшей стандартную термообработку. Профили распределения твердости в этих сталях имеют схожий характер. Плавное понижение твердости от упрочненной зоны к матрице исключает хрупкое разрушение изделия. Толщина упрочненного слоя в стали В2Ф составляет 35...50 мкм (рис. 8, *б*), в стали 4Х5МФС — 70...80 мкм (рис. 8, *в*). Эти

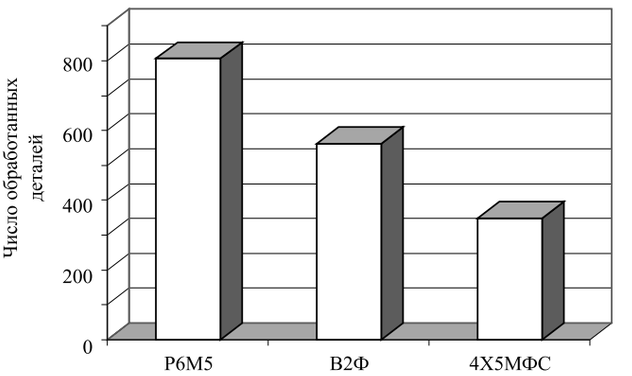


Рис. 9. Стойкость инструмента с пластинами из различных сталей с модифицированным поверхностным слоем

различия объясняются разницей в скорости протекания диффузионных процессов в зависимости от типа присутствующих в сталях легирующих элементов.

Стойкость инструмента с покрытием коррелирует с полученными данными по твердости покрытий на различных сталях. Так, наибольшая стойкость наблюдается у фрез с нитридным покрытием на режущей кромке из стали Р6М5 (рис. 9), наименьшая — у инструмента из безвольфрамовой стали 4Х5МФС.

Сверла из стали Р6М5, упрочненные описанным способом, обладают стойкостью, в 5...7 раз превышающей стойкость стандартных изделий. Метчики из стали Р6М5 с модифицированным покрытием показали стойкость в 3...5 раз выше, чем метчики из стали Р6М5 в состоянии поставки. Период испытаний в 60 рабочих смен оказался недостаточным для доизноса метчиков до принятого по методике испытаний критерия затупления, т. е. до брака резьбы по калибру. Поэтому износостойкость инструмента оценивали по относительной величине — путем сравнения числа обработанных заготовок, приходящихся на 0,1 мм износа режущей кромки.

Существенное повышение твердости режущей кромки в безвольфрамовой стали — до уровня твердости быстрорежущей стали создает предпосылки для использования подобных сталей с нитридными покрытиями для сменных пластин. Так, в результате сравнительных испытаний установлено, что стойкость фрез с механическим креплением упрочненных пластин из стали 4Х5МФС выше стойкости фрез с пластинами из стали Р6М5 без покрытия в 1,2...1,3 раза. Параметр шероховатости поверхности при обработке стали и чугуна фрезами с модифицированными пластинами снижается на 25 %.

up_118.indd 34 28.12.2017 11:05:52

Таким образом, натурные испытания подтвердили преимущества исследуемого способа модифицирования поверхности инструмента. Метод позволяет повысить производительность труда за счет экономии времени на смену и заточку инструмента, при этом достигается экономия дорогостоящих легированных быстрорежущих сталей.

Выводы

1. Для повышения стойкости инструмента из безвольфрамовых сталей и сталей с малым содержанием вольфрама предложен способ поверхностного упрочнения режущих кромок, позволяющий получать нитридные покрытия с высокой твердостью — на уровне твердости быстрорежущей стали. Экономический эффект от применения данного способа может быть достигнут вследствие замены высоколегированной стали Р6М5 на более дешевые при изготовлении различных типов режущих инструментов.

2. Исследования модифицированных азотированных покрытий, полученных при предварительном нанесении оксида вольфрама в высокочастотном разряде, показали, что строение, фазовый состав, толщина упрочненного слоя и его микротвердость зависят от химического состава стали-подложки. Твердость максимальна у высоколегированной стали Р6М5, а толщина зоны химических соединений — у безвольфрамовой стали 4Х5МФС.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кремнев Л.С.** Теория легирования и создания на ее основе теплостойких инструментальных сталей и сплавов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2008. № 11. С. 18—27.

2. **Чудина О.В., Брежнев А.А.** Поверхностное легирование углеродистых инструментальных сталей с использованием лазерного нагрева // Технология металлов. 2014. № 2. С. 19—24.

3. **Белашова И.С.** Модифицирование поверхности инструментальных сталей с применением лазерного нагрева // Наукоемкие технологии. 2004. № 10. С. 36.

4. **Особенности** состава, структуры и свойств быстрорежущих сталей для металлорежущего инструмента с ионно-плазменными покрытиями на основе нитрида титана / Л.С. Кремнев, Л.А. Виноградова, А.К. Онегина, И.Ю. Сапронов // Металловедение и термическая обработка металлов. 2012. № 1. С. 4—9.

5. **Александров В.А., Богданов К.В.** Азотирование инструмента из высокохромистых и быстрорежущих сталей // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 5. С. 14.

6. **Повышение** стойкости к изнашиванию деталей из углеродистых сталей комбинированными методами диффузионного поверхностного легирования / Л.Г. Петрова, В.А. Александров, П.Е. Демин и др. // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 2 (49). С. 29—40.

7. **Повышение** износостойкости протяжных инструментов / Г.С. Овсепян, О.В. Чудина, К.Г. Карапетян, Н.Г. Овсепян // Материаловедение. 2013. № 12. С. 27—29.

8. **Белашова И.С., Шашков Д.П.** Изменение механических и тепловых характеристик инструментальных сталей при лазерном легировании // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 4. С. 39—43.

9. **Петрова Л.Г., Александров В.А., Брежнев А.А.** Новые возможности борирования для получения модифицированных слоев на стальных деталях, работающих в условиях износа и коррозии // Упрочняющие технологии и покрытия. 2013. № 10 (106). С. 26—33.

10. **Кремнев Л.С., Адаскин А.М., Викулов С.В.** Повышение стойкости малоразмерного инструмента // СТИН. 2011. № 5. С. 37—40.

11. **О возможности** получения наноструктурированных покрытий на стальных изделиях модифицированием поверхности / Л.Г. Петрова, И.С. Белашова, В.А. Александров и др. // Вестник Московского авиационного института. 2014. Т. 21. № 2. С. 75—82.

12. **Применение** электрического разряда для интенсификации процесса азотирования / В.А. Александров, Л.Г. Петрова, А.С. Сергеева, Л.Н. Бритвин // Вестник Московского автомобильно-дорожного государственного технического университета (МАДИ). 2017. № 1 (48). С. 49—55.

up_118.indd 35 28.12.2017 11:05:52

УДК 621.91.01

В.М. Ярославцев, Н.А. Ярославцева
(Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана)
E-mail: mt13@bmstu.ru

Методы упрочняющей технологии как средство совершенствования процесса резания

Представлены результаты экспериментальных исследований и производственный опыт использования комбинированных методов размерной обработки с совмещением воздействий на материал заготовки упрочняющих технологий и процесса резания. Показано, что правильно выбранные условия упрочнения срезаемого слоя методами поверхностного пластического деформирования и упрочняющей термической обработки обеспечивают повышение важнейших технико-экономических показателей процесса резания: производительности труда и периода стойкости инструмента, точности формы и качества обработанной поверхности.

Ключевые слова: *комбинированная обработка, резание, упрочняющие технологии, производительность обработки, период стойкости режущего инструмента, качество обработки, долговечность изделий.*

The results of experimental studies and industrial experience of the use of combined methods of dimensional processing, combining the cutting process with additional mechanical or thermal influences on the material of workpiece are presented. It is shown that under properly chosen conditions for hardening by surface plastic deformation, methods and hardening heat treatment provided improving the most important technical and economic indicators of the cutting process: productivity and tool life, accuracy form and surface quality.

Keywords: *combined treatment, cutting, hardening technology, processing performance, period of tool life, machining quality, longevity of the products.*

Введение

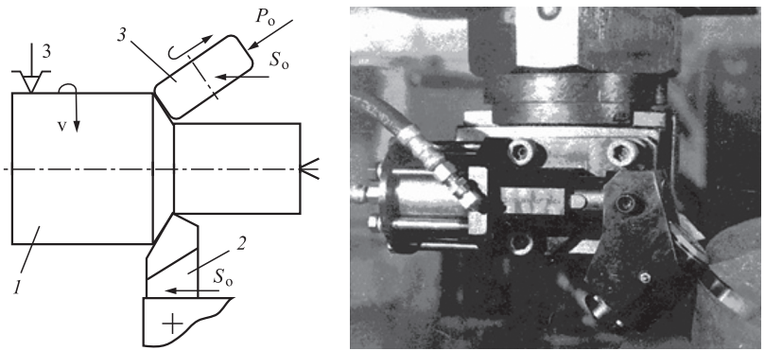
Технологические методы и технические средства упрочнения поверхностей деталей, разработанные для повышения эксплуатационной долговечности и надежности машин, находят эффективное применение как средство повышения обрабатываемости резанием материалов с различными физико-механическими свойствами, совершенствования процесса резания по многим технологическим показателям.

Совместимость энергетических воздействий на материал заготовки двух технологических процессов (упрочнения и резания металлов) послужила основой создания новых комбинированных методов обработки [1], к которым относятся резание с опережающим пластическим деформированием (ОПД) [2—4], резание с предразрушением срезаемого слоя [5, 6] и резание с термоциклическим воздействием на срезаемый слой материала заготовки [7]. Ниже показаны области рационального применения методов резания с ОПД и термоциклическим воздействием на материал, приведены их технологические возможности.

Результаты исследований

При резании с ОПД материал срезаемого слоя сначала испытывает воздействие одним из методов поверхностного пластического деформирования (ППД), например при упрочнении роликом (рис. 1). В результате наклепа поверхностные слои металла приобретают новые свойства — повышается твердость и прочность, одновременно снижает-

up_118.indd 36 28.12.2017 11:05:52



а) *б)*

Рис. 1. Схема обработки резанием с ОПД (*а*) и пример практической реализации метода при обработке на токарно-карусельном станке модели "1540" корпуса энергоблока (*б*):
1 — заготовка; *2* — режущий инструмент; *3* — упрочняющее устройство ОПД с накатным роликом

ся его пластичность. При оптимальных условиях комбинированной обработки (нагрузке ППД P_0, толщине срезаемого слоя и др.) процесс резания такого материала характеризуется снижением работы стружкообразования и, как следствие, уменьшением силы и температуры резания, что приводит к увеличению периода стойкости режущего инструмента и производительности труда, повышению экономических показателей процесса обработки в целом.

Наибольшая эффективность применения резания с ОПД накатным роликом (см. рис. 1) достигается при обработке труднообрабатываемых материалов с повышенной пластичностью (относительное удлинение при разрыве $\delta \geqslant 17$ %). Согласно экспериментальным данным [2] при обработке с ОПД коррозионно-стойких, жаростойких хромоникелевых сталей 12Х18Н10Т, 12Х21Н5Т, 10Х23Н18 и др. (III группа обрабатываемости резанием по классификации труднообрабатываемых сталей и сплавов [8]) период стойкости инструмента повышается в 2,2...4,6 раза по сравнению с обычным резанием; при обработке жаропрочных деформируемых сплавов ХН77ТЮР, ХН62ВМКТЮБ-ВД и др. (V группа обрабатываемости) — до 1,7...6,5 раза; при резании жаропрочного литейного сплава ЖС6-КП (VI группа) — до 3,4...4,5 раза.

При обработке сталей, рафинированных жидкими синтетическими шлаками (40ХСШ, 50РАСШ и др.) и отличающихся повышенной вязкостью, период стойкости инструмента повышается в 6 и более раз.

Наряду с увеличением периода стойкости режущего инструмента резание с ОПД при чистовой обработке обеспечивает улучшение качества поверхностного слоя детали и микрогеометрии поверхности, значительное повышение производительности и точности обработки. Такой технологический результат достигается за счет применения упрочняющего инструмента ППД специального конструктивного исполнения [9, 2], при котором его контактирование происходит одновременно с двумя поверхностями заготовки: поверхностью резания и обработанной поверхностью, совмещая таким образом на длине прохода получение эффекта по технико-экономическим показателям от двух разнородных по своему технологическому назначению методов обработки: резания с ОПД и поверхностного пластического деформирования.

На рис. 2 представлена схема обработки точением с применением упрочняющего устройства, оснащенного накатным роликом с двумя рабочими поверхностями. Одна из них воздействует на поверхность резания *4*, обеспечивая уменьшение напряженности процесса резания, а другая — на обработанную по-

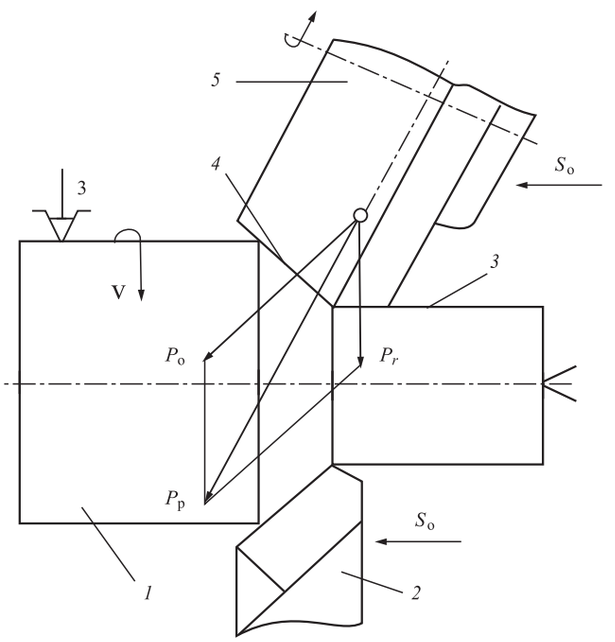


Рис. 2. Схема обработки при упрочнении роликом с двумя рабочими поверхностями:
1 — заготовка; *2* — резец; *3* — обработанная поверхность; *4* — поверхность резания; 5 — накатной ролик; P_p — результирующая нагрузка ОПД на заготовку; P_o — нагрузка ОПД на поверхность резания; P_r — радиальная составляющая нагрузки ОПД, действующая на обработанную поверхность

up_118.indd 37 28.12.2017 11:05:53

верхность заготовки *3*, снижая тем самым шероховатость поверхности, увеличивая ее твердость и способствуя формированию в поверхностном слое благоприятных сжимающих остаточных напряжений.

Результаты исследований показывают, что точение с применением ролика с двумя рабочими поверхностями позволяет наряду с улучшением обрабатываемости материала резанием и повышением периода стойкости режущего инструмента существенно снижать шероховатость поверхности по сравнению с обычным точением при одинаковых условиях обработки: режимах резания и геометрических параметрах лезвия инструмента. При этом достигнутые уровни параметра шероховатости практически не отличаются от показателей чистового ППД накатным роликом [9].

При точении с упрочнением поверхности резания и одновременным деформированием обработанной поверхности малая шероховатость (параметр *Ra*) может обеспечиваться при обработке со сравнительно большими подачами инструмента S_o. В качестве примера на рис. 3 приведены зависимости $Ra(S_o)$, построенные для условий обычного резания (кривые *1*) и обработки с ОПД с применением ролика с двумя рабочими поверхностями (кривые *2*). Видно, что при обычном точении стали 20Х13 параметр шероховатости поверхности Ra = 2 мкм достигается при $S_o \approx 0{,}06$ мм/об; в случае обработки с ОПД — при $S_o \approx 0{,}51$ мм/об. Аналогично при точении стали 37Х12Н8Г8МФБ для обеспечения параметра

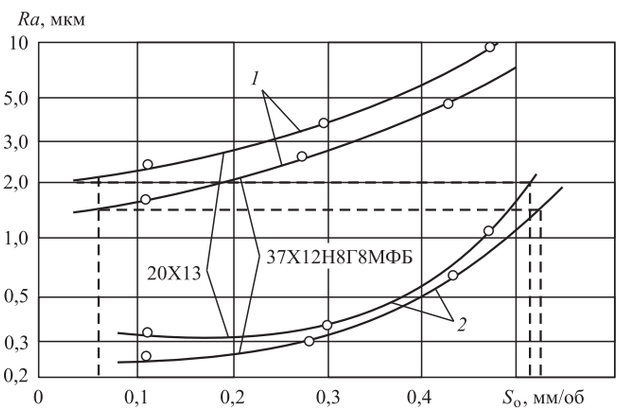


Рис. 3. Влияние подачи S_o на параметр шероховатости *Ra* при обычном точении (*1*) и точении с ОПД роликом с двумя рабочими поверхностями (*2*):
сталь 20Х13: резец ВК8 ($\gamma = 10°$; $\alpha = 8°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; $r_в = 1$ мм); v = 1,47 м/с; $t = 2{,}5$ мм; $P_r = 1400$ Н;
сталь 37Х12Н8Г8МФБ: резец ВК6М ($\gamma = 10°$; $\alpha = 10°$; $\varphi = \varphi_1 = 45°$; $r_в = 1$ мм); v = 0,92 м/с; $t = 1{,}5$ мм; $P_r = 1600$ Н

$Ra = 1{,}4$ мкм подача при чистовом и тонком точении за счет применения метода ОПД может быть увеличена с 0,06 до 0,53 мм/об, т. е. примерно в 8 раз, что обеспечивает соответствующее повышение производительности процесса резания.

Воздействие в процессе резания на заготовку дополнительного нагружающего устройства ОПД (осуществляющего ППД заготовки) изменяет деформированное состояние технологической системы и тем самым оказывает существенное влияние на точность обработанных поверхностей.

Известно [10], что возможность обеспечения точности формы связана прежде всего с радиальной составляющей силы резания P_y, направленной по нормали к обрабатываемой поверхности. В соответствии с этим при точении валов с малой поперечной жесткостью точность формы можно существенно повысить путем частичной или полной компенсации силы P_y, что подтверждается практикой применения на токарных станках люнетов. При точении с ОПД неблагоприятное действие составляющей силы резания P_y может быть ограничено при правильном направлении приложения дополнительной нагрузки ОПД P_o [11], составляющая $P_{o\,yz}$ которой в плоскости *yz* (рис. 4), как правило, выше радиальной составляющей силы резания P_y. Полная компенсация действия радиальной составляющей P_y силы резания может быть обеспечена путем изменения направления приложения нагрузки ОПД — угла ψ к оси *y*. В этом случае радиальные составляющие сил резания и ОПД равны: $P_y = P_{o\,y}$ и угол действия ψ составляющей $P_{o\,yz}$ нагрузки ОПД по отношению к оси *y* рассчитывается как

$$\psi = \arccos[P_{o\,y}/(P_o \cos\varphi)],$$

где φ — главный угол резца в плане.

Экспериментальные исследования влияния нагрузки ОПД на точность обработки [11] проводили

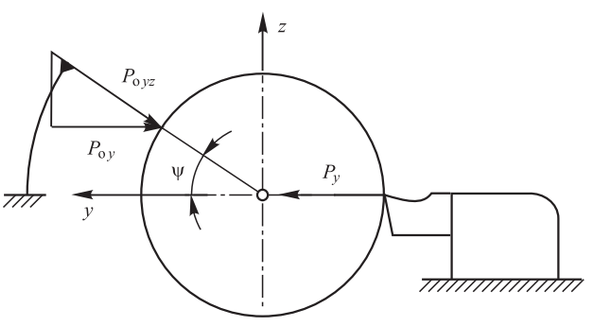


Рис. 4. Составляющие силы резания P_y и нагрузки ОПД $P_{o\,y}$, действующие на заготовку в плоскости *yz* в направлении оси *y*

up_118.indd 38 28.12.2017 11:05:53

на операции точения цилиндрических заготовок из сталей 20Х13 (диаметр d = 35 мм; длина l = 350 мм), 12Х18Н10Т (d = 25 мм; l = 340 мм), 12Х21Н5Т (d = 23 мм; l = 300 мм) и сплава ХН77ТЮР (d = = 22 мм; l = 330 мм). Опытным путем установлено, что при равенстве радиальных составляющих сил резания и ОПД достигается существенное снижение отклонения профиля продольного сечения — в 2,4...3,3 раза. Эффективность воздействия нагрузки ОПД зависит от поперечной жесткости заготовки. Показано, что одновременно со снижением отклонения профиля продольного сечения наблюдается уменьшение отклонения от круглости — в 1,2...1,6 раза. Последнее объясняется демпфирующим действием накатного устройства.

Повышение точности обработки при точении с деформационным упрочнением материала срезаемого слоя создает возможность дополнительной интенсификации технологического процесса за счет увеличения параметров режима резания: подачи S_o и глубины резания t.

Высокая эффективность применения дополнительных нагружающих устройств, воздействующих на материал срезаемого слоя заготовки в процессе резания по схеме, приведенной на рис. 1, имеет место и при размерной обработке композиционных материалов [6, 12, 13]. На рис. 5 в качестве примера представлены опытные данные по изменению главной составляющей P_z силы резания и коэффициента относительного изменения периода стойкости режущего инструмента $K_T = T_0/T$ (T — период стойкости инструмента при обычном резании; T_0 — период стойкости при дополнительном воздействии на срезаемый слой) в зависимости от линейной нагрузки $q = P_o/l_к$ (где $l_к$ — длина контакта рабочего участка ролика и поверхности резания на заготовке) при обработке полимерного композиционного материала (ПКМ) — стеклопластика тканевой намотки марки СТК-114. Видно, что увеличение нагрузки q на поверхность резания вызывает монотонное снижение силы резания P_z и, как следствие, повышение периода стойкости инструмента T_0. При q = 2 МН/м период стойкости инструмента увеличивается более чем в 10 раз по сравнению со стойкостью при обычном резании.

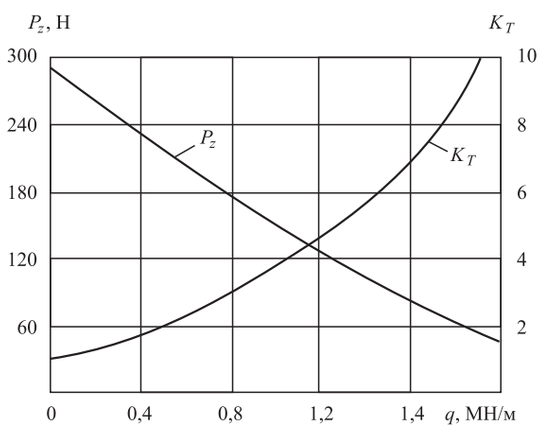


Рис. 5. Зависимости главной составляющей P_z силы резания и коэффициента относительного изменения периода стойкости режущего инструмента K_T от линейной нагрузки q накатного ролика при точении стеклопластика СТК-114 с предразрушением (v = 1,5 м/с; S_o = 0,3 мм/об; t = 2 мм)

Следует отметить, что эффект от применения деформирующего ролика в этом случае объясняется не изменением пластических свойств материала, как при ОПД металлов, а предразрушением срезаемого слоя. Исследования показывают, что состояние наружных слоев стеклопластика на поверхности резания после воздействия накатного ролика характеризуется разрушением хрупкой эпоксидной матрицы, нарушением сплошности связующего и наполнителя и выражается в виде микрорастрескивания и расслоения полимерных композиционных материалов (ПКМ), что подтверждается и результатами измерения твердости. Например, для указанной нагрузки q = 1,8 МН/м средняя твердость HV материала поверхности резания в 5...8 раз ниже, чем при обычном точении.

Повышение усилия накатывания P_o вызывает увеличение глубины и степени деструкции поверхностного слоя, что и объясняет монотонное уменьшение силы резания с увеличением нагрузки q на рис. 5. Дальнейшее повышение q приводит к снижению силы резания практически до нуля. Это означает, что почти вся работа, связанная с разрушением срезаемого слоя, осуществляется в процессе обработки воздействием дополнительного механического устройства — ролика, а резец лишь подчищает неполностью отслоившийся материал заготовки. Однако в этом случае наблюдается существенное ухудшение параметров качества обработанной поверхности (увеличение шероховатости, волнистости, появление ворса и расслоений поверхностного слоя).

В целом эффективность применения метода резания с предразрушением материала срезаемого слоя существенно зависит от свойств обрабатываемых ПКМ и других условий обработки. При обработке стеклопластиков и углепластиков с относительно хрупкой матрицей, таких как АГ-4С, 3К1Ф3, СВАМ 1:1, ВХ7-350-42, КМУ-2Л, повышение периода стойкости инструмента составляет 5...12 раз.

up_118.indd 39 28.12.2017 11:05:53

Высокая эффективность метода достигается при обтачивании песчано-полимерных оправок для намотки крупногабаритных корпусных изделий из ПКМ. Материал оправки представляет собой композицию из частиц кварцевого песка, склеенных поливиниловым спиртом, и отличается низкой пластичностью и высокими абразивными свойствами. После сборки элементов оправки предусмотрена ее механическая обработка, которую проводят с помощью инструментальных наладок, оснащенных вставками из дорогостоящих синтетических алмазов. При этом припуск на обработку h достигает 10...15 мм. Применение резания с предразрушением срезаемого слоя позволяет основную часть припуска разрушать путем воздействия накатного ролика на срезаемый слой. В результате режущим инструментом удаляют лишь небольшой слой материала (до 2 мм), обеспечивая необходимое качество обработки. Это позволяет значительно сократить расход инструментальных материалов и снизить себестоимость процесса обработки.

Для задач ОПД и предразрушения срезаемого слоя кроме накатки поверхности резания роликом находят применение такие методы упрочняющей технологии, как выглаживание, ультразвуковое упрочнение, центробежная обработка и чеканка. Особенности распределения деформаций в поверхностном слое материала заготовки и их интенсивность при различных методах поверхностного упрочнения делают применение указанных методов наиболее эффективным в разных интервалах режимов обработки и, прежде всего, толщин срезаемого слоя a [14]. Так, если при накатывании роликом наибольшее повышение стойкости ($T_0/T \geqslant 2{,}5$) достигается при $a \approx 0{,}14...0{,}47$ мм, то в случае ультразвукового воздействия на материал максимальный эффект имеет место в интервале $a \approx 0{,}065...0{,}15$ мм, а для выглаживания — при $a \approx 0{,}035...0{,}075$ мм ($T_0/T \geqslant 2$). Предварительное поверхностное упрочнение срезаемого слоя методом чеканки наиболее эффективно при толщинах среза $a > 0{,}7$ мм, при которых относительное повышение периода стойкости инструмента T_0/T при ОПД превышает соответствующие значения для других методов ППД. В соответствии с этим применение различных методов упрочнения позволяет обеспечить высокую эффективность резания с ОПД в широком диапазоне толщин срезаемого слоя: $a = 0{,}03...1{,}5$ мм.

Методы ОПД и предразрушения материала срезаемого слоя реализованы на разных операциях обработки резанием: точения, фрезерования, шлифования, нарезания резьб метчиками, протягивания, развертывания и др. При этом степень и характер влияния дополнительного энергетического воздействия на отдельные технологические факторы могут существенно различаться в зависимости от специфических особенностей технологической операции. Например, шлифование с предварительным деформационным упрочнением срезаемого слоя сталей и сплавов, отличающихся повышенной пластичностью, не уступает по точности и шероховатости обработанных поверхностей обычному шлифованию и одновременно позволяет существенно повысить ресурс работы изделия, его эксплуатационные характеристики, значительно снижает интенсивность засаливания шлифовальных кругов, повышает режущую способность абразивных инструментов, увеличивает период их стойкости [15, 16].

Формообразование резьбовых поверхностей сопровождается пластическим течением материала, вытеснением его в свободное пространство. В результате при обработке вязких материалов у вершин резьбового профиля образуется заусенец — выступающий валик из вытесненного материала. Такое искажение геометрии профиля резьбы называется кратером. От величины кратера зависит в дальнейшем качество сборки изделий. Поэтому в нормативных документах на внутренние резьбы оговаривается допустимая величина кратера, что оказывает непосредственное влияние на технологическую стойкость метчиков. Таким образом, период стойкости метчиков при обработке вязких материалов часто определяется не величиной износа инструмента, а размером кратера, что значительно сокращает продолжительность их работы между переточками.

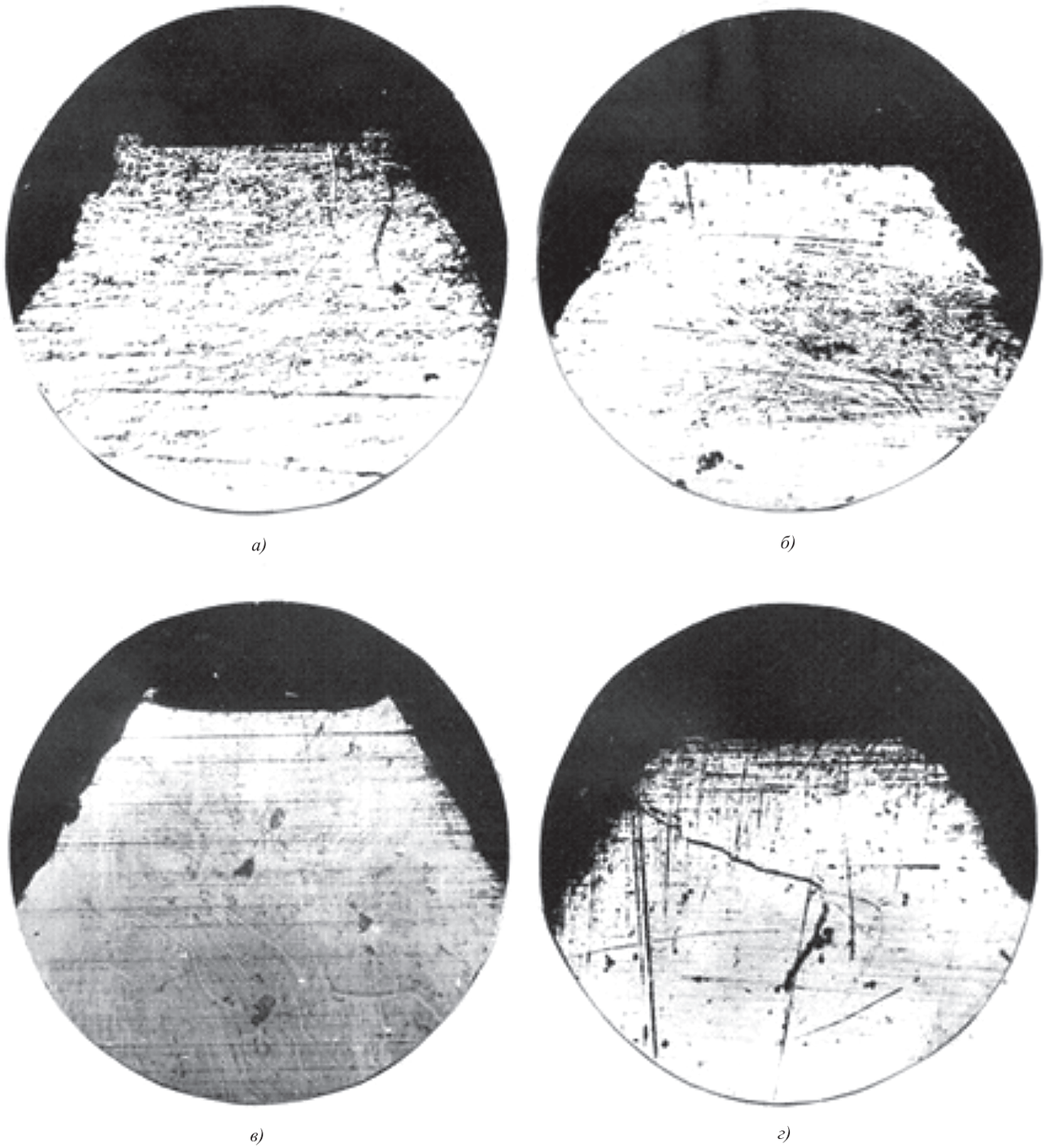
При нарезании резьб метчиками предварительное пластическое деформирование материала срезаемого слоя может осуществляться выглаживающей прошивкой. В этом случае, как показали экспериментальные исследования [17], обработка резьбовых отверстий М6, М10×1 и М12×1,25 в сталях 20Х13, 12Х18Н9Т и 50РАСШ обеспечивает снижение крутящего момента на 16...26 %, увеличивает технологическую стойкость инструмента в 1,3...1,8 раза по сравнению с традиционным способом нарезания резьбы метчиками, создает условия для уменьшения числа метчиков в комплекте и повышения производительности обработки. Вместе с этим достигается повышение геометрической точности профиля нарезаемой резьбы. На рис. 6 приведены микрофотографии профилей резьбы после обычного резания и резания с предварительным пластическим деформированием.

Уменьшение пластичности материала обрабатываемой поверхности отверстия, особенно в зоне

up_118.indd 40 28.12.2017 11:05:53

формирования вершин зубьев резьбы, снижает или полностью исключает склонность к образованию заусенца (см. рис. 6, *б*, *г*), повышая точность профиля резьбы, и тем самым существенно увеличивает продолжительность работы метчиков в пределах заданного технологического требования на обработку — допуска квалитета IT6.

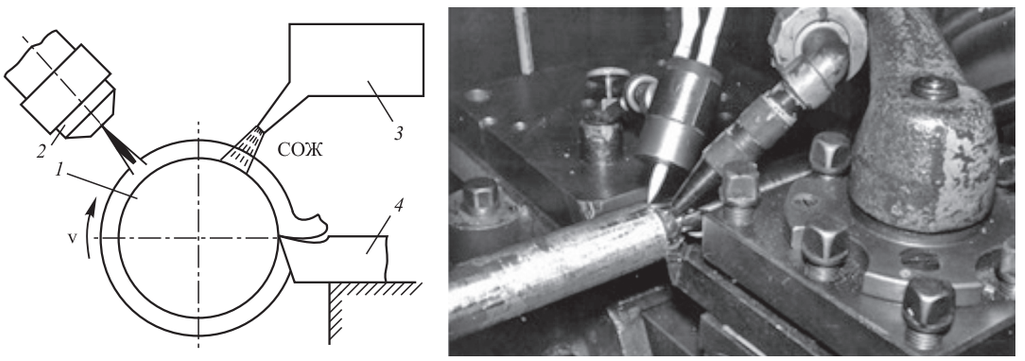
Одним из распространенных способов упрочнения стальных изделий, повышения их долговечности и надежности является применение терми-



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 6. Микрофотографии профиля резьбы в образцах из сталей 50РАСШ (*а*, *б*) и 12Х18Н9Т (*в*, *г*), ×100:
а, *в* — нарезание резьбы обычным способом; *б*, *г* — нарезание резьбы с предварительным упрочнением срезаемого слоя; износ зубьев метчика $h_з$ = 0,2 мм

up_118.indd 41 28.12.2017 11:05:53



а) *б)*

Рис. 7. Принципиальная схема обработки резанием с термоциклическим воздействием на материал (*а*) и общий вид зоны обработки при точении (*б*):
1 — заготовка; *2* — устройство для нагрева (плазматрон); *3* — система охлаждения (система подачи СОЖ); *4* — режущий инструмент

ческой обработки, в частности закалки. Совмещение процессов теплового воздействия на материал и удаления стружки является также наряду с обработкой с ОПД одним из методов совершенствования процесса резания [7].

Повышение обрабатываемости резанием, увеличение производительности труда и периода стойкости режущего инструмента достигаются благодаря структурным изменениям материала в поверхностном слое заготовки при последовательном воздействии в процессе обработки высокотемпературного нагрева и охлаждения срезаемого слоя. Нагрев и охлаждение могут осуществляться любыми известными методами, в частности для локального нагрева материала срезаемого слоя эффективно применение плазменной струи в сочетании с охлаждающим действием технологической среды. Например, при наружном точении (рис. 7) разогретый с помощью плазматрона поверхностный слой металла поступает при вращении заготовки под струю смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ), которая подается через наконечник на поверхность резания, обеспечивая необходимый термический цикл "нагрев — охлаждение". Образующийся на поверхности резания тонкий слой материала с пониженной пластичностью способствует снижению напряженности процесса резания и повышению технико-экономических показателей процесса обработки.

При оптимальных условиях обработки метод обеспечивает повышение производительности труда до 1,5 раз и увеличение стойкости режущего инструмента в 2...3 раза. Наиболее целесообразной областью его применения являются операции чернового и получистового точения сталей, отличающихся повышенной вязкостью.

Заключение

Обобщение результатов исследований показывает, что комбинированные методы обработки заготовок, в основе которых лежит совместное использование энергетических воздействий на материал срезаемого слоя упрочняющих технологий и резания, позволяют значительно улучшить обрабатываемость материалов резанием и успешно решить большое число технологических задач. К таким задачам относятся увеличение производительности труда и периода стойкости режущего инструмента, снижение силы и температуры резания, повышение точности формы (снижение отклонения профиля продольного сечения и отклонения от круглости) и качества обработанной поверхности. Результативность комбинированной обработки и решаемые технологические задачи в этом случае зависят от специфики технологической операции. Использование разных способов ППД (накатывание роликом, выглаживание, ультразвуковое упрочнение, центробежная обработка, чеканка) и конструкций деформирующего инструмента обеспечивает существенное расширение диапазона элементов режима резания, при которых достигается высокая эффективность применения дополнительного энергетического воздействия на материал заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ярославцев В.М.** Базовые положения общности технологических методов обработки // Матер. 7-го Всероссийского совещания-семинара "Инженерно-физические проблемы новой техники". М., 2003. С. 185—186.

up_118.indd 42 28.12.2017 11:05:53

2. **Ярославцев В.М.** Резание с опережающим пластическим деформированием. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. 46 с.

3. **Нетрадиционные** методы обработки материалов / А.Н. Ковшов и др. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 212 с.

4. **Крайнев Д.В., Полянчиков Ю.Н., Бондарев А.А.** Повышение эффективности точения деформируемых сталей и сплавов с опережающим пластическим деформированием. Волгоград, ВолГТУ, 2015. 160 с.

5. **Ярославцев В.М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 180 с.

6. **Токарная** обработка полимерных материалов с предварительным поверхностным деформированием заготовок / О.Ю. Еренков, А.С. Верещагина, Е.Г. Кравченко, М.А. Козлова // Вестник машиностроения. 2016. № 2. С. 28—32.

7. **Ярославцев В.М.** Способ резания с термоциклическим воздействием на материал // Машины. Приборы. Стенды. 1982. Вып. 8. С. 61.

8. **Режимы** резания труднообрабатываемых материалов: справочник / Я.Л. Гуревич, М.В. Горохов, В.И. Захаров и др. М.: Машиностроение, 1986. 240 с.

9. **Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.** Высокопроизводительная технология чистовой обработки при точении с опережающим пластическим деформированием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 4. С. 97—105.

10. **Машиностроение.** Энциклопедия. Т. III-3. Технология изготовления деталей машин / А.М. Дальский, А.Г. Суслов, Ю.Ф. Назаров и др. М.: Машиностроение, 2000. 840 с.

11. **Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.** Точность обработки при точении с опережающим пластическим деформированием // Машиностроение и компьютерные технологии. 2017. № 4. С. 33—43.

12. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 4. С. 3—24.

13. **Ярославцев В.М., Цуканов В.Н.** Точение стеклопластиков с предразрушением срезаемого слоя // Известия вузов. Машиностроение. 1989. № 3. С. 122—126.

14. **Ярославцев В.М.** Эффективность методов опережающего деформационного упрочнения материала срезаемого слоя при обработке резанием // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2015. № 1 (100). С. 119—127.

15. **Худобин Л.В., Унянин А.Н.** Минимизация засаливания шлифовальных кругов. Ульяновск, УлГТУ, 2007. 208 с.

16. **Ярославцев В.М.** Технологические возможности резания с опережающим пластическим деформированием при чистовой абразивной обработке // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 4. С. 67—74.

17. **Ярославцев В.М.** Нарезание резьб метчиками с предварительным пластическим деформированием материала срезаемого слоя // Машиностроение и компьютерные технологии. 2013. № 8. С. 1—8.

Продолжается подписка на журнал "Упрочняющие технологии и покрытия"

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

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

107076, г. Москва, Колодезный пер., д. 2а, стр. 2
Тел.: (495) 785-60-69
e-mail: realiz@mashin.ru, www.mashin.ru

up_118.indd 43 28.12.2017 11:05:53

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2017 г.

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Бабичев А.П., Шоркин В.С., Антонова Н.М., Красноступ В.В. Формирование и адгезионная прочность механохимического твердосмазочного покрытия при виброволновой обработке (на примере MoS_2) .....№ 1

Балдаев Л.Х., Хамицев Б.Г., Балдаев С.Л., Прокофьев М.В. Влияние технологических параметров процесса детонационного напыления оксида алюминия на полиморфные превращения при формировании покрытия.....№ 7

Безъязычный В.Ф., Басков М.В. Влияние покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей .....№ 8

Безъязычный В.Ф., Матвеев А.С., Семёнов А.Н., Басков М.В. Учет упрочнения материала поверхностного слоя детали, обрабатываемой точением, при расчете остаточных напряжений, обусловленных тепловым фактором .....№ 2

Безъязычный В.Ф., Морскова С.В. Определение расчетного натяга при сборке неподвижных неразъемных соединений с учетом параметров качества поверхностного слоя соединяемых деталей и особенностей процесса обработки резанием.....№ 8

Беликов А.И., Богданец Д.С., Васильев С.Г., Калинин В.Н., Шарапков М.А. Исследование влияния антифрикционных упрочняющих покрытий на энергоэффективность обработки при сверлении стали .....№ 11

Богодухов С.И., Козик Е.С., Свиденко Е.В. Разработка технологии непрерывного лазерного воздействия на титановольфрамовые твердые сплавы.....№ 6

Вдовин К.Н., Ячиков И.М., Данилюк К.А. Математическая модель для определения параметров электростатического введения наночастиц во вращающийся металл .....№ 3

Гадалов В.Н., Ковалев С.В., Ворначева И.В., Филонович А.В., Розин А.Ю. Повышение износостойкости порошковых титановых сплавов выбором состава легирующих элементов .....№ 5

Гурьянов Г.Н. Оценка осевого напряжения при разных моделях упрочнения материала проволоки по формулам, включающим действительный угол волочения и приведенный угол И.Л. Перлина .....№ 2

Гурьянов Г.Н. Степень различия показателей волочения при разных моделях упрочнения материала круглого сплошного профиля и равном значении среднего предела текучести в очаге пластической деформации .....№ 10

Злобина И.В., Бекренев Н.В., Павлов С.П. Упрочняющее модифицирование в СВЧ электромагнитном поле изделий, сформированных путем трехмерной печати из неметаллических композиционных материалов.....№ 12

Кокорева О.Г. Исследование параметров качества поверхностного слоя тяжелонагруженных деталей машин, упрочненных методами поверхностно-пластического деформирования.....№ 11

Кулинский А.Д., Бутенко В.И., Гусакова Л.В. Определение склонности материала к технологической наследственности при отделочно-упрочняющей обработке поверхностей деталей.....№ 1

Лебедев В.А., Новиков С.В. Анализ параметров управления формированием структуры шва при воздействии механическими колебаниями низкой частоты на расплав сварочной ванны .....№ 12

Логинов Н.Ю. Исследование трибологических характеристик образцов с покрытием, нанесенным электроискровым методом.....№ 2

Михальченков А.М., Локтев А.А., Михальченкова М.А. Влияние технологии двухслойной наплавки низкоуглеродистыми электродами на интенсивность изнашивания и ресурс восстановленных плужных лемехов.....№ 7

Михрютина А.В., Кожина Т.Д. Концептуальная модель физико-химической основы метода разработки оптимальной структуры

up_118.indd 44 28.12.2017 11:05:53

и химического состава демпфирующих покрытий лопаток ГТД .....№ 8

Мокрицкий Б.Я., Волосова М.А., Верещака А.А., Верещака А.С. Упрочнение керамического металлорежущего инструмента путем модифицирующей обработки .....№ 4

Мокрицкий Б.Я., Соловьёв В.А., Верещагин В.Ю., Саблин П.А. Повышение конкурентоспособности твердосплавных концевых фрез.....№ 6

Мокрицкий Б.Я., Соловьёв В.А., Саблин П.А. Управление эксплуатационными свойствами металлорежущего инструмента с использованием арсенала упрочняющих воздействий .....№ 7

Нафиков М.З., Загиров И.И., Юнусбаев Н.М., Наталенко В.С., Шакиров И.Р. Контактная приварка растянутой присадочной проволоки .....№ 5

Панков В.П. Исследование характеристик износостойкости покрытий и наплавленных материалов для восстановления изделий из чугуна .....№ 9

Романов И.О., Перваков Д.Г. Формирование основных направлений развития сварочно-наплавочных материалов на основе методов математически-статистического подхода .....№ 12

Сушенцов Н.И., Степанов С.А., Шашин Д.Е. Разработка методики формирования функциональных покрытий на основе комплексного нитрида титана и алюминия и исследование их свойств .....№ 3

Табаков В.П., Сизов С.В. Исследование параметров структуры и механических свойств покрытий на основе нитридов титана, циркония и ниобия .....№ 2

Федоров С.К., Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Карпухин С.Д. Повышение износостойкости стальных деталей электромеханической обработкой.....№ 7

Федосов С.А. Определение адгезионных свойств методом идентирования .....№ 2

Федосов С.А. Оценка трещиностойкости хрупких материалов методом индентирования .....№ 6

Федосов С.А. Применение кинетического индентирования для измерения параметров напряженно-деформированного состояния ...№ 9

Чекалова Е.А. Исследование строения дискретного оксидного покрытия на быстрорежущем и твердосплавном инструменте .....№ 7

Чекалова Е.А. Структура и свойства локального диффузионного покрытия, нанесенного на быстрорежущую сталь .....№ 9

Ячиков И.М., Вдовин К.Н., Данилюк К.А. Математическая модель движения частицы в металлическом расплаве.....№ 5

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Безъязычный В.Ф., Басков М.В., Дружков С.С. Исследование влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на усталостную прочность деталей ГТД при обработке точением.....№ 4

Безъязычный В.Ф., Голованов Д.С. Методология определения остаточных напряжений в поверхностном слое детали при дорновании.....№ 8

Безъязычный В.Ф., Прокофьев М.А., Бардинова С.Н. Расчетное определение параметров упрочнения материала поверхностного слоя деталей при механической обработке .....№ 8

Безъязычный В.Ф., Фоменко Р.Н., Непомилуев В.В. Исследование влияния технологических условий обработки точением режущим инструментом с износостойкими покрытиями на параметры качества поверхностного слоя деталей машин .....№ 3

Блюменштейн В.Ю., Петренко К.П. Исследование влияния программ нагружения на шероховатость поверхности в процессах ППД.....№ 6

Болотеин А.Н., Сутягин А.Н. Моделирование трибоконтакта сопрягаемых деталей машин с учетом упрочнения поверхностного слоя .....№ 8

Волков Д.И., Гущин А.Ю., Рыкунов А.Н. Технологические возможности обработки металлическими и стеклянными микрошариками материалов ВТ9 и ЭИ787ВД .....№ 8

Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Влияние кинематики процессов поверхностного пластического деформирования на качество упрочненного слоя .....№ 5

Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Влияние поверхностного пластического деформирования в стесненных условиях на качество упрочненного слоя .....№ 11

Зайдес С.А., Нгуен Ван Хинь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на образование регулярного микрорельефа поверхностного слоя .....№ 12

Исаев А.Н., Лебедев А.Р., Власкин С.В. Аналитическое исследование напряжений и деформаций в процессах упругопласти-

up_118.indd 45 28.12.2017 11:05:53

ческой осадки высоких тонкостенных цилиндров, обработанных дорнованием .....№ 4

Королев А.В., Балаев А.Ф. Исследование механизма продольной вибромеханической правки длинномерных цилиндрических деталей .....№ 4

Королев А.В., Балаев А.Ф., Савран С.А. Экспериментальное исследование продольной правки стержневых маложестких деталей регулируемым изгибом .....№ 2

Неверов А.Н. Колебательная система для ультразвуковой ударной обработки.....№ 3

Тамаркин М.А., Тищенко Э.Э., Шведова А.С., Новокрещенов С.А. Проектирование технологических процессов обработки деталей динамическими методами поверхностного пластического деформирования с учетом увеличения их жизненного цикла .....№ 12

Щедрин А.В., Есов В.Б., Алешин В.Ф., Климочкин К.О., Косарев И.В., Чихачева Н.Ю. Повышение эффективности комбинированного дорнования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности отверстия обрабатываемой заготовки .....№ 7

Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Кострюков А.А. Совершенствование охватывающего поверхностного пластического деформирования за счет регуляризации микрогеометрии поверхности обрабатываемой заготовки .....№ 4

Щедрин А.В., Кострюков А.А. Применение триботехнологий на основе самоорганизации для системного совершенствования процессов холодного пластического деформирования .....№ 11

Щедрин А.В., Поляков А.О., Сергеев Е.С., Зинин М.А., Косарев И.В. Теоретическое и экспериментальное исследование метода комбинированного прошивания (протягивания) отверстий инструментом с регулярной микрогеометрией в условиях применения металлоплакирующих смазок .....№ 3

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Балановский А.Е., Ву В.Г. К вопросу определения размера пятна нагрева при плазменной поверхностной обработке .....№ 2

Балановский А.Е., Ву В.Г. Насыщение поверхности металла углеродом при плазменной поверхностной обработке.....№ 9

Батраев И.С. Использование многокомпонентного топлива метилацетилен-алленовая фракция (МАФ) при детонационном напылении.....№ 1

Безъязычный В.Ф., Румянцева Н.В. Способы восстановления радиальных зазоров турбины ГТД методами газотермического напыления и наплавки .....№ 6

Белоцерковский М.А. Совершенствование оборудования и технологий высокоскоростной электродуговой металлизации.....№ 11

Бржозовский Б.М., Зинина Е.П., Мартынов В.В., Плешакова Е.С. Самоорганизация композитной структуры, сформированной при низкотемпературном плазменном упрочнении, в процессе эксплуатации.....№ 5

Бровер А.В., Бровер Г.И. Повышение качества покрытий, нанесенных на поверхность сталей электроискровым легированием и ионно-плазменным напылением, путем лазерной обработки.....№ 10

Будилов В.В., Ягафаров И.И., Янсаитова М.И. Исследование зависимости микротвердости и фазового состава покрытия TiN от расположения деталей в вакуумной камере при осаждении из плазмы вакуумно-дугового разряда.....№ 1

Вытнов Ю.В., Александрин А.Г., Голубев С.В., Герасимов Е.А., Кошман В.П. Применение порошков ВЗК для плазменной наплавки уплотнительных и трущихся поверхностей арматуры АЭУ .....№ 5

Гадалов В.Н., Коломенский А.Б., Ворначева И.В., Филатов Е.А., Макарова И.А. Исследование фазового состава, структуры и свойств композита быстрорежущая сталь с магнетронным покрытием .....№ 11

Жданович О.А., Овчинников В.В., Учеваткина Н.В. Влияние плазменной обработки на микрорельеф поверхности деталей из титанового сплава ВТ6.....№ 1

Зайцев Н.Г., Мазилин И.В., Балдаев Л.Х., Овчинников В.В. Изменение микроструктуры керамического слоя ZrO_2—Y_2O_3 теплозащитного покрытия под влиянием лазерного оплавления .....№ 3

Иванов В.И. Об эрозионной составляющей процесса формирования измененного поверхностного слоя на катоде при электроискровом легировании.....№ 6

Ким В.А., Башков О.В., Катунцева Н.Л., Гадоев Г.А. Мультифрактальный анализ микроструктур материалов после лазерной обработки.....№ 4

Кузьмин С.Д., Тарасова Т.В., Белашова И.С., Гусаров А.В., Белоконь Т.Д. Использование математического аппарата для планирования эксперимента и прогнозирования

up_118.indd 46 28.12.2017 11:05:53

свойств поверхности образца после лазерной обработки ..... № 9

Кукареко В.А., Григорчик А.Н., Белоцерковский М.А., Сосновский А.В. О природе формирования метастабильной аустенитной структуры при газотермическом напылении высокохромистой стали мартенситного класса 95Х18 ..... № 7

Мигранов М.Ш., Шехтман С.Р., Ахметова Э.З. Исследование износостойких многослойных покрытий системы Ti—C—Si, синтезированных из плазмы вакуумно-дугового разряда ..... № 3

Овчинников В.В., Учеваткина Н.В., Лукьяненко Е.В., Курбатова И.А., Якутина С.В., Шамрай В.Ф. Эволюция структуры поверхностных слоев стали 30ХГСН2А в процессе ее имплантации ионами меди ..... № 9

Панков В.П., Баженов А.В., Панков Д.В., Шепеть И.П. Исследование электропроводности плазменных покрытий на углеродном волокне ..... № 2

Панков В.П., Баженов А.В., Панков Д.В., Шепеть И.П. Исследование электромагнитной проницаемости плазменных покрытий на углеродном волокне ..... № 4

Прибытков Г.А., Барановский А.В., Фирсина И.А., Дураков В.Г., Криницын М.Г. Твердость и абразивная износостойкость электронно-лучевых покрытий, наплавленных СВС композиционными порошками TiC + сталь Р6М5 ..... № 10

Тарасова Т.В., Кузьмин С.Д., Белашова И.С., Прокофьев М.В., Белоконь Т.Д. Исследование влияния воздействия лазерного излучения на микроструктуру и свойства коррозионно-стойкой стали ..... № 5

Чубаров Д.А., Будиновский С.А., Смирнов А.А., Матвеев П.В. Влияние высокотемпературных испытаний на микроструктуру керамического слоя теплозащитного покрытия ..... № 1

Яресько С.И., Балакиров С.Н. Моделирование лазерного упрочнения вершины режущего клина инструмента ..... № 10

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Виноградов С.С., Теркулова Ю.А., Никифоров А.А., Лещёв К.А. Влияние технологии нанесения износостойких покрытий Ni-P и Ni-B на механические свойства высокопрочных сталей типа 30ХГСН2А ..... № 1

Груздев А.А., Моргунов Ю.А., Саушкин Б.П. Гибкий технологический модуль для модификации свойств поверхностного слоя малоразмерных деталей ..... № 5

Емельянова Т.В., Грызунов В.И., Приймак Е.Ю., Фирсова Н.В. Структура и свойства штамповой стали 4Х5МФС после низкотемпературного цианирования ..... № 4

Емельянова Т.В., Грызунов В.И., Приймак Е.Ю., Фирсова Н.В. Упрочнение поверхностных слоев штамповых сталей борированием ..... № 1

Ковтунов А.И., Семистенова Т.В., Острянко А.М. Жаростойкие покрытия на основе сплавов системы Cr—Al ..... № 3

Мишигдоржийн У.Л., Сизов И.Г. Исследование влияния порошкового бороалитирования на механические свойства хромомарганцевой стали ..... № 4

Степанов М.С., Домбровский Ю.М., Давидян Л.В. Теплофизический анализ и кинетика микродугового нагрева стали ..... № 11

Хусаинов Ю.Г., Рамазанов К.Н., Есипов Р.С. Низкотемпературное ионное азотирование конструкционных сталей 13Х11Н2В2МФ-Ш и 12Х18Н10Т с ультрамелкозернистой структурой ..... № 10

Шеховцева Е.В., Шеховцева Т.В. Упрочнение поверхностного слоя рабочих поверхностей зубчатых колес с помощью химико-термической обработки ..... № 8

Юркевич С.Н., Полякова Т.Л., Ващенко И.М., Андриенок К.Г., Аблажей Н.М. Технология нанесения хромового покрытия на детали из титановых сплавов ..... № 12

ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Антонова Н.М., Бабичев А.П., Гасанов Б.Г., Гасанов А.Б., Егоров С.Н. Формирование структуры и свойств антифрикционных покрытий на основе пористых металлоорганических матриц Na-КМЦ—Al с дисульфидом молибдена ..... № 3

Балакай В.И., Арзуманова А.В., Старунов А.В., Мурзенко К.В. Свойства композиционного гальванического покрытия никель—кобальт—оксид кремния ..... № 7

Беликов А.И., Данилов М.А., Петров В.В., Седых Н.С. Исследование влияния дискретной структуры на трибологические свойства антифрикционных упрочняющих композитных покрытий ..... № 12

up_118.indd 47 28.12.2017 11:05:53

Гадалов В.Н., Емельянов С.Г., Ворначева И.В., Макарова И.А., Филатов Е.А. Исследование субструктуры и свойств спеченного титанового сплава с электрофизическим покрытием, подвергнутым выглаживанию минералокерамикой .....№ 12

Жачкин С.Ю., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Пеньков Н.А., Михайлов В.В., Сидоркин О.А. Упрочнение контактных поверхностей инструмента из быстрорежущих сталей дисперсно-упрочненным композитным хромовым покрытием .....№ 12

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Иванов В.В., Бабичев А.П., Смоленцев В.П., Кондратьев М.В. Формирование химико-механических покрытий для опорных поверхностей сопрягаемых деталей.....№ 9

Санамян Г.В., Бойко Н.И., Лебедев В.А. Оценка силовых и стойкостных показателей термофрезерования наплавленного металла .....№ 11

Силаев Д.В., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н. Комбинированная обработка поверхностей сложного профиля под покрытие.....№ 6

Смоленцев В.П., Кондратьев М.В., Иванов В.В. Проектирование технологических процессов получения высокоресурсных комбинированных покрытий.....№ 6

Яковлев С.А., Замальдинов М.М., Татаров Л.Г. Влияние электромеханической обработки на структуру и твердость титанового сплава ВТ22 .....№ 10

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Афонин С.М. Статические и динамические характеристики пьезоактюаторов для нано- и микроманипуляторов .....№ 5

КОНТРОЛЬ КАЧЕСТВА УПРОЧНЯЮЩЕЙ ОБРАБОТКИ

Абышев С.В. Способы магнитопорошкового контроля.....№ 6

УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Панфилов Ю.В. Наноструктурированные тонкопленочные покрытия с различными упрочняющими эффектами .....№ 11

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ НАНОСТРУКТУР

Фоминский Д.В., Бугай И.В., Романов Р.И., Жукова Е.А. Микро- и наноструктурные особенности твердосмазочных слоев MoS_x, получаемых традиционным и реактивным импульсным лазерным осаждением .....№ 10

ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Бардинова С.Н., Смирнов А.В. Исследование технологических возможностей метода удаления покрытий с поверхности деталей ГДТ водой под высоким давлением .....№ 10

Безъязычный В.Ф., Румянцева Н.В., Бардинова С.Н., Смирнов А.В. Использование упрочняющих методов обработки при ремонте лопаток компрессора газотурбинных двигателей.....№ 8

Габитов И.И., Сайфуллин Р.Н., Валиев А.Р. Упрочнение клапанных узлов электрогидравлических форсунок дизелей при ремонте .....№ 7

Райков С.В., Кормышев В.Е., Громов В.Е., Кондратова О.А., Никитина Е.Н. Технология футеровки поверхностей большеобъемных ковшей экскаваторов.....№ 6

Указатель статей, опубликованных в журнале в 2016 г. .....№ 1

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 01.11.2017 г. Подписано в печать 27.12.17 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49
Оригинал-макет: ООО "Адвансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1
Сайт: **www.aov.ru**

up_118.indd 48 28.12.2017 11:05:53