ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 14
2018
№ 3 (159)
март

Издается с января 2005 г.

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

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

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

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

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
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

Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В. Влияние интенсивности упрочнения и угла рабочего конуса волоки на осевое напряжение, запас прочности и прирост средней температуры в проходе волочения проволоки 99

Федорова Л.В., Федоров С.К., Гамидов А.Г., Гребенюк И.М., Савельева Л.В. Влияние электромеханической поверхностной закалки на изменение структуры и микротвердости сплава нирезист 106

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Мокрицкий Б.Я., Верещагин В.Ю. Компьютерное моделирование процесса механической обработки для оптимизации упрочняющего воздействия на заготовку 111

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Фоминский Д.В., Жукова Е.А., Смирнов А.А. Влияние режимов генерации, разлета и осаждения лазерного факела на состав и структуру наносимых твердосмазочных MoS_x-покрытий 117

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Скрябин М.Л., Смехова И.Н. Условия формирования нанопористых структур оксидных пленок при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов 124

ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Микаева С.А., Микаева А.С., Родюков М.С. Способы уменьшения ртутной опасности, упрочняющие технологии и защитные покрытия 128

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Сокольников В.Н., Сухочев Г.А., Коденцев С.Н. Технологическое обеспечение эксплуатационных показателей при доводке роторов комбинированной обработкой 132

Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А. Использование покрытий для повышения качества изделий и интенсификации процесса резания материалов с разными физико-механическими свойствами 136

ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Безъязычный В.Ф., Фоменко Р.Н., Ганзен М.А., Первов М.Л., Рассудов Н.В. Автоматизированное нанесение смазочных материалов на заготовки лопаток газотурбинных двигателей при штамповке 141

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
№ 3 (159)
March

Since 2005, January

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

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

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

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

Editorial council:
Yu.P. ANKUDIMOV
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

Guryanov G.N., Smirnov S.V. Influence of the intensitivity of simple strength and size of the work confusion of fiber on axial voltage, stability of strength and growth of medium temperature in the drawing line of wire 99

Fedorova L.V., Fedorov S.K., Gamidov A.G., Grebenyuk I.M., Saveleva L.V. Effect of electromechanical surface hardening on the changening of structure and microhardness of the Ni-resist alloy 106

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Mokritsky B.Ya., Vereschagin V.Yu. Computer simulation of the machining process to optimize the strengthening effects on the workpiece 111

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Fominski D.V., Zhukova E.A., Smirnov A.A. Influence of the regimes of generation, expansion and deposition of laser plume on the composition and structure of the formed solid lubricating MoS_x-coatings 117

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Scriabin M.L., Smechova I.N. Conditions for the formation of nanoporous structures of oxide films with microarc oxidation of piston aluminum alloys 124

POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

Mikaeva S.A., Mikaeva A.S., Rodyukov M.S. Ways to reduce mercury risk, hardening technologies and protectiv coatings 128

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Sokolnikov V.N., Suhochev G.A., Kodentsev S.N. Technological support of operating indicators at rotors operational development by combined treatment 132

Yaroslavtsev V.M., Yaroslavtseva N.A. Use of coatings to enhance product quality and intensify the process of cutting materials with different physical-mechanical properties 136

PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS

Bezyazychnyi V.F., Fomenko R.N., Ganzen M.A., Pervov M.L., Rassudov N.V. Automated applying of lubricants on blanks of blades for gas turbine engines when stamping 141

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

up_318.indd 98 28.02.2018 15:05:26

УДК 621.778.014

Г.Н. Гурьянов
(ОАО "НИИметиз", г. Магнитогорск),
С.В. Смирнов
(Институт машиноведения УрО РАН, г. Екатеринбург)
E-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

Влияние интенсивности упрочнения и угла рабочего конуса волоки на осевое напряжение, запас прочности и прирост средней температуры в проходе волочения проволоки

Приведены результаты расчета осевого напряжения, запаса прочности и прироста средней температуры в проходе волочения в зависимости от угла рабочего конуса волоки при разных значениях коэффициента упрочнения материала проволоки. Кривые для зависимостей осевого напряжения, запаса прочности и прироста средней температуры имеют экстремальные значения при одном значении угла волочения. Увеличение напряжения волочения и прироста средней температуры от деформационного упрочнения усиливается с ростом коэффициентов вытяжки и трения и длины калибрующего пояска волоки.

Ключевые слова: *волочение, проволока, методика расчета, предел текучести, коэффициент упрочнения, осевое напряжение, средняя температура волочения, запас прочности, калибрующий поясок, коэффициент трения.*

Presented the results of calculating the axial stress, the margin of strength, and the increase in the average temperature in the drawing line, depending on the angle of the working cone of the dies at different values of the coefficient of hardening of the wire material. The curves for the dependences of the axial stress, the safety factor and the increase in the mean temperature have extreme values at a single value of the angle of drawing. The increase in the drawing voltage and the increase in the average temperature from strain hardening is enhanced with an increase in the coefficients of drawing and friction and the length of the calibrating girdle of the dies.

Keywords: *drawing, wire, calculation technique, yield strength, hardening coefficient, axial stress, average drawing temperature, safety factor, sizing band, coefficient of friction.*

Введение

Температура волочения определяет эксплуатационную стойкость волок, качество проволоки и проволочных изделий, производительность волочильных станов [1—8]. Для оценки температурного режима волочения выполняют расчет прироста средней температуры в очаге деформации. Например, Р.Б. Красильщиков приводит многочисленные практические данные о температуре волочения без противонатяжения и эмпирическую формулу для расчета прироста средней температуры при единичном обжатии стальной проволоки

$$\Delta t = 0,45\delta\sigma_{в}, \qquad (1)$$

где $\sigma_{в}$ — временное сопротивление разрыву при растяжении; $\delta = (d_0^2 - d_k^2)/d_0^2$ — относительное обжатие. Формула получена при допущении, что 85 % мощности силы волочения идет на повышение температуры деформирования.

Необходимо отметить формулу Зибеля и Гудремона для расчета прироста средней температуры [1]

$$\Delta t = \frac{P}{F}\frac{1}{Ic\gamma}, \qquad (2)$$

где P — усилие волочения; F — площадь сечения проволоки после обжатия; I — механический эквивалент теплоты; c — удельная теплоемкость; γ — удельный вес.

up_318.indd 99 28.02.2018 15:05:26

Формула (2) отражает прямую и очевидную связь напряженного состояния и прироста средней температуры в процессе деформирования.

Для уточнения расчета прироста температуры Δt по формуле (2) А.И. Басс предложил ввести в нее поправочный коэффициент, равный 0,6...0,70 [1]. Однако введение поправочного коэффициента не обеспечивает обоснованного расчета по этой формуле прироста Δt при волочении с противонатяжением. Рост силы волочения P от приложения противонатяжения согласно формуле (2) должен привести к повышению прироста средней температуры в очаге деформации. В действительности от приложения противонатяжения температура волочения снижается.

В работах [9, 10] показан характер влияния коэффициентов вытяжки и трения, противонатяжения и формы кривой упрочнения материала проволоки на прирост средней температуры в проходе волочения. При этом не рассмотрена зависимость прироста средней температуры от угла волочения и интенсивности деформационного упрочнения. Также для теории и практики волочения представляет интерес установление характера влияния интенсивности упрочнения на осевое напряжение, прирост средней температуры и запас прочности проволоки в проходе волочения.

Цель работы — показать характер зависимостей осевого напряжения, запаса прочности и прироста средней температуры в проходе волочения от интенсивности упрочнения материала проволоки и угла рабочего конуса волоки при разных параметрах деформации.

Принятые модели упрочнения и методика расчета прироста средней температуры в проходе волочения

Рассмотрена модель упрочнения материала проволочной заготовки

$$\sigma_т = \sigma_{т0}\mu^k, \qquad (3)$$

где $\sigma_{т0}$ — предел текучести металла на входе рабочего конуса волоки; k — коэффициент упрочнения; $\mu = (r_0/r_k)^2$ — коэффициент вытяжки; r_0, r_k — радиусы заготовки до и после деформации соответственно. Расчеты напряженного состояния и температуры выполнили при конкретных значениях исходного предела текучести $\sigma_{т0}$ и коэффициента k упрочнения модели (3):

$$\sigma_т = 500\mu^{0,25}, \qquad (4)$$

$$\sigma_т = 500\mu^{0,55}, \qquad (5)$$

$$\sigma_т = 500\mu^{0,75}, \qquad (6)$$

$$\sigma_т = 500\mu^{1,37}, \qquad (7)$$

$$\sigma_т = 1000\mu^{0,25}, \qquad (8)$$

$$\sigma_т = 1000\mu^{0,55}, \qquad (9)$$

$$\sigma_т = 1000\mu^{0,75}, \qquad (10)$$

$$\sigma_т = 1000\mu^{1,37}, \qquad (11)$$

где $\sigma_т$ определяется в мегапаскалях.

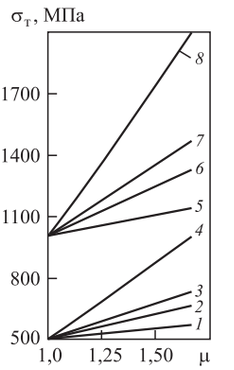


Рис. 1. Зависимость предела текучести от коэффициента вытяжки:
1 — модель упрочнения (4); *2* — (5); *3* — (6); *4* — (7); *5* — (8); *6* — (9); *7* — (10); *8* — (11)

Значения коэффициента упрочнения в интервале 0,25...0,75 (линии *1...3* и *5...7* на рис. 1) характерны для холодного волочения углеродистых и легированных сталей после патентирования и отжига [11, 12]. Коэффициент упрочнения 1,37 отражает интенсивное упрочнение стали 12Х18Н10Т в первых проходах маршрута холодного волочения. Перед деформированием эту сталь после выдержки при температуре 1050 °С охлаждали в воде, т. е. проводили закалку по заводскому режиму, общепринятому для высоколегированных сталей [12].

Прирост средней температуры в течение адиабатического процесса деформирования определяли с помощью уравнения

$$\Delta t = \eta Э/(c\gamma V_d), \qquad (12)$$

где $Э$ — энергия (работа), идущая на пластическое формоизменение и сдвиговую деформацию металла за время его нахождения в рабочем канале волоки объемом V_d, а также на уравновешивание силы контактного трения в рабочей зоне, включая калибрующий поясок; $\eta = 0,8$ (80 %) — доля механической работы $Э$, которая идет на повышение тепловой энергии в виде прироста температуры [3]; $\gamma = 7,8$ гс/см^3 — удельный вес; $c = 0,135$ кал/(г·°С) — удельная теплоемкость. Принятые значения γ и c характерны для углеродистой стали [13]. При переводе размерности в систему СИ для удельной теплоемкости использовали соотношение 1 кал = = 4,187 Дж.

Доля работы $Э$ силы волочения идет на пластическую деформацию и преодоление напряжений контактного трения в рабочем конусе и калибрующем пояске волоки. Другая часть работы (мощности) силы волочения идет на уравновешивание прироста силы волочения от действия противонатяжения и не влияет на прирост температуры

up_318.indd 100 28.02.2018 15:05:27

в проходе волочения. Но при этом противонатяжение снижает давление на поверхность волоки и силу контактного трения, что уменьшает работу $Э$ и прирост температуры от трения. Здесь проявляется полезное воздействие противонатяжения на процесс волочения. Но прирост силы волочения от приложения противонатяжения требует дополнительной энергии для осуществления процесса волочения. Для расчета энергосиловых показателей и прироста температуры в проходе волочения при конической форме рабочего канала волоки использованы приведенные ниже аналитические зависимости.

Аналитические формулы для расчета напряжения волочения и запаса прочности

На выходе рабочего конуса осевое напряжение σ_k рассчитывали по формуле

$$\sigma_k = \sigma_{z1} + \sigma_{z2} + \sigma_{z3}, \quad (13)$$

где σ_{z1} — прирост осевого напряжения в рабочем конусе; σ_{z2} — прирост осевого напряжения от действия напряжения противонатяжения σ_q; σ_{z3} — прирост напряжения на деформацию сдвига металла. Для модели упрочнения (3) имеем следующие составляющие напряжения σ_k [14, 15]:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{т0}(\mu^k - 1)(1 + f\mathrm{ctg}\alpha)/k, \quad (14)$$

$$\sigma_{z2} = \sigma_q\left[1 - \frac{f}{\mathrm{tg}\alpha}\left(\frac{\mu^k - 1}{k}\right)\right], \quad (15)$$

$$\sigma_{z3} = \frac{2\sigma_{т0}\mathrm{tg}\alpha(1 + \mu^k)}{3\sqrt{3}}, \quad (16)$$

где f — коэффициент контактного трения; α — угол наклона образующей рабочего конуса волоки к оси волочения, или угол волочения.

Прирост осевого напряжения в пояске длиной L и с радиусом r_k определили по формуле [16]

$$\sigma_{z4} = 2fL(\sigma_{тk} - \sigma_k)/r_k = \\ = 2\sigma_{тk}fL(1 - \sigma_k/\sigma_{тk})/r_k, \quad (17)$$

где $\sigma_{тk}$ — предел текучести металла на выходе рабочего конуса волоки.

Осевое напряжение на выходе волоки

$$\sigma_z = \sigma_k + \sigma_{z4}. \quad (18)$$

Абсолютный запас прочности Za рассчитывали как

$$Za = \sigma_{тk} - \sigma_z. \quad (19)$$

Результаты расчета напряжения волочения, прироста средней температуры и запаса прочности материала проволоки

На рис. 2 приведены зависимости осевого напряжения, прироста средней температуры в проходе волочения и абсолютного запаса прочности от угла волочения α при коэффициентах $\mu = 1{,}35$ и $f = 0{,}10$. Для построения зависимостей использованы модели упрочнения (4)...(11), за исключением модели (7), а также при $k = 0$. Значение угла α варьировали в интервале 3...13°. Расчеты выполнены при отсутствии противонатяжения (рис. 2, *а...в*, *ж...и*) и напряжении противонатяжения 250 МПа (рис. 2, *г...е*). Длина $L_п$ и радиус r_k пояска равны 1 мм (рис. 2, *а...е*) и $L_п = 0$ (рис. 2, *ж...и*).

Для исследуемых трех показателей (σ_z, t, Za) кривые *6...9* при исходном пределе текучести $\sigma_{т0} = 500$ МПа находятся заметно ниже кривых *1...5*, построенных при моделях упрочнения (8)... (11) с пределом текучести $\sigma_{т0} = 1000$ МПа. Кривые для осевого напряжения σ_z и прироста средней температуры t имеют минимум, а кривые для запаса прочности Za — максимум. Выделяется расположение кривой *5* при коэффициенте упрочнения $k = 1{,}37$. Расстояние между линиями *1...5* и *6...9* больше для показателя Za (рис. 2, *в*, *е*, *и*). При действии противонатяжения запас $Za < 0$ (рис. 2, *е*) при $\sigma_{т0} = 500$ МПа и $k = 0$ (отсутствует кривая *6*). Из сравнения форм кривых рис. 2, *а...в* при отсутствии противонатяжения и кривых на рис. 2, *г...е* при напряжении противонатяжения 250 МПа следует, что осевое напряжение σ_z увеличилось, а прирост температуры t и запас прочности Za под действием противонатяжения уменьшились. При этом от противонатяжения минимум для σ_z и t и максимум для Za сместились влево, в сторону уменьшения угла α.

Сопоставление соответствующих кривых рис. 2, *а...в* при наличии калибрующего пояска и кривых рис. 2, *ж...и* при его отсутствии позволяет оценить характер влияния пояска на значения σ_z, t и Za. Калибрующий поясок вызвал увеличение напряжения σ_z и прироста температуры t и уменьшение запаса прочности Za.

Зависимости, приведенные на рис. 3, построены при $f = 0{,}05$ (рис. 3, *а...в*) и 0,10 (рис. 3, *г...е*) и $\mu = 1{,}35$, отсутствии противонатяжения (кривые *1...5*) и напряжении противонатяжения 250 МПа (кривые *6...9*). Исходный предел текучести $\sigma_{т0} = 1000$ МПа. Длина $L_п$ и радиус r_k калибрующего пояска равны 1 мм.

Разное расположение соответствующих сплошных и штриховых кривых на графиках рис. 3 обусловлено отсутствием и наличием противо-

up_318.indd 101 28.02.2018 15:05:28

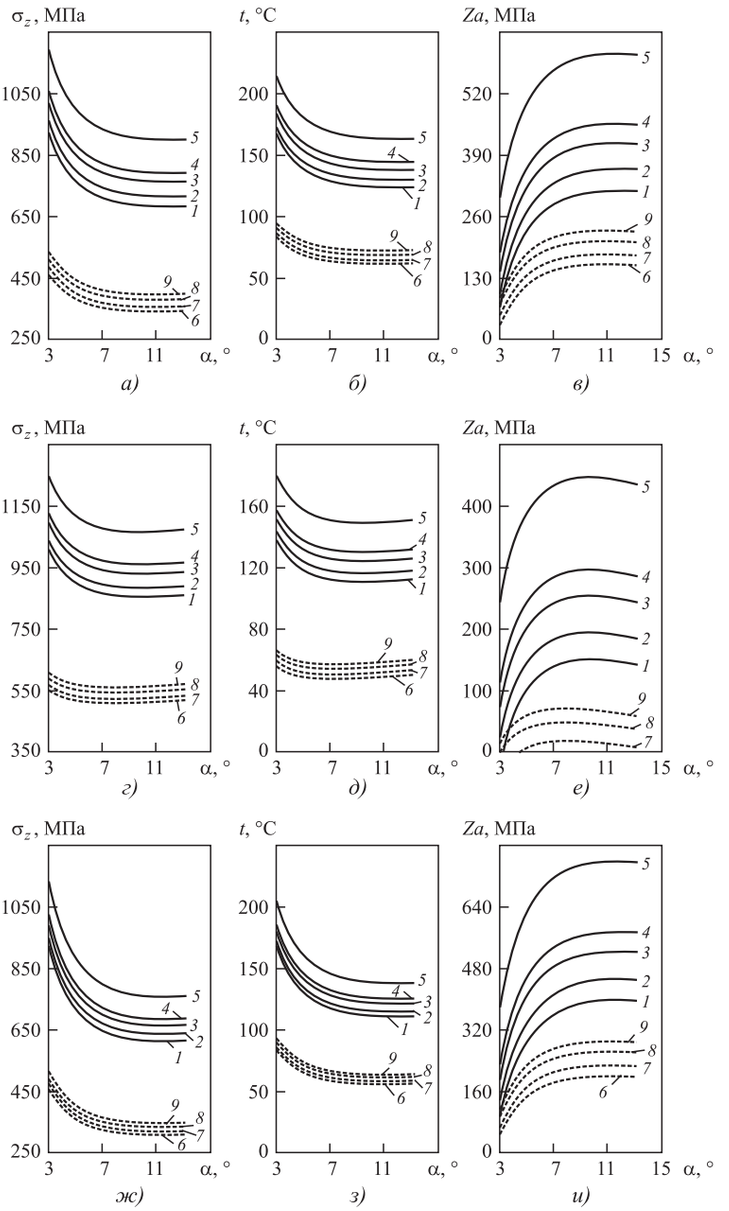


Рис. 2. Осевое напряжение (*а*, *г*, *ж*), прирост температуры (*б*, *д*, *з*) и запас прочности (*в*, *е*, *и*) в зависимости от угла α при μ = 1,35 и *f* = 0,10:
а...в, *ж...и* — σ_q = 0; *г...е* — σ_q = 250 МПа; *а...е* — $L_п = r_k$ = 1 мм; *ж...и* — $L_п$ = 0; *1*, *6* — *k* = 0; *2*, *7* — *k* = 0,25; *3*, *8* — *k* = 0,55; *4*, *9* — *k* = 0,75; *5* — *k* = 1,37; —— модели при $\sigma_{т0}$ = 1000 МПа; ---- модели при $\sigma_{т0}$ = 500 МПа

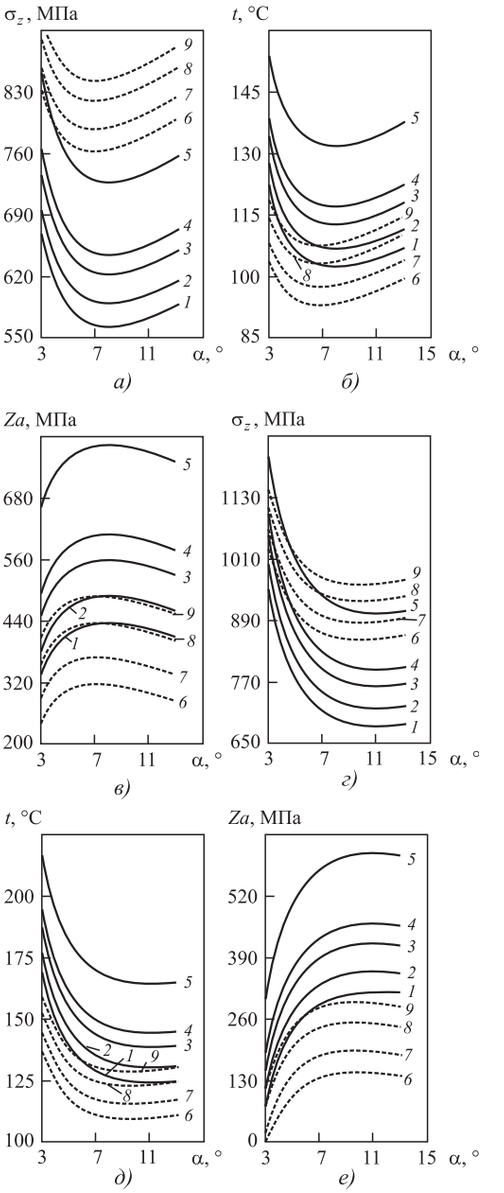


Рис. 3. Осевое напряжение (*а*, *г*), прирост температуры (*б*, *д*) и запас прочности (*в*, *е*) в зависимости от угла α при μ = 1,35 и исходном пределе текучести $\sigma_{т0}$ = 1000 МПа:
а...в — *f* = 0,05; *г...е* — *f* = 0,10; *1*, *6* — *k* = 0; *2*, *7* — *k* = 0,25; *3*, *8* — *k* = 0,55; *4*, *9* — *k* = 0,75; *5* — *k* = 1,37; *1...5* — σ_q = 0; *6...9* — σ_q = 250 МПа

натяжения. Экстремальные значения штриховых кривых (σ_q = 250 МПа) лежат левее, при меньших значениях угла α, чем аналогичные значения сплошных кривых (σ_q = 0).

Увеличение коэффициента трения с 0,05 до 0,10 привело к существенному увеличению осевого напряжения и прироста средней температуры в очаге деформации и снижению запаса прочности, что следует из сравнения расположения соответствующих кривых рис. 3, *а...в* и рис. 3, *г...е*. Минимум кривых для осевого напряжения и прироста температуры и максимум кривых для запаса прочности при *f* = 0,10 находятся правее (рис. 3, *г...е*), при более высоких значениях угла

up_318.indd 102 28.02.2018 15:05:28

α, чем при f = 0,05 (рис. 3, *а...в*). Линии *6...9* (при действии противонатяжения) лежат выше кривых *1...5* (при отсутствии противонатяжения) на графиках для осевого напряжения (рис. 3, *а*, *г*), а на графиках для прироста температуры (рис. 3, *б*, *д*) и запаса прочности (рис. 3, *в*, *е*) линии *6...9* ниже соответствующих (*1...5*). Кривая *5* при отсутствии противонатяжения и μ = 1,37, как и на рис. 2, заметно выше кривых *1...4* для рассматриваемых показателей σ_z, t и Za.

На рис. 4 приведены зависимости от угла α осевого напряжения (рис. 4, *а*, *г*, *ж*, *к*), прироста температуры (рис. 4, *б*, *д*, *з*, *л*) и запаса прочности (рис. 4, *в*, *е*, *и*, *м*) при μ = 1,35. Коэффициент трения равен 0,075 (рис. 4, *а...е*) и 0,15 (рис. 4, *ж...м*) для линий *6...9* и f = 0 для линий *1...5*. Противонатяжение отсутствует для зависимостей, приведенных на рис. 4, *а...в*, *ж...и*, и напряжение противонатяжения составляет 250 МПа для зависимостей, приведенных на рис. 4, *г...е*, *к...м*.

Для σ_z, t и Za при отсутствии трения линии *1...5* прямолинейные, кривые *6...9* при наличии трения имеют экстремальные значения. Расстояние между линиями *1...5* и штриховыми линиями *6...9* при f = 0,15 (рис. 4, *ж...м*) заметно больше расстояния между соответствующими линиями при f = 0,075 (рис. 4, *а...е*). В результате действия противонатяжения уменьшилось расстояние между линиями *1...5* и *6...9* при обоих значениях коэффициента трения (рис. 4, *г...е*, *к...м*). Это объясняется более высоким приростом осевого напряжения от действия противонатяжения при отсутствии контактного трения (линии *1...5*).

Для запаса прочности линии *1...5* при отсутствии трения непрерывно снижаются с увеличением угла α. Причем расстояние между линиями *1...5* для запа-

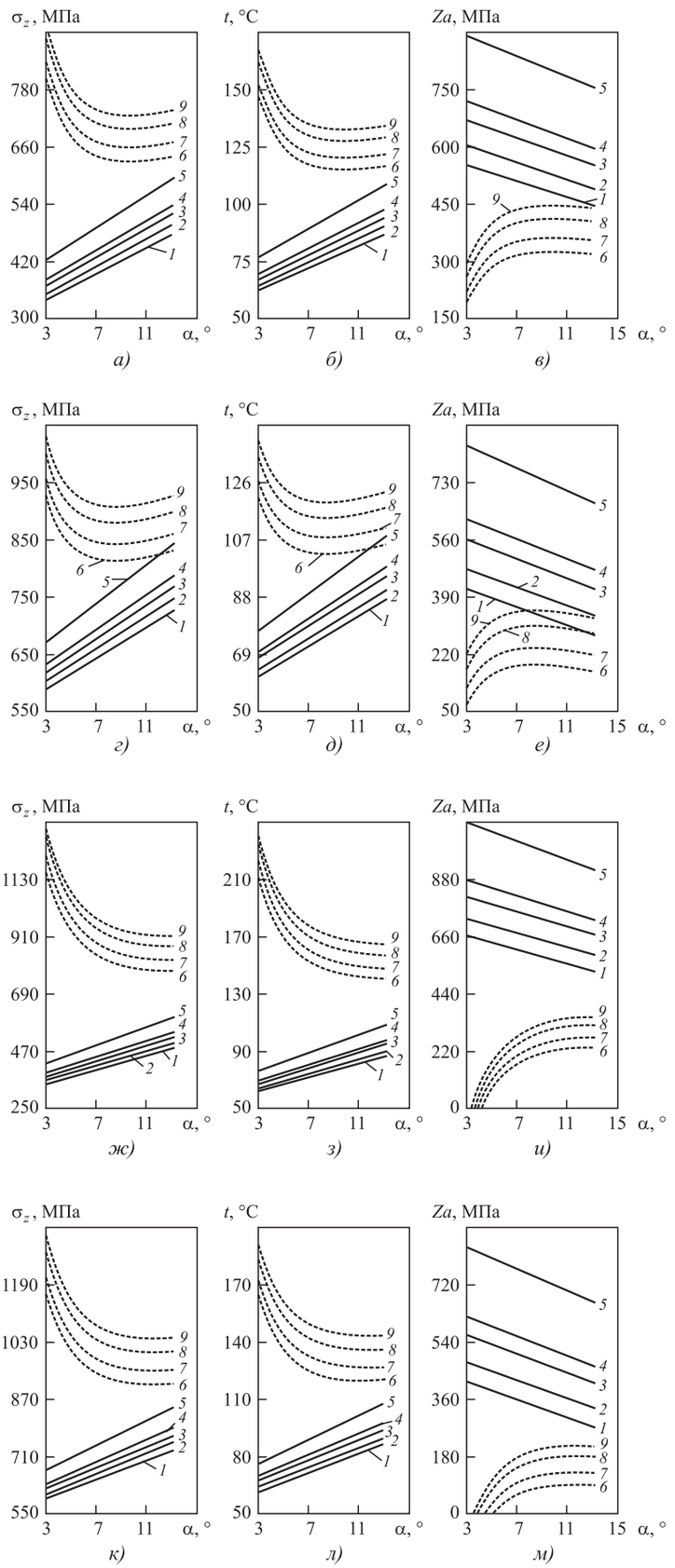


Рис. 4. Осевое напряжение (*а*, *г*, *ж*, *к*), прирост температуры (*б*, *д*, *з*, *л*) и запас прочности (*в*, *е*, *и*, *м*) в зависимости от угла α при μ = 1,35 и $\sigma_{т0}$ = 1000 МПа:
а...е — f = 0,075 для кривых *6...9*; *ж...м* — f = = 0,15 для кривых *6...9*; f = 0 — для линий *1...5*; *а...в*, *ж...и* — σ_q = 0; *г...е*, *к...м* — σ_q = 250 МПа; *1*, *6* — k = 0; *2*, *7* — k = 0,25; *3*, *8* — k = 0,55; *4*, *9* — k = 0,75; *5* — k = 1,37

up_318.indd 103 28.02.2018 15:05:28

са прочности больше расстояния между этими линиями для осевого напряжения независимо от значений коэффициента трения и напряжения противонатяжения. При f = 0,075 кривые *6...9* для запаса прочности не пересекают ось абсцисс (рис. 4, *в*, *е*). Кривые *6...9* при f = 0,15 пересекают абсциссу при малых значениях угла α (рис. 4, *и*, *м*). В результате действия противонатяжения повысилось напряжение волочения и снизились прирост температуры и запас прочности. При f = 0,15 экстремальные значения исследуемых показателей наблюдаются при $\alpha > 11°$ (рис. 4, *ж...м*).

Оценка степени изменения напряжения волочения и прироста средней температуры от деформационного упрочнения материала проволоки

Приняли коэффициент вытяжки 1,35 и 1,50, коэффициент трения 0,05 и 0,10, коэффициент упрочнения 0,25, 0,55, 0,75 и 1,37. Исходный предел текучести $\sigma_{т0}$ 500 и 1000 МПа, напряжение противонатяжения 0 и 250 МПа. Длина и радиус калибрующего пояска равны 1,0 мм. Расчеты выполнили также при отсутствии пояска. Абсолютное и относительное увеличение напряжения волочения и средней температуры от деформационного упрочнения вычислили по формулам

$$\Delta\sigma_z = \sigma_z - \sigma_z(k=0);$$
$$\Delta t = t - t(k=0);$$
$$\delta\sigma = \frac{100(\sigma_z - \sigma_z(k=0))}{\sigma_z(k=0)};$$
$$\delta t = \frac{100(t - t(k=0))}{t(k=0)},$$

где σ_z, t, σ_z (k = 0), t (k = 0) — напряжения волочения и приросты средней температуры при наличии и отсутствии деформационного упрочнения соответственно.

Результаты расчетов $\Delta\sigma_z$, Δt, $\delta\sigma$ и δt в зависимости от угла волочения α представлены на рис. 5. При f = 0,10 и наличии пояска вычислили абсолютное $\Delta\sigma_z$, Δt и относительное $\delta\sigma$, δt увеличение напряжения волочения и прироста средней температуры от деформационного упрочнения (рис. 5, *а...з*). Для зависимостей, приведенных на рис. 5, *а...г*, противонатяжение отсутствует, а для зависимостей, приведенных на рис. 5, *д...з*, напряжение противонатяжения равно 250 МПа. Линии для абсолютного увеличения $\Delta\sigma_z$ и Δt снижаются (рис. 5, *а*, *в*, *д*, *ж*), а линии для относительного увеличения $\delta\sigma$ и δt повышаются при увеличении угла α (рис. 5, *б*, *г*, *е*, *з*). При отсутствии противонатяжения линии для зависимостей $\delta\sigma$ (рис. 5, *б*) и δt (рис. 5, *г*) при исходном пределе текучести $\sigma_{т0}$ = 500 и 1000 МПа совпали при каждом коэффициенте упрочнения, так как существует прямая связь между σ_z и t при σ_q = 0. При действии противонатяжения связь между σ_z и t более сложная. Поэтому наблюдается разное расположение кривых для $\delta\sigma$ (рис. 5, *е*) и δt (рис. 5, *з*).

При действии противонатяжения значения $\Delta\sigma_z$, Δt и $\delta\sigma$, δt меньше (рис. 5, *д...з*), чем при отсутствии противонатяжения (рис. 5, *а...г*). То есть противонатяжение стабилизирует напряжение волочения и прирост температуры при изменении интенсивности упрочнения материала проволоки. С увеличением коэффициента упрочнения наблюдается абсолютный $\Delta\sigma_z$ и Δt и относительный $\delta\sigma$ и δt прирост исследуемых показателей при отсутствии и наличии противонатяжения (порядковый номер линий увеличивается в положительном направлении оси ординат).

На рис. 5, *и*, *к* приведены зависимости Δt и δt от α при f = 0,10 и отсутствии калибрующего пояска и противонатяжения. При отсутствии пояска показатели Δt и δt меньше, что следует из сравнения расположения соответствующих линий на рис. 5, *в*, *г* ($L_п = r_k$ = 1 мм, f = 0,10, σ_q = 0) и рис. 5, *и*, *к*. На рис. 5, *л*, *м* приведены зависимости для Δt и δt при f = 0,05, наличии пояска и отсутствии противонатяжения. Значения этих показателей меньше аналогичных значений при f = 0,10 (рис. 5, *в*, *г*).

Зависимости, приведенные на рис. 5, *н*, *о*, построены при отсутствии противонатяжения, при f = 0,05 и μ = 1,50. Из сравнения данных рис. 5, *л*, *м* при μ = 1,35 и f = 0,05 и рис. 5, *н*, *о* следует увеличение Δt и δt при росте коэффициента вытяжки с 1,35 до 1,50 и постоянных значениях других параметров деформации.

Выводы

Зависимости осевого напряжения, запаса прочности и прироста средней температуры в проходе волочения от угла α имеют экстремальные значения при одном значении угла α. При отсутствии контактного трения напряжение волочения и прирост температуры непрерывно повышаются, а абсолютный запас прочности снижается при увеличении угла α. Повышение интенсивности деформационного упрочнения (коэффициента k) вызывает рост напряжения волочения и средней температуры в проходе деформирования. Этот

up_318.indd 104 28.02.2018 15:05:28

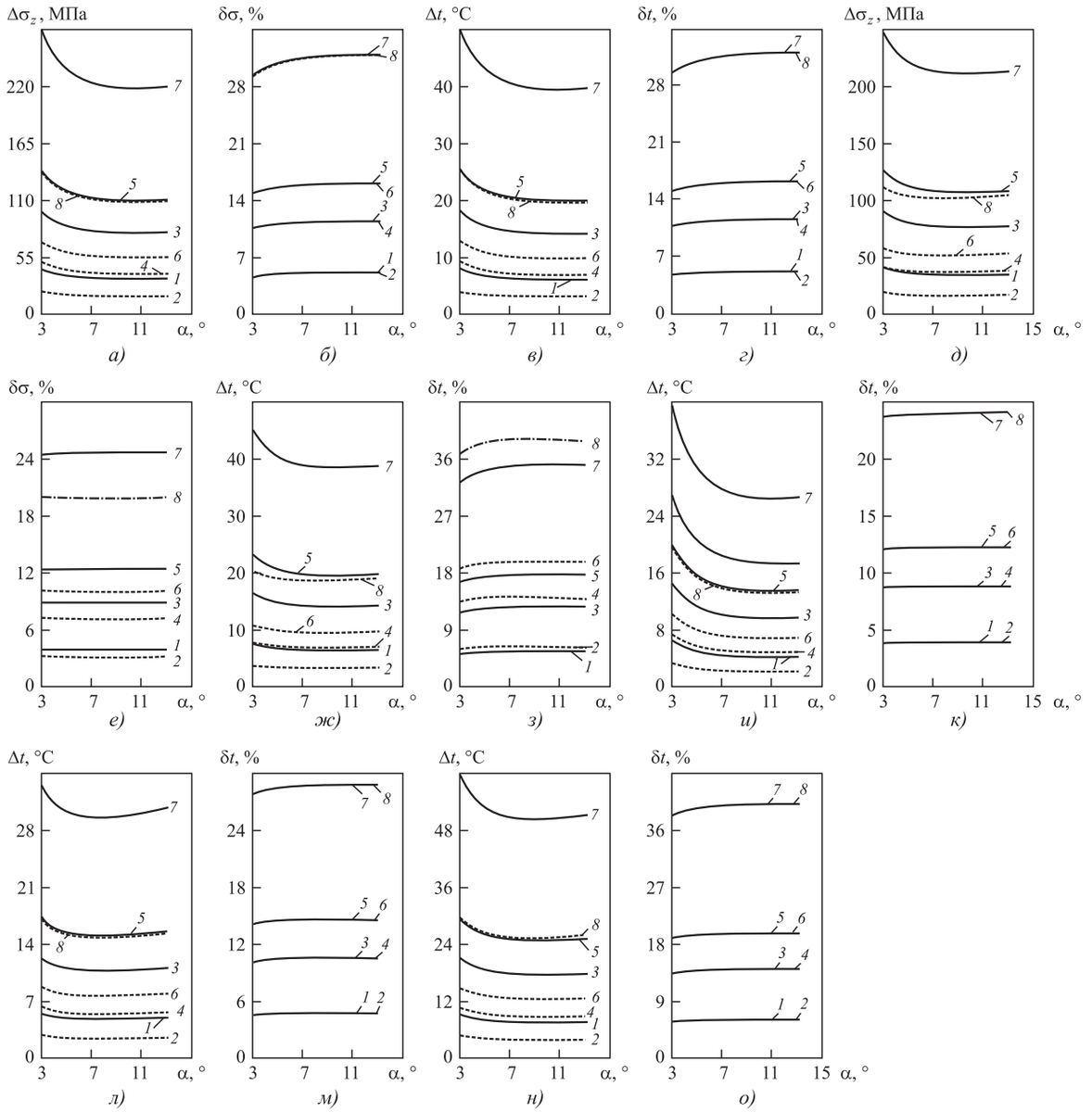


Рис. 5. Абсолютный и относительный приросты напряжения волочения и средней температуры в зависимости от угла α: *а...к* — f = 0,10; *л...о* — f = 0,05; *а...г*, *и...о* — σ_q = 0; *д...з* — σ_q = 250 МПа; нечетные линии — $\sigma_{т0}$ = 1000 МПа (сплошные линии); четные линии — $\sigma_{т0}$ = 500 МПа (штриховые линии); *1*, *2* — k = 0,25; *3*, *4* — k = 0,55; *5*, *6* — k = 0,75; *7*, *8* — k = 1,37; μ = 1,35, кроме *н*, *о* при μ = 1,50; длина и радиус калибрующего пояска 1 мм, кроме *и*, *к* (поясок отсутствует)

рост усиливает увеличение коэффициентов вытяжки и трения, длины калибрующего пояска. Результаты расчетов подтвердили известные факты: с увеличением коэффициентов вытяжки и трения, уменьшением напряжения противонатяжения увеличивается значение оптимального угла $\alpha_{опт}$ волочения. Данные рис. 2...4 не позволяют оценить влияние коэффициента упрочнения k на значения угла $\alpha_{опт}$, так как зависимость угла $\alpha_{опт}$ от коэффициента упрочнения k незначительна [17].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Тарнавский А.Л.** Эффективность волочения с противонатяжением. М.: Металлургиздат, 1959. 152 с.

2. **Гурьянова М.К.** Виды износа и стойкость волок // Труды конференции по метизному производству. Челябинск, изд-е ЦБТИ Челябинского совнархоза, 1961. С. 158—166.

3. **Красильщиков Р.Б.** Деформационный нагрев и производительность волочильного оборудования. М.: Металлургия, 1970. 168 с.

up_318.indd 105 28.02.2018 15:05:28

4. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.

5. **Бабич В.К., Пирогов В.А., Фетисов В.П.** Деформационное старение холоднодеформированной стальной проволоки // Метизное производство. М., Ин-т "Черметинформация", 1976. Вып. 4. 21 с.

6. **Повышение** стойкости волочильного инструмента / В.П. Фетисов, В.С. Старченко, Н.П. Черненко, А.А. Богачёв // Метизное производство. М., Ин-т "Черметинформация", 1976. Вып. 3. 19 с.

7. **Гурьянов Г.Н.** Температура волочения как определяющий фактор управления качеством проволоки ответственного назначения // Обработка сплошных и слоистых материалов: межвуз. сб. науч. тр. / под ред. М.В. Чукина. Магнитогорский гос. техн. ун-т им. Г.И. Носова, 2012. Вып. 38. С. 89—102.

8. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Качество и технологичность волочения проволоки специального назначения // Сталь. 2013. № 3. С. 78—80.

9. **Гурьянов Г.Н., Платов С.И.** Осевое напряжение и прирост средней температуры в проходе волочения с противонатяжением при разных моделях упрочнения материала проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2014. № 9. С. 31—39.

10. **Гурьянов Г.Н., Платов С.И., Терентьев Д.А.** Прирост средней температуры в проходе волочения с противонатяжением при разных моделях упрочнения материала проволоки // Производство проката. 2015. № 9. С. 14—22.

11. **Изготовление** высококачественных метизов (научный и практический опыт Белорецкого металлургического комбината) / В.А. Кулеша, Н.А. Клековкина, Х.Н. Белалов и др. Магнитогорск: Магнитогорский дом печати, 1999. 327 с.

12. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск, ГОУ ВПО "МГТУ", 2008. 358 с.

13. **Справочник** по машиностроительным материалам. В 4 т. Т. 1. Сталь / под ред. Ю.А. Геллера. М.: Машгиз, 1959. 907 с.

14. **Гурьянов Г.Н.** Оценка параметров волочения при разных моделях упрочнения проволочной заготовки // Сталь. 2014. № 7. С. 71—77.

15. **Гурьянов Г.Н.** Оценка осевого напряжения при разных моделях упрочнения материала проволоки по формулам, включающим действительный угол волочения и приведенный угол И.Л. Перлина // Упрочняющие технологии и покрытия. 2017. Т. 13. № 2. С. 54—66.

16. **Гурьянов Г.Н.** Расчет прироста осевого напряжения в калибрующем пояске с учетом напряженного состояния круглой заготовки на выходе рабочего конуса волоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 6. С. 34—36.

17. **Гурьянов Г.Н.** Оптимальные углы рабочего конуса волоки в зависимости от основных параметров деформации проволоки // Изв. вузов. Черная металлургия. 2009. № 9. С. 42—45.

УДК 621.78

[1]Л.В. Федорова, [1]С.К. Федоров, [2]А.Г. Гамидов, [1]И.М. Гребенюк, [1]Л.В. Савельева

([1]Московский государственный технический университет им. Н.Э. Баумана,
[2] Российский государственный аграрный университет — МСХА им. К.А. Тимирязева, г. Москва)
E-mail: fedorova.lv@bmstu.ru

Влияние электромеханической поверхностной закалки на изменение структуры и микротвердости сплава нирезист

Приведены результаты металлографических исследований и износных испытаний образцов из сплава нирезист в исходном состоянии и после электромеханической поверхностной закалки.

Ключевые слова: *нирезист, электромеханическая поверхностная закалка, электромеханическая обработка, микротвердость, структура, износостойкость.*

Results of metallographic researches and wear tests of samples from Ni-resist alloy in an initial state and after electromechanical surface hardening are given.

Keywords: *Ni-resist, electromechanical surface hardening, mechanical treatment, microhardness, structure, wear resistance.*

Развитие нефтяной промышленности невозможно без постоянного повышения качества уже существующих и создания новых изделий. К изделиям, работающим в непосредственном контакте с нефтью и нефтепродуктами, предъявляются требования высокой коррозионной стойкости, износостойкости, прочности при сравнительно невысокой себестоимости их изготовления. Повышение износостойкости чугунов, применяемых в нефтяной промышленности [1, 2], обеспечивается за счет использования легирующих элементов и увеличения микротвердости поверхностного слоя с помощью химико-термической обработки. Однако данные методы не обеспечивают высокую

up_318.indd 106 28.02.2018 15:05:28

твердость поверхностного слоя, часто не отвечают требованиям экологической безопасности, являются трудоемкими, а применение обычных серых чугунов не обеспечивает необходимую долговечность ввиду недостаточной коррозионной стойкости. Эффективным направлением повышения износостойкости чугунов являются технологии, основанные на использовании концентрированных потоков энергии [3, 4].

Электромеханическая поверхностная закалка (ЭМПЗ) основана не только на использовании концентрированных потоков электрической энергии, но и на одновременном термическом и механическом воздействии инструмента на поверхностный слой детали. В результате поверхность детали приобретает новые, улучшенные физико-механические свойства [5—7].

Применение высоколегированного чугуна нирезист вместо обычного серого чугуна позволяет значительно повысить долговечность деталей, работающих с загрязненными и отработанными жидкостями, а также морской и речной водой, содержащей песок во взвешенном состоянии, за счет поверхностного твердения аустенита при воздействии твердых частиц (образование наклепа). Это свойство позволяет применять нирезист для изготовления деталей насосов, фильтров и других деталей, используемых в нефтяной промышленности.

Исследование эффективности процесса ЭМПЗ провели на ступени нефтяного насоса, выполненной из сплава нирезит (рис. 1). Результаты спектрального анализа данного сплава приведены ниже.

Химический элемент	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Cu	P	S
Содержание, %	2,72	2,08	0,921	1,82	13,58	0,028	6,616	0,0235	0,0682

ЭМПЗ выполняли на наружной поверхности заготовки ступени нефтяного насоса следующим образом (рис. 2). Заготовку *2* закрепляли в патроне токарного станка *1* и выполняли поджатие инструментов к обрабатываемой поверхности с усилием 300...500 Н. От установки электромеханической обработки (УЭМО) один конец вторичной обмотки силового трансформатора через силовые токоподводящие шины *6* подводили к токоподводящему ролику *3*, а второй — к инструментальному ролику *8*. На станке настраивали подачу инструмента s = 2 мм/об и частоту вращения заготовки 10 мин$^{-1}$ при силе электрического тока во вторичной цепи 1800 А, напряжении во вторичной цепи 3 В. Источник электрического тока УЭМО и вращение шпинделя включали последовательно. Происходил мгновенный нагрев зоны контакта инструмента с обрабатываемой поверхностью заготовки вследствие воздействия большой силы тока. Нагрев осуществлялся до температур 1000...1100 °С, т. е. выше линии фазовых превращений. Следом за нагревом происходило мгновенное охлаждение с отводом тепла в глубь детали. Для охлаждения токоподводящей оснастки и инструмента в зону обработки подавали специальную эмульсию. Поверхностную закалку проводили на глубину, большую, чем припуск, который будет удален при финишной обработке.

Измерение микротвердости и изучение структуры проводили на поперечных шлифах, подготовленных по традиционной методике с использованием травителя Оберхгофера. Микротвердость поверхности измеряли на шлифах микротвердомером EMCOTEST DuraScan и твердомером МЕТ У1 непосредственно на образцах. Микроструктуру исследовали на металлографическом микроскопе Olympus GX51.

Рис. 1. Исследуемая заготовка после ЭМПЗ

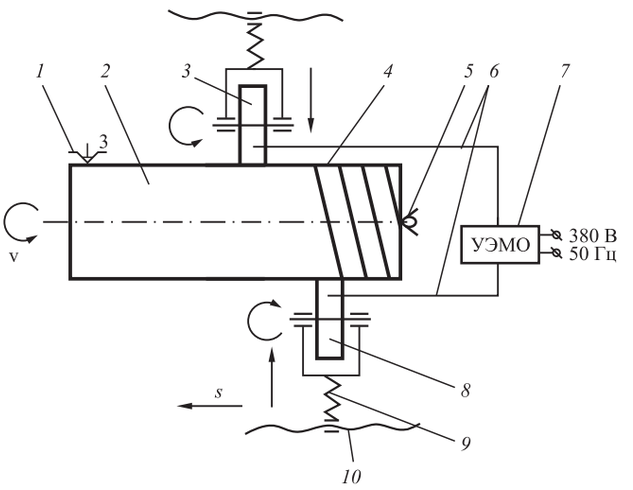


Рис. 2. Принципиальная схема процесса ЭМПЗ:
1 — трехкулачковый самоцентрирующий патрон; *2* — заготовка (неупрочненная поверхность); *3* — токоподводящий ролик; *4* — закаленный участок заготовки; *5* — вращающийся центр; *6* — силовые токоподводящие шины; *7* — установка электромеханической обработки; *8* — инструментальный ролик; *9* — телескопическая державка

up_318.indd 107 28.02.2018 15:05:28

При ЭМПЗ происходят одновременные силовое и температурное воздействия на обрабатываемую поверхность, после которых наблюдаются характерное увеличение плотности дислокаций и их более равномерное распределение по объему материала, создание дислокационных барьеров в виде границ зерен, дисперсных вторичных фаз, измельчение размера и изменение формы исходных зерен.

Микроструктура сплава нирезист после ЭМПЗ представлена на рис. 3. Наблюдается большая пористость металла, графит пластинчатый с включениями вермикулярного. Дендриты, наблюдаемые на заготовках, полученных литьем в кокиль, у поверхности имеют мелкодисперсную структуру, и зерна вытянуты от поверхности вглубь. Наблюдаются явно выраженные упрочненные зоны (белый слой), которые являются мелкодисперсным мартенситом высокой твердости. Глубина упрочненного слоя составляет 50...120 мкм. Матрицей является легированный феррит, наблюдаются ледебуритные эвтектики, сформировавшиеся между первично закристаллизованными областями, а также серые включения, которые являются сульфидами марганца. Под упрочненной зоной наблюдается графит в цементитной сетке.

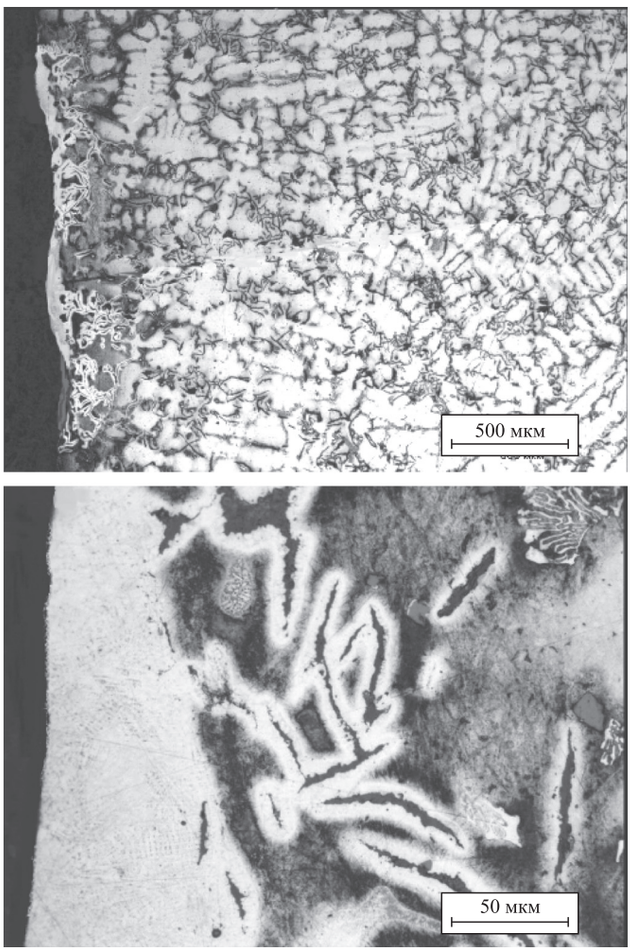


Рис. 3. Структура поверхностного слоя после ЭМПЗ с разными увеличениями

Измерение твердости от поверхности вглубь к сердцевине (рис. 4) свидетельствует, что после ЭМПЗ ее значение увеличивается в 2,3...3 раза. В середине закаленного слоя сплава нирезист твердость увеличивается до 450 HV при исходной твердости материала 150...210 HV. Причем твердость на поверхности составляет 434 HV (рис. 5) и на глубине, в области, прилегающей к основному материалу, — 435 HV (рис. 6, *б*). В первом случае это связано с недостаточной скоростью отвода тепла от поверхности, так как лежащие ниже слои оказываются нагретыми. Во втором — с недостаточным распространением зоны высокотемпературного нагрева при ЭМПЗ. На границе раздела закаленной зоны и основного материала отмечен переходный участок с твердостью 269 HV (рис. 6, *а*).

Полученные высокие значения твердости в поверхностном слое образца по сравнению с его сердцевиной связаны с тем, что при электромеха-

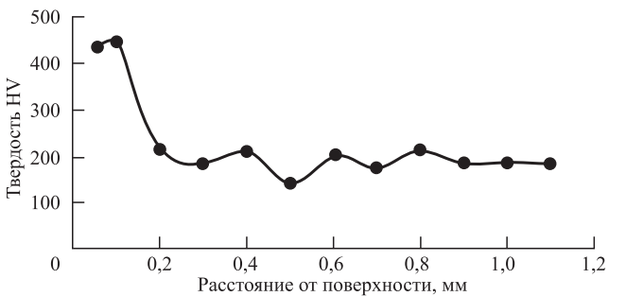


Рис. 4. Зависимость микротвердости от глубины закалки сплава нирезист после ЭМПЗ

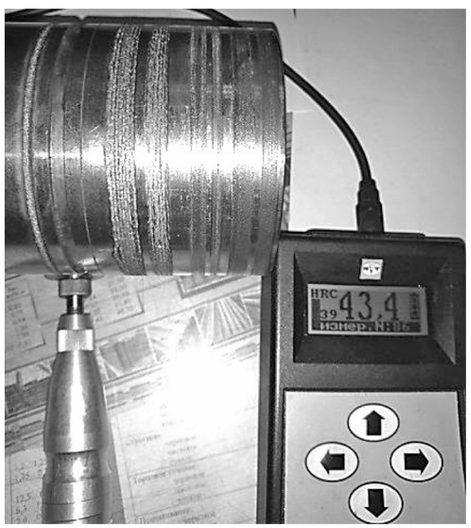
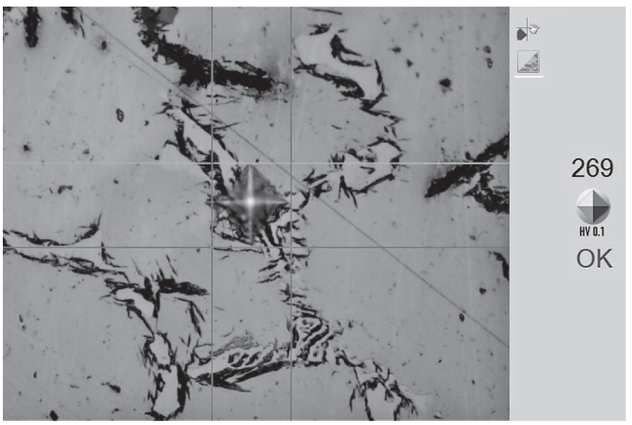
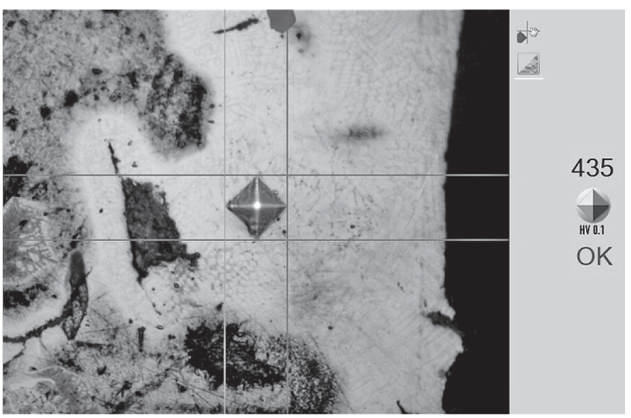


Рис. 5. Измерение твердости (43,4 HRC) поверхностного слоя сплава нирезист после ЭМПЗ твердомером МЕТ У1

up_318.indd 108 28.02.2018 15:05:28



а)



б)

Рис. 6. Результаты измерения микротвердости поверхностного слоя сплава нирезист после ЭМПЗ:
а — в переходной зоне; *б* — в зоне закалки

нической обработке с наложением проходов ролика напряжения деформации накапливаются и структура измельчается.

Исследования на износостойкость проводили на машине трения ИИ-5018 по схеме контакта "ролик—колодка" под нагрузкой 500 Н в среде минерального масла М-8-$В_2$ с добавлением в качестве абразива кварцевого песка в количестве 10 % от массы испытуемого образца. В ходе испытаний контролировали изменение температуры смазочной среды t, °С, ртутным термометром; момента трения $M_т$, Нм, износа образцов (И, г) с помощью лабораторных аналитических весов ВЛЭ 134. Длительность испытаний — 120 мин.

В качестве образцов использовали ролики (рис. 7) из сплава нирезист. Исходные образцы — без обработки, экспериментальные образцы — после ЭМПЗ. Контробразцами были колодки из стали 40 без термической обработки твердостью 16...18 HRC.

Перед испытаниями проводили притирание образцов в паре с колодками до получения полной площади контакта по контактируемым поверхностям. Причем для пары ролик—колодка в исходном состоянии притирание проводили при чистой смазке минеральным маслом М-8-$В_2$ в течение 30 мин. Для пары колодка с роликом после ЭМПЗ по наружному диаметру в течение 6 ч не удалось обеспечить приработку при чистой смазке. Для приработки экспериментальной пары в минеральное масло М-8-$В_2$ добавили кварцевый песок зернистостью 16 мкм.

Были получены следующие результаты испытаний. За время испытаний максимальная температура минерального масла М-8-$В_2$ экспериментальной пары с роликом после ЭМПЗ составила 58 °С, тогда как исходной пары — 44 °С (рис. 8).

При испытаниях наблюдались различные значения момента трения у образцов без обработки и с ЭМПЗ в начальный момент времени, а также его уменьшение с течением времени для обоих вариантов (рис. 9). В начальный период испытаний момент трения роликов после ЭПМЗ составил 2,17...2,1 Н·м, тогда как у серийных роликов — 1,83...1,75 Н·м.

Результаты измерения температуры и момента трения для исследуемых образцов свидетельст-

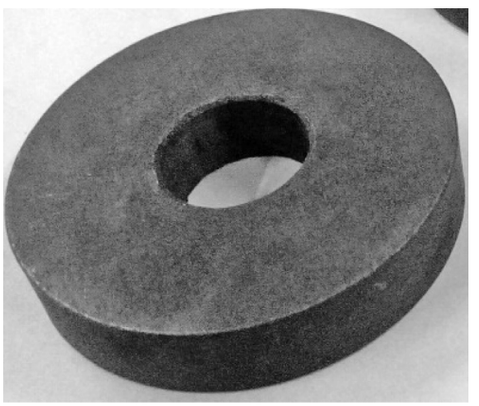


Рис. 7. Фрагмент ролика для износных испытаний

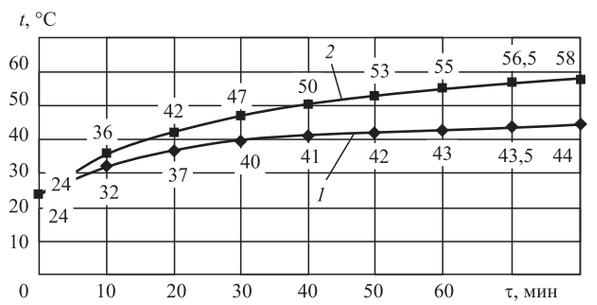


Рис. 8. Изменение температуры *t* смазочной среды при испытании:
1 — образец без обработки; *2* — образец после ЭМПЗ; τ — время

up_318.indd 109 28.02.2018 15:05:28

вуют о различной картине контактного взаимодействия колодок из стали 40 твердостью 16...18 HRC с закаленными и исходными роликами из сплава нирезист. В исходном материале графит расположен на поверхности, а в поверхностном слое нирезиста после ЭМПЗ графита не наблюдается (см. рис. 6, *б*). Кроме того, более низкие, чем у образцов после ЭПМЗ, температура и момент трения у исходных образцов связаны с наличием в структуре сплава нирезист до 6,616 % меди.

Результаты весового контроля состояния деталей после 120 мин испытаний приведены на рис. 10. Суммарный износ роликов после ЭМПЗ составил 0,001 г, тогда как исходных роликов, без закалки, — 0,002 г, т. е. износостойкость закаленных электромеханической обработкой роликов в два раза выше. Вместе с тем износ колодок в паре с закаленным роликом составил 0,006 г, тогда как колодки с незакаленным роликом имели износ 0,004 г.

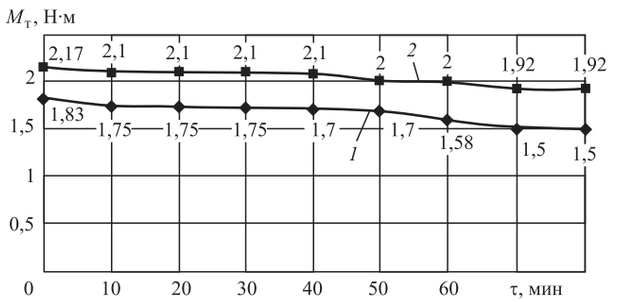


Рис. 9. Изменение момента трения при испытании:
1 — образец без обработки; *2* — образец после ЭМПЗ; τ — время

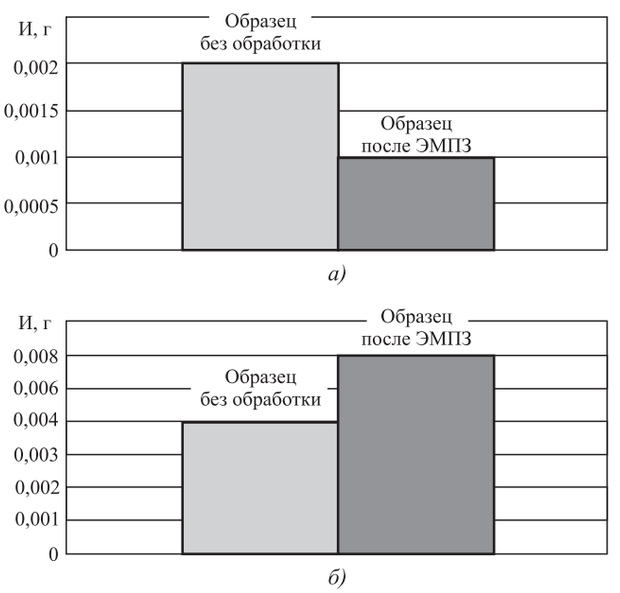


Рис. 10. Суммарный износ И в течение 120 мин испытаний:
а — роликов; *б* — колодок

Выводы

1. Результаты спектрального анализа образца из нирезиста свидетельствуют о легировании сплава никелем (13,58 %), хромом (1,82 %), кремнием (2,08 %), марганцем (0,921 %), медью (6,616 %) при содержании углерода 2,72 %. Именно наличие большого количества углерода в сплаве нирезист указывает на возможность изменения структуры, твердости и износостойкости деталей электромеханической поверхностной закалкой.

2. Выполнены металлографические исследования (см. рис. 3) структуры образцов из сплава нирезист после ЭМПЗ и выявлены треки закаленной зоны с глубиной 50...120 мкм.

3. Проведены замеры твердости (см. рис. 4...6) исходной сердцевины образцов сплава нирезист (150...210 HV) и закаленных электромеханической обработкой участков (435...450 HV).

4. Результаты износных испытаний образцов с колодками из стали 40 твердостью 16...18 HRC свидетельствуют о лучших противоизносных свойствах образцов с ЭМПЗ, но худших их антифрикционных свойствах, на что указывают и более высокий момент трения, и более высокая температура смазочной среды.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Островский В.Г., Пещеренко С.Н., Каплан А.Л.** Методика моделирования гидроабразивного износа ступеней нефтяных насосов // Горное оборудование и электромеханика. 2011. № 12. С. 38—42.

2. **Панов А.Г.** Исследование строения и свойств чугунов типа "Ni-Resist", обладающих повышенной твердостью. Материалы 5-й ММК "Теория и практика технологий производства изделий из композиционных материалов и новых металлических сплавов", М., 2007.

3. **Крапошин В.С., Шалевич К.В., Вязьмина Т.М.** Влияние лазерного нагрева на количество остаточного аустенита в сталях и чугунах // Металловедение и термическая обработка металлов. 1989. № 10. С. 21—29.

4. **Исследование** микроструктуры и микротвердости зон лазерного оплавления чугуна нирезист ЧН16Д7ГХ / В.Г. Гилев, Е.А. Морозов, И.Б. Пуртов, Е.С. Русин // Известия Самарского научного центра РАН. Т. 16. № 6. 2014.

5. **Федоров С.К., Федорова Л.В.** Электромеханическая обработка // РИТМ. 2012. № 2 (70). С. 14—16.

6. **Электромеханическая** поверхностная закалка сталей для насосно-компрессорных труб / Л.В. Федорова, С.К. Федоров, А.А. Сержант и др. // Металловедение и термическая обработка металлов. 2017. № 3. С. 41—43.

7. **Федорова Л.В., Иванова Ю.С., Воронина М.В.** Повышение износостойкости резьбовых соединений бурильных труб электромеханической поверхностной закалкой // Записки Горного института. 2017. Т. 226. С. 456—461.

up_318.indd 110 28.02.2018 15:05:28

УДК 621.9

Б.Я. Мокрицкий
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет),
В.Ю. Верещагин
(Новосибирский государственный педагогический университет)
E-mail: boris@knastu.ru

Компьютерное моделирование процесса механической обработки для оптимизации упрочняющего воздействия на заготовку

Компьютерное моделирование процессов лезвийной обработки машиностроительных изделий позволяет решить многие вопросы, связанные с оптимизацией режима резания, шероховатости обработанной поверхности, производительности обработки и т. д. В статье показана возможность упрочнения материала заготовки во время обработки путем оптимизации величин внутренних напряжений. В основу оптимизации положено моделирование напряжений и деформаций. Достигнут прирост микротвердости.

Ключевые слова: *компьютерное моделирование, процесс механической обработки, упрочнение поверхностных слоев, напряжения сжатия.*

Computer simulation of cutting processing of mechanical parts allows to solve many problems related to the optimization of cutting conditions, surface finish, productivity etc. The possibility of hardening of the workpiece material during processing by optimizing the values of internal stresses is shown in this article. Modeling of stresses and strains is the basis of the expected optimization. An increase of the microhardness is reached.

Keywords: *computer simulation, machining process, hardening of the surface layers, compressive stress.*

Введение

При постановке изделия на производство важно минимизировать затраты средств и времени на отработку режимов и условий механической обработки заготовок. В связи с этим экспериментальные исследования, проводимые на современном металлорежущем оборудовании, имеют экономические ограничения, поскольку стоимость одного станко-часа превышает 50 000 руб. Это обусловливает необходимость компьютерного моделирования процесса обработки для поиска оптимальных решений. Известен ряд программных продуктов, позволяющих решать эту задачу с той или иной степенью допущений и упрощений. Обычно пытаются с помощью таких программных продуктов оптимизировать режим резания для достижения необходимой производительности или точности обработки.

Ниже показаны возможности компьютерного моделирования геометрии (конструкции) детали для обеспечения необходимого упрочнения поверхностных слоев ее материала.

Концепция компьютерного моделирования упрочнения поверхностных слоев материала заготовки

Качественные параметры изделия во многом определяются характером напряженно-деформированного состояния поверхностных слоев материала заготовки, формируемого в процессе механической лезвийной обработки. Для обеспечения

up_318.indd 111 28.02.2018 15:05:28

необходимых значений качественных параметров (шероховатости и др.) обычно стремятся в процессе лезвийной механической обработки оптимизировать режим резания так, чтобы уровень напряжений не превысил предел прочности материала, а деформация поверхностных слоев после обработки имела только упругий характер.

Вместе с тем существуют методы (накатка и др.) пластического деформирования поверхностных слоев заготовки с превышением уровня упругих деформаций. При такой обработке иногда (например, при резьбонарезании) создают условия, когда материал поверхностных слоев получает упрочнение в результате сжимающих напряжений. Такое упрочняющее воздействие благоприятно влияет на эксплуатационные свойства изделий.

Концептуально поставлена задача о реализации процесса упрочнения материала заготовки при лезвийной обработке в целях повышения эксплуатационных свойств изделий. Такая постановка задачи нова. Полагается апробировать концепцию при наименее благоприятных условиях. При этом считают, что при более благоприятных условиях реализация концепции будет еще более вероятной. Предполагается, что наименее благоприятные условия имеют место при реализации процесса строгания, когда нет возможности реализовать существенную скорость деформации слоев материала заготовки из-за ограничений скорости резания.

Пробные эксперименты (применение затупления режущей кромки на токарном либо строгальном резце, заглаживание поверхности заготовки задней поверхностью токарного резца при точении и т. д.) показали возможность решения задачи — возрастали твердость и микротвердость материала в области поверхностных слоев, возрастал уровень остаточных сжимающих напряжений.

На данном этапе решения задачи использован метод компьютерного моделирования процесса механической обработки как инструментарий в поиске направлений решения задачи. Применены те подходы, которые с использованием метода конечных элементов в той или иной мере апробированы Д.В. Криворучко, А.Г. Нарыжным и др. [1—4]. Принятая нами конечно-элементная модель, используемая в программном комплексе ANSYS, представлена на рис. 1.

Приняты следующие граничные условия:

узлам, лежащим на нижней и торцевых поверхностях заготовки, запрещены любые перемещения;

узлам, лежащим на боковых поверхностях заготовки, запрещены перемещения по оси Z глобальной системы координат;

узлам, лежащим на торцевых поверхностях резца, запрещены перемещения.

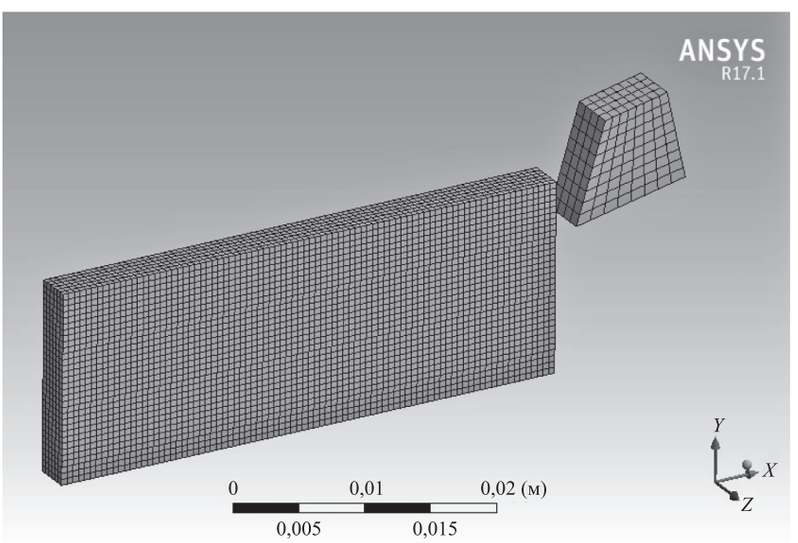


Рис. 1. Конечно-элементная модель заготовки и резца при строгании, используемая в системе ANSYS

Результаты исследования

Численное моделирование процесса резания выполнено:

1) для заготовки:

а) из алюминиевого деформируемого сплава марки АМг6 (принято: предел текучести $190 \cdot 10^6$ Па; плотность 2640 кг/м^3; коэффициент линейного расширения $2{,}4 \cdot 10^{-6}$; модуль Юнга $71 \cdot 10^9$ Па; коэффициент Пуассона 0,32; модуль сдвига $27 \cdot 10^9$ Па);

б) конструкционной стали марки 40Х (принято: предел текучести $2{,}5 \cdot 10^8$ Па; плотность 7820 кг/м^3; коэффициент линейного расширения $11{,}8 \cdot 10^{-6}$; модуль Юнга $2{,}14 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона 0,3; модуль сдвига $85 \cdot 10^9$ Па);

в) титанового сплава марки ВТ6 (принято: предел текучести $2{,}5 \cdot 10^8$ Па; плотность 4505 кг/м^3; коэффициент линейного расширения $8{,}15 \cdot 10^{-6}$; модуль Юнга $11{,}5 \cdot 10^{11}$ Па; коэффициент Пуассона 0,32; модуль сдвига $4{,}1 \cdot 10^{10}$ Па);

2) для инструментального материала марки ВК8 (плотность 14 800 кг/м^3; коэффициент температурного расширения $5{,}0 \cdot 10^{-6}$; исходная температура 22 °С; коэффициент Пуассона 0,2; мо-

up_318.indd 112 28.02.2018 15:05:29

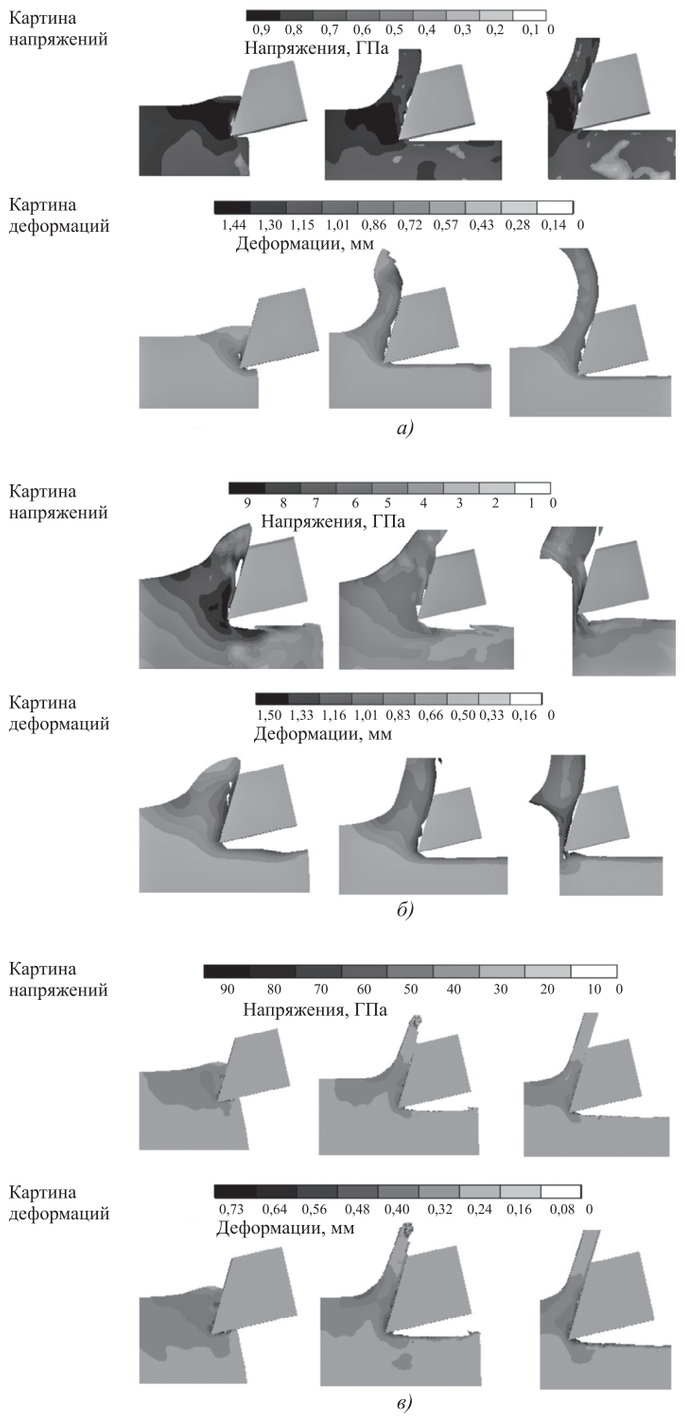


Рис. 2. Иллюстрация (раскадрирование) различий в напряженно-деформированном состоянии заготовки при компьютерном моделировании процесса строгания:
а — материал заготовки — АМг6; *б* — материал заготовки — сталь 40Х; *в* — материал заготовки — ВТ6; кадры слева — момент врезания инструмента; в середине — момент резания на одной трети длины заготовки; справа — момент выхода инструмента из резания

дуль объемной упругости $5{,}2 \cdot 10^{11}$ Па; модуль сдвига $1{,}7 \cdot 10^{11}$ Па; касательный модуль упругости $1 \cdot 10^{9}$ Па; предел текучести, равный пределу прочности, $1{,}5 \cdot 10^{9}$ Па.

Конечно-элементная сетка построена на основе элемента SOLID164, который является стандартным для моделирования трехмерных объектов в среде ANSYS. Элемент SOLID164 представляет собой объемный шестигранник с восемью узлами, расположенными в вершинах.

Результаты исследований показали, что принятые метод и методика исследований позволяют выявить распределение нормальных эквивалентных и касательных напряжений и в материале инструмента, и в материале заготовки. Далее во внимание нами приняты только напряжения в материале заготовки. По известным значениям напряжений представляется возможным определить значения деформаций материала заготовки на протяжении всего процесса резания с необходимой дискретизацией процесса по времени.

Предпринята попытка оценить влияние состояния режущей кромки строгального резца на характер напряженно-деформированного состояния материала заготовки. На рис. 2 показаны картины деформаций материала заготовки для разных его вариантов в условиях типового строгания при общепринятых режимах резания твердосплавным резцом марки ВК8. Их анализ показывает следующее:

1. В зависимости от материала заготовки картины распределения напряжений и деформаций различны. Суммарные величины напряжений в заготовках из АМг6 ($\sigma_{max} = 1{,}1 \cdot 10^{9}$ Па) и ВТ6 ($\sigma_{max} = 9{,}4 \cdot 10^{10}$ Па) существенно различны.

2. Численное моделирование позволяет прогнозировать состояние обработанной поверхности и механизм стружкообразования.

Напряженно-деформированное состояние материала также зависит от температурного режима процесса резания для случая использования обычного твердосплавного инструмента из инструментального сплава марки ВК8 и с покрытиями. На рис. 3 показаны примеры температурограмм (получены при помощи и содействии А.А. Верещаки). Их анализ показывает, что применение метода конечных элементов позволяет эффективно моделировать как напряженно-деформированное состояние режущего инструмента,

up_318.indd 113 28.02.2018 15:05:29

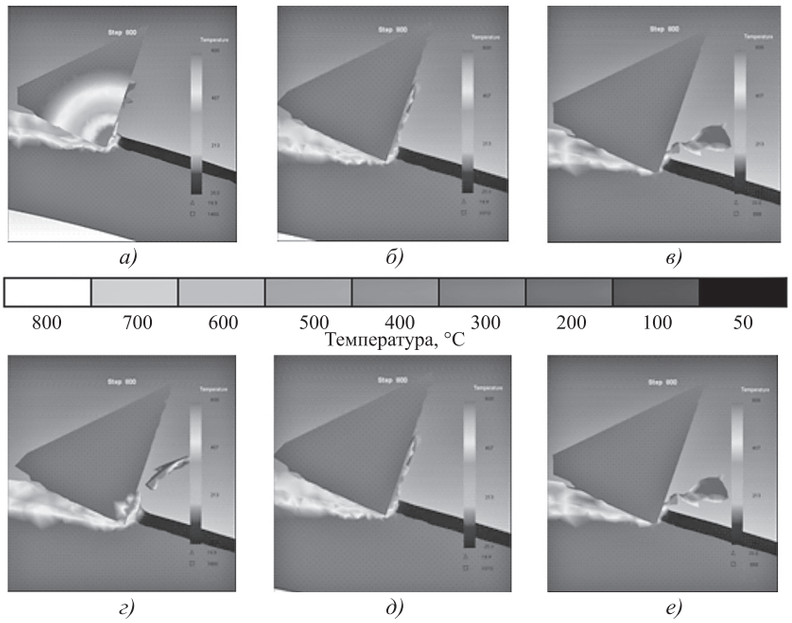


Рис. 3. Иллюстрация результатов (по А.А. Верещаке) расчета температурных полей (температурограмм) в зоне резания, полученных в программной среде Deform 3D при обработке алюминиевого сплава марки АМг6 твердосплавным инструментом из ВК8:
а — инструмент без покрытия; *б* — с покрытием нитридом титана TiN толщиной 5 мкм; *в* — с покрытием (TiAl)N толщиной 5 мкм; *г* — с многослойным покрытием Ti—TiN—(TiAl)N общей толщиной 7 мкм; *д* — с многослойным покрытием Ti—TiN—(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм; *е* — с многослойным покрытием Ti—TiN—(TiAlCr)N с общей толщиной 7 мкм

так и распределение температур в зоне резания. Применение данной методики позволяет существенно повысить эффективность процесса проектирования металлорежущего инструмента с покрытиями нового поколения, снизив при этом его себестоимость. Установлено, что при обработке различных материалов инструментом без покрытия генерируется наибольшая температура. Максимальное снижение интенсивности тепловых потоков в системе инструмент—заготовка обеспечивают покрытия Ti—TiN—(TiAl)N общей толщиной 4 мкм, Ti—TiN—(TiAl)CrN общей толщиной 7 мкм и Ti—TiN—(TiAlCr)N общей толщиной 10 мкм, имеющие многослойно-композиционную архитектуру. Интенсивность тепловых потоков в значительной степени зависит от толщины покрытия. В частности, более благоприятное тепловое состояние режущего клина инструмента обеспечивает покрытие Ti—TiN—(TiAlCr)N толщиной 10 мкм в сравнении с покрытием такого же состава, но с толщиной 7 мкм. Максимальное улучшение теплового состояния режущего клина твердосплавного инструмента обеспечивает трехслойное покрытие Ti—TiN—Ti(AlCr)N, что обусловлено благоприятным сочетание слоев многослойной архитектуры покрытия.

Изложенное выше показывает, что методологическая основа для моделирования процесса резания существует. Нами предпринята попытка выйти за рамки общепринятых задач моделирования и использовать эту методологическую основу для моделирования упрочняющего воздействия металлорежущего инструмента на материал заготовки детали. Под таким воздействием здесь понимается использование металлорежущего инструмента и станочного оборудования не только для того, чтобы осуществить процесс формообразования детали, но и для того, чтобы создать инструментом в поверхностных слоях материала

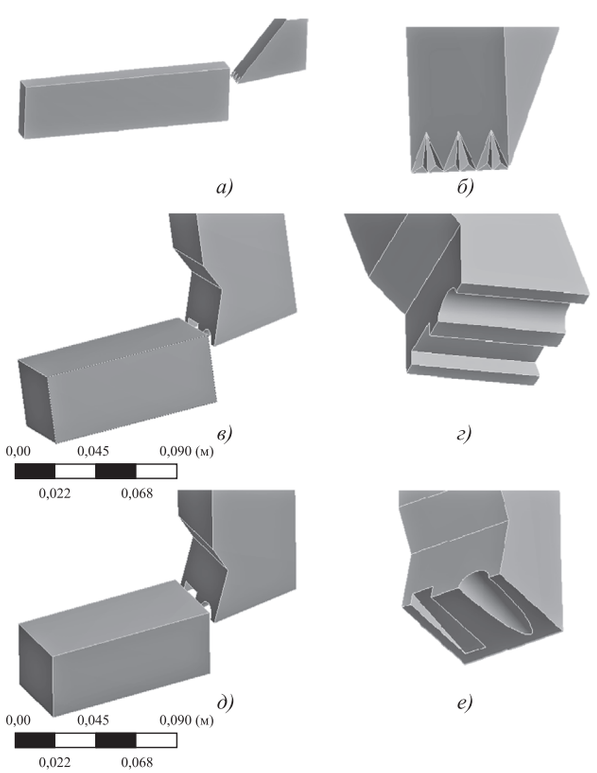


Рис. 4. Модели металлорежущего инструмента для перераспределения напряжений в поверхностных слоях заготовки за счет модернизации передней поверхности (*а*, *б*) инструмента и за счет модернизации его задней поверхности (*в*, *г*, *д*, *е*)

up_318.indd 114 28.02.2018 15:05:29

заготовки такие внутренние напряжения и такого уровня, которые бы повысили физико-механические или/и эксплуатационные характеристики материала детали по аналогии с вибронакаткой шариком цилиндрической поверхности заготовки или с выглаживанием, когда режущий инструмент не только формирует поверхность заготовки, но и попутно придает ей повышенные эксплуатационные свойства.

Для такого моделирования рассмотрен процесс типового строгания с использованием типового строгального резца, резца со специальным профилем передней поверхности в области режущей кромки, резца со специальным профилем задней поверхности в области режущей кромки и такого же резца с переменным профилем по длине задней поверхности. Общее представление о геометрии резцов с такими профилями дает рис. 4.

Результаты моделирования процесса строгания режущими инструментами, модели которых приведены на рис. 4, *а*, *в*, *д*, по величине напряжений в поверхностном слое, деформации материала и температуре в поверхностном слое иллюстрирует рис. 5. Анализ результатов моделирования показывает, что во всех случаях напряженно-деформированное состояние поверхностных слоев материала (АМг6) заготовки разное. Варьируя режим резания, удается существенно изменить степень этого различия. Адекватность такого моделирования подтверждена двумя путями:

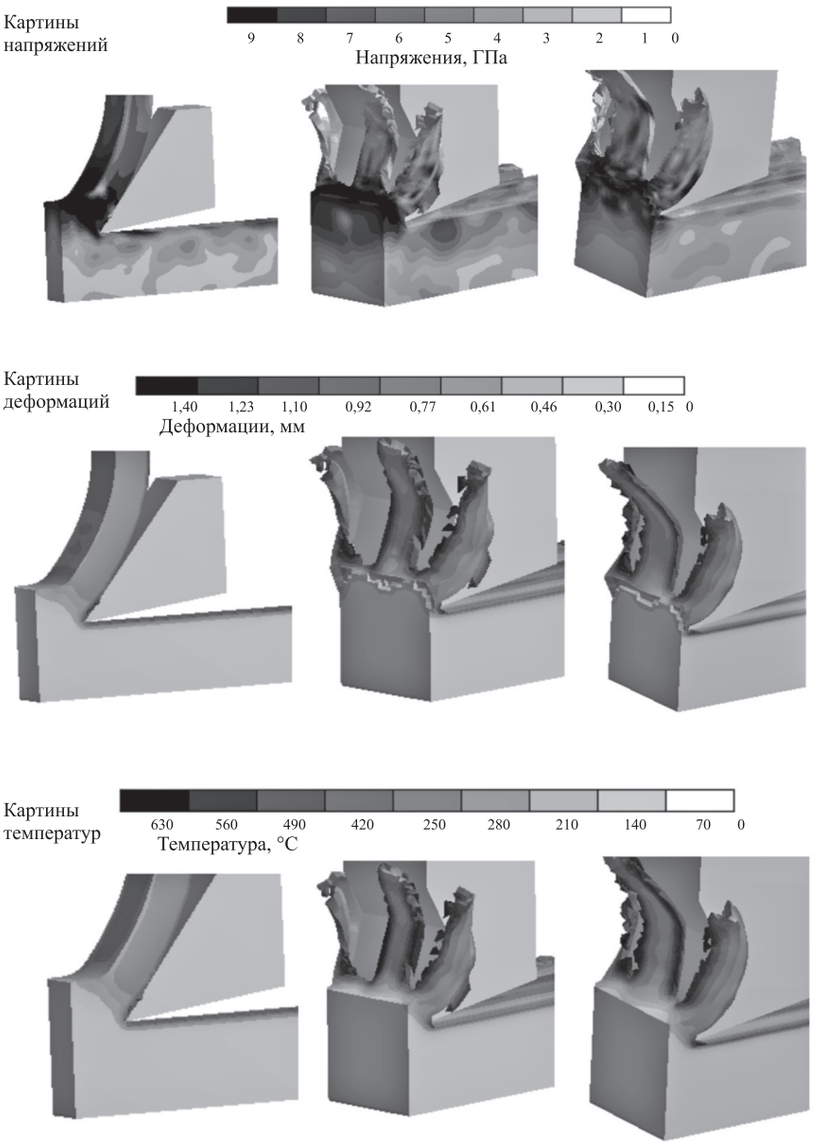


Рис. 5. Примеры картин (раскадровки), характеризующих напряженно-деформированное состояние обрабатываемой заготовки при использовании различной геометрии инструмента:
слева — кадры, соответствующие инструменту, представленному на рис. 4, *а*; в центре — на рис. 4, *в*; справа — на рис. 4, *д*

выявлен градиент внутренних напряжений (по стандартной методике микротравления) в теле заготовки с их ростом (до 28 %) у поверхности;

выявлен прирост (до 15 %) микротвердости в поверхностных слоях (10...120 мкм) материала заготовки при индентировании пирамидкой Берковича на микротвердомере модели ПМТ-3.

Область моделирования была расширена. Рассматривалось еще одно из возможных его направлений — оптимизация конструкции детали и, соответственно, металлорежущего инструмента. Рассмотрены простейшие примеры: продольные выступы (например, шлицы) на деталях обычно имеют прямоугольный профиль. Но эту же роль может выполнить выступ иной формы, например округлой (половина или часть окружности). Какая из форм предпочтительней с тех или иных позиций? На рис. 4, *в*...*е* показаны именно эти примеры. На рис. 6 показано, что это дает с позиций на-

up_318.indd 115 28.02.2018 15:05:29

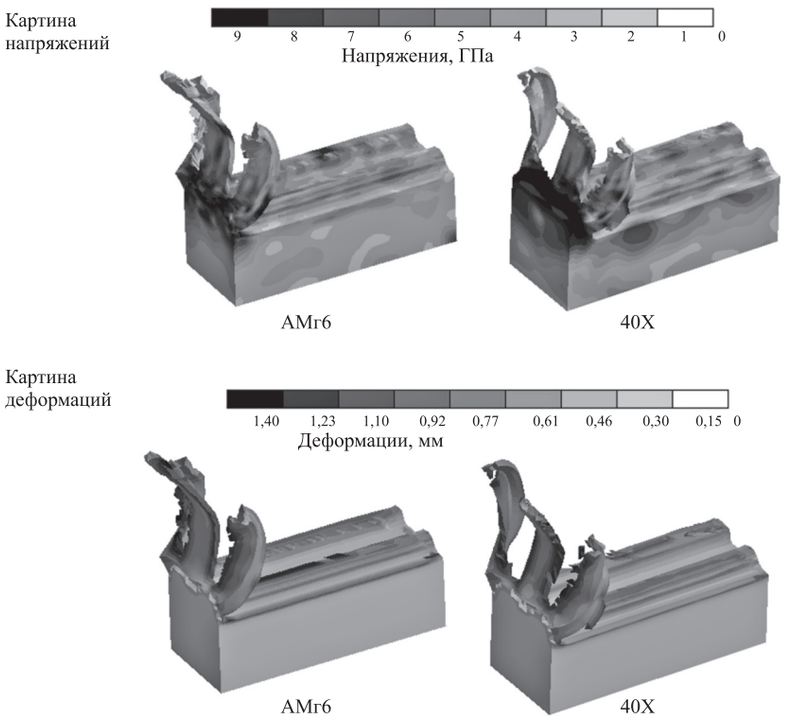


Рис. 6. Примеры управления напряженно-деформированным состоянием обрабатываемой заготовки при изготовлении прямоугольного и округлого выступов на заготовке (профили резца с прямоугольными и овальными пазами для формирования таких выступов приведены на рис. 4). Округлый выступ расположен ближе к передней поверхности, прямоугольный — дальше от нее

пряженно-деформированного состояния поверхностных слоев заготовки и стружки. Сравнение результатов моделирования показывает целесообразность применения выступа округлой формы, что предопределяет геометрию инструмента.

Выводы

Использованные в работе подход и программный комплекс позволяют моделировать различные процессы механической обработки, что, в свою очередь, позволяет отслеживать степень упрочнения поверхностного слоя материала обрабатываемой заготовки в разные моменты времени. Рассмотренный подход может быть использован также для оптимизации конструкции металлорежущего инструмента.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

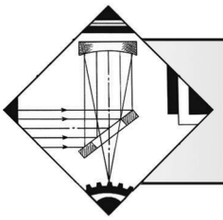
1. **Криворучко Д.В., Залога В.А.** Моделирование процессов резания методом конечных элементов: методологические основы / под общ. ред. В.А. Залоги. Сумы: Университетская книга, 2012. 496 с.

2. **Термомеханическая** модель процесса резания резцом с износостойким покрытием / А.Г. Нарыжный, Ю.Н. Куценко, М.В. Гром, Д.Р. Степаненко // Авиационно-космическая техника и технология. 2014. № 5. С. 4—9.

3. **Корендяев Г.К.** О конечно-элементном моделировании процесса обработки металлов резанием (ч. 2) // Вестник научно-технического развития. 2015. № 3 (91). С. 14—24.

4. **Гисметулин А.Р., Горбунов И.В., Ефременков И.В.** Разработка препроцессора для моделирования операций механообработки в CAE системе ls-dyna // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2014. Т. 16. № 1 (5). С. 1338—1341.

up_318.indd 116 28.02.2018 15:05:29



УДК 621.793.14

Д.В. Фоминский
(Технологический университет, г. Королев),
Е.А. Жукова
(Национальный исследовательский ядерный университет "МИФИ", г. Москва),
А.А. Смирнов
(Московский государственный университет им. М.В. Ломоносова)
E-mail: VYFominskij@mephi.ru

Влияние режимов генерации, разлета и осаждения лазерного факела на состав и структуру наносимых твердосмазочных MoS_x-покрытий

Исследовано влияние длины волны лазерного излучения, лазерного флюенса, давления буферного газа (аргона) и угла падения импульсного лазерного факела на химический состав, морфологию и структурное состояние тонкопленочных покрытий MoS_x. Длина волны лазерного излучения не оказывала заметного влияния на эмиссию из MoS_2-мишени частиц субмикронных и нанометровых размеров, и эти частицы оказывали существенное влияние на морфологию пленок, полученных осаждением лазерной плазмы по нормали к поверхности подложки. Использование буферного газа позволило регулировать химический состав осаждаемых по нормали к поверхности слоев MoS_x, а также реализовать осаждение скользящего вдоль поверхности подложки потока лазерной плазмы. При таком способе осаждения субмикронные частицы не оказывали влияния на морфологию пленок, которая формировалась в результате осаждения рассеянной на газе лазерной плазмы. Состав и структура таких покрытий зависели от расстояния от подложки до облучаемой MoS_2-мишени.

Ключевые слова: *твердосмазочные покрытия, дисульфид молибдена, импульсное лазерное осаждение, микро- и наноструктура, химический состав, морфология.*

The influence of the wavelength of laser radiation, the laser fluence, the pressure of buffer gas (argon), and the angle of incidence of a pulsed laser plume on the chemical composition, morphology and structure of thin-film MoS_x coatings is studied. The wavelength of the laser radiation did not noticeable effect on the emission of submicron and nanometer-sized particles from the MoS_2 target, and these particles had a significant effect on the morphology of the films obtained by deposition of the laser plasma along the normal to the substrate surface. The use of the buffer gas allows to regulate the chemical composition of MoS_x layers deposited along the normal to the substrate surface, and to realize the deposition of a laser plasma plum sliding along the substrate surface. For the method of deposition of sliding plume, submicron particles did not affect the morphology of the films, which was formed because of the deposition of scattered on the gas molecules atomic particles of the laser plasma. The composition and structure of these coatings depended on the distance from the substrate to the irradiated target MoS_2.

Keywords: *solid lubricating coatings, molybdenum disulphide, pulsed laser deposition, micro- and nanostructure, chemical composition, morphology.*

Введение

Твердосмазочные покрытия из дихалькогенидов переходных металлов, в первую очередь из дисульфида молибдена (MoS_2), позволяют существенно снизить коэффициент трения в узлах и механизмах, функционирующих в специфических условиях вакуума, инертного газа и сухого воздуха. Однако они не находят широкого применения в более традиционных условиях трения из-за низких прочностных характеристик и деградации антифрикционных свойств в условиях повышенной влажности. Более распространенным вариантом использования уникальных твердосмазочных свойств этих материалов является формирование слоистых или композитных, в первую очередь, нанокомпозитных покрытий. В состав таких покрытий дихалькогениды металлов входят в виде

up_318.indd 117 28.02.2018 15:05:29

тонких слоев или ультрадисперсной фазы, которая оказывает влияние на развитие процессов трибоиндуцированных изменений в поверхностных слоях покрытий и формирование трибослоя в процессе трения [1—4].

Для получения многослойных и нанокомпозитных покрытий, содержащих твердосмазочный компонент, наиболее часто используют методы ионно-плазменного (магнетронного) распыления [1, 2, 4] и импульсного лазерного осаждения [3, 5]. Второй метод отличается универсальностью и простотой исполнения, однако он обладает серьезным недостатком, особенно заметным при осаждении слоев путем лазерной абляции мишеней из дихалькогенидов переходных металлов и, в первую очередь, при облучении MoS_2-мишени. При лазерном воздействии на мишени, полученные прессованием порошка с частицами микронных размеров, эффективно образуются частицы субмикронных и нанометровых размеров [6, 7]. Если наночастицы могут встраиваться в структуру растущих при осаждении слоев, не нарушая существенно их плотность, то осаждение частиц субмикронных размеров приводит к формированию пористой структуры [8, 9]. Очевидно, что такие особенности лазерной абляции MoS_2-мишеней серьезно сдерживают применение метода импульсного лазерного осаждения для разработки и получения новых нанокомпозитных покрытий с улучшенными свойствами. Предпринимались попытки подавления процессов осаждения субмикро- и наночастиц путем установки специального экрана (заслонки) на пути разлета лазерного факела. Частицы действительно не осаждались, однако за экраном заметно падала скорость осаждения покрытий, а их состав и толщина оказались сильно неоднородными [5, 10, 11].

Одним из важных факторов, влияющих на развитие процессов испарения мишени, может быть длина волны лазерного излучения. Дихалькогениды переходных металлов обладают полупроводниковыми свойствами, а ширина запрещенной зоны составляет примерно 1,5 эВ. Исследование свойств покрытий, полученных с использованием излучения с большей и меньшей, чем ширина запрещенной зоны, энергией фотонов, представляет научный и практический интерес.

Цель работы заключалась в исследовании возможных способов минимизации влияния частиц субмикронных размеров на структуру MoS_x-покрытий при использовании метода импульсного лазерного осаждения из MoS_2-мишени и разработке метода осаждения таких покрытий скользящим лазерным факелом. Параметры осаждаемого атомарного потока варьировали за счет напуска в камеру осаждения инертного (буферного) газа, который не только понижал энергию падающих атомов, но и при определенных давлениях вызывал интенсивное рассеяние этого потока в сторону от направления разлета эрозионной лазерной плазмы. При этом частицы субмикронных размеров практически не изменяли траекторию своего движения в буферном газе и пролетали вдоль поверхности подложки.

Методики формирования покрытий и их исследования

Мишень из MoS_2 в форме пластинок толщиной 4 мм устанавливали в камере для нанесения покрытий. Для облучения мишени использовали импульсы наносекундной длительности, генерируемые лазером фирмы Solar (Беларусь), с длиной волны 1064 нм (ИК-излучение) и 266,5 нм (УФ-излучение). Частота следования импульсов составляла 20 Гц, энергия излучения — 50 и 40 мДж для импульсов с диной волны 1064 и 266,5 нм соответственно. В зоне облучения мишени после фокусировки излучения лазерный флюенс составлял примерно 50 Дж/см^2 (высокий флюенс, ВФ-режим) или 8 Дж/см^2 (низкий флюенс, НФ-режим). Лазерный луч падал под углом 45° к поверхности мишени и перемещался по ней с помощью системы автоматического сканирования. Время осаждения составило 12 мин.

При нанесении покрытий подложку относительно разлета лазерного факела устанавливали двумя способами. В первом случае лазерный факел падал по нормали к поверхности подложки, которую устанавливали на расстоянии 5 см от мишени. Во втором случае подложку располагали на оси вдоль разлета импульсной лазерной плазмы для реализации режима осаждения скользящим лазерным факелом. В этом случае проводили исследования пленок, полученных на различных расстояниях от мишени до участка осаждения пленки. Камеру окачивали до давления 10^{-4} Па. Для проведения осаждения в буферном газе в камеру после откачки на вакуум напускали аргон до заданного давления.

В качестве подложек для осаждения использовали полированные стальные диски, покрытые аморфным углеродным слоем. Температура подложек при осаждении составляла примерно 22 °С. Морфология поверхности и состав покрытий исследовали на сканирующих электронных микроскопах (СЭМ, Tescan LYRA 3 и MIRA 3) с применением метода энергодисперсионной рентгеновской спектроскопии (ЭРС). Для исследований методом комбинационного рассеяния света использовали излучение He-Ne-лазера с длиной волны 632,8 нм. Диаметр анализирующего лазерного пучка не превышал 1 мкм. Для исследования пленок ме-

up_318.indd 118 28.02.2018 15:05:31

тодом просвечивающей электронной микроскопии (ПЭМ) и микродифракции (МД) их наносили на кристаллы поваренной соли и затем высаживали в воде на металлические сетки. ПЭМ- и МД-исследования проводили на микроскопе Carl Zeiss Libra 120, оборудованном приставкой для измерения химического состава методом ЭРС (X-MAX 80T Oxford Instruments).

Результаты исследований и их обсуждение

На рис. 1 и 2 представлены результаты СЭМ-исследования MoS_x-покрытий, полученных осаждением эрозионного факела по нормали к поверхности подложки с применением лазерного излучения с длиной волны 1064 и 266,5 нм соответственно. Результаты количественного анализа осажденного молибдена и отношения атомных концентраций $x = S/Mo$ представлены на рис. 3. Анализ СЭМ-изображений показал, что длина волны излучения не оказывает явного влияния на осаждение частиц субмикронных и нанометровых размеров. При использовании низкого флюенса для обеих длин волн наблюдалась высокая поверхностная плотность таких частиц, осаждение которых не позволяло получать достаточно гладкие MoS_x-покрытия (см. рис. 1, *д*, *е* и рис. 2). Явное уменьшение поверхностной плотности крупных частиц было обнаружено при использовании высокого флюенса (см. рис. 1, *а...г*). Однако это могло быть обусловлено уменьшением общей скорости осаждения MoS_x-покрытия из-за изменения энергетического баланса в зоне воздействия интенсивного лазерного импульса на MoS_2-мишень. Большая часть энергии излучения расходуется на ионизацию парового потока и увеличение его кинетической энергии. При осаждении такого высокоэнергетического плазменного потока на подложку могут протекать процессы самораспыления уже осажденного слоя покрытия. А субмикронные частицы, обладающие высокими скоростями приближения к подложке, могут отскакивать/отражаться от покрытия, образуя глубокие кратеры или даже отверстия. Наиболее высокая поверхностная плотность таких отверстий обнаружена на покрытии, полученном в вакууме в ВФ-режиме (см. рис. 1, *а*).

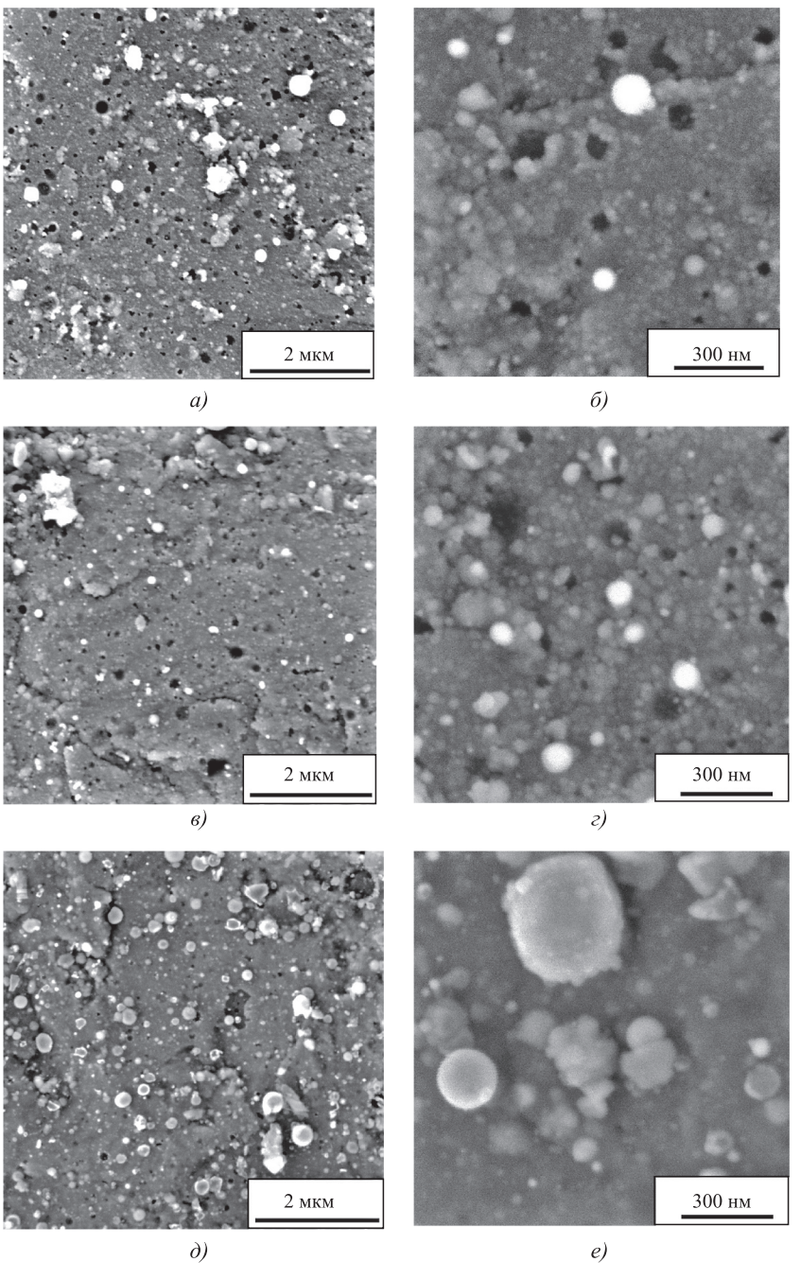


Рис. 1. СЭМ-изображения (при двух увеличениях) поверхности MoS_x-покрытий, осажденных в режимах высокого (*а…г*) и низкого флюенса (*д*, *е*) в вакууме (*а*, *б*) и аргоне при давлении 5 Па (*в…е*) с использованием излучения с длиной волны 1064 нм. Лазерный факел осаждался по нормали к поверхности подложки

Повышение давления буферного газа способно вызывать торможение лазерного факела, т. е. снижать кинетическую энергию атомарной фракции за счет столкновений атомов и ионов с

up_318.indd 119 28.02.2018 15:05:31

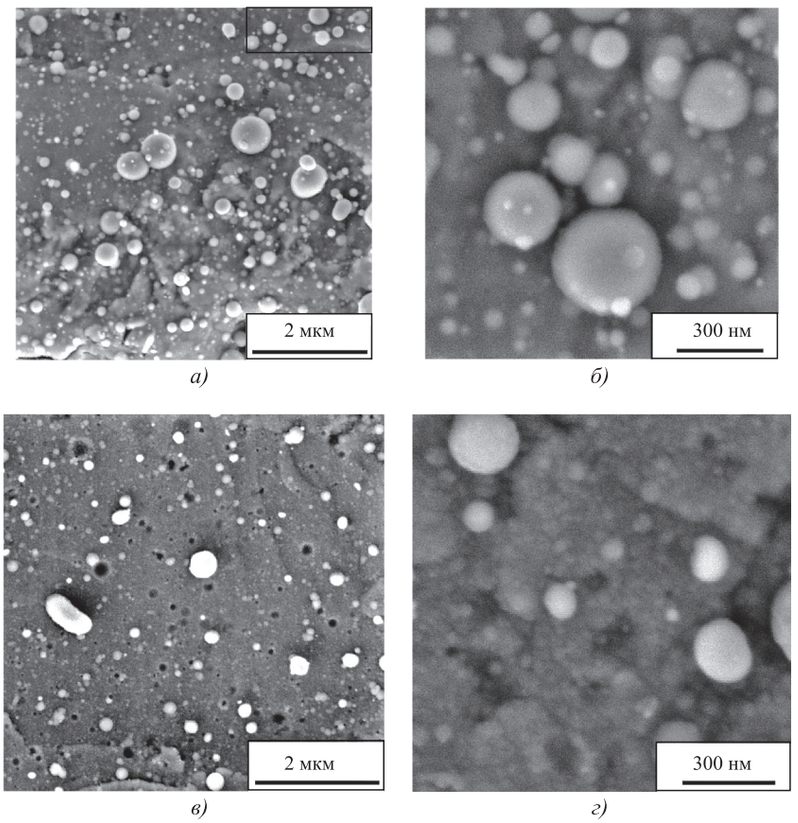


Рис. 2. СЭМ-изображения (при двух увеличениях) поверхности MoS_x-покрытий, осажденных в режиме низкого флюенса в вакууме (*а*, *б*) и аргоне при давлении 5 Па (*в*, *г*) с использованием излучения с длиной волны 266,5 нм. Лазерный факел осаждался по нормали к поверхности подложки

молекулами газа. Такой процесс протекает в режиме взаимопроникновения атомарной фракции факела и буферного газа, и он реализуется при относительно невысокой плотности факела. В таких условиях умеренное повышение давления газа способно обеспечить увеличение скорости осаждения за счет подавления процессов самораспыления. Этот эффект реализовался, вероятно, при получении MoS_x-покрытий в ВФ-режиме в буферном газе в диапазоне давлений 2...5 Па (см. рис. 3, *а*). Повышенное содержание серы в этих пленках ($x \sim 3$) может быть обусловлено тем, что атомарная фракция лазерного факела имеет повышенную концентрацию халькогена, а субмикрочастицы состоят в основном из металла. Неэффективное прилипание субмикрочастиц к подложке может обусловливать повышенное содержание халькогена в самом покрытии.

Следует отметить, что результаты измерения x носят во многом качественный характер. Во-первых, полученные покрытия имеют сложную морфологию и сильную шероховатость, во-вторых, линии рентгеновского излучения Mo L_α (2,293 кэВ) и S K_α (2,307 кэВ) перекрываются в спектрах характеристического излучения покрытий, что усложняет их обработку.

В случае использования НФ-режима нанесения MoS_x-покрытий скорость осаждения уменьшалась при повышении давления буферного газа (см. рис. 3, *б*). Это указывает на то, что атомарная фракция лазерного факела обладала недостаточно высокой энергией для прохождения через слой газа. Значительная часть атомарного потока либо термализовалась в промежутке от мишени до подложки, либо испытывала рассеяние на большие углы и осаждалась в стороне

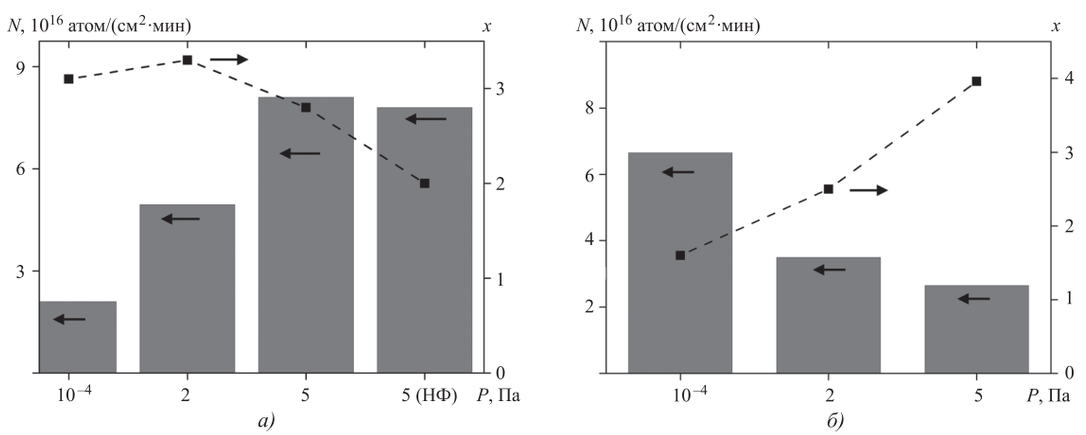


Рис. 3. Количество осажденных атомов Mo на единицу площади подложки N и отношение атомных концентраций x = S/Mo при формировании MoS_x-покрытий в вакууме и аргоне при давлении P с использованием длины волны излучения 1064 (*а*) и 266,5 нм (*б*). Лазерный факел осаждался по нормали к поверхности подложки

up_318.indd 120 28.02.2018 15:05:31

от анализируемой зоны покрытия. Известно, что сечение рассеяния налетающих атомов на молекулах газа превышает сечение рассеяния ионов и для атомов это сечение увеличивается при снижении энергии движения [12].

Переход к геометрии осаждения скользящим лазерным факелом оказался более эффективным способом подавления осаждения крупных частиц при формировании MoS_x-покрытий, чем варьирование длины волны и энергии лазерного излучения при осаждении по нормали к поверхности подложки. Однако состав и структура покрытий сильно зависели от давления газа и расстояния от мишени до области осаждения факела. На рис. 4 представлены результаты исследования скорости осаждения и состава покрытий, наносимых в НФ-режиме при варьировании давления

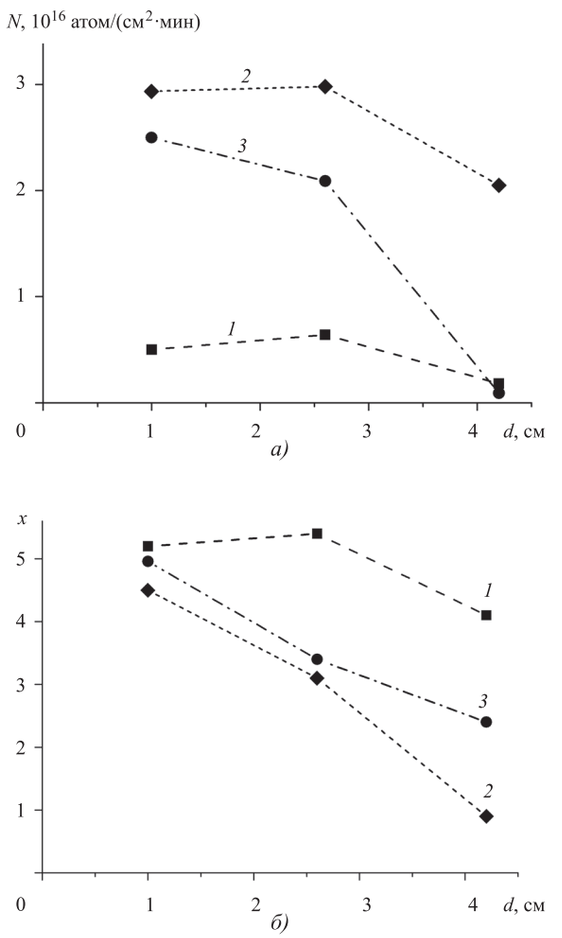


Рис. 4. Количество осажденных атомов Mo на единицу площади подложки *N* и отношение атомных концентраций *x* = S/Mo при формировании MoS_x-покрытий на расстоянии *d* от мишени при давлении 5 (*1*), 20 (*2*) и 30 Па (*3*) с использованием длины волны излучения 1064 нм. Лазерный факел осаждался по касательной к поверхности подложки

газа. Видно, что эффективность осаждения растет при повышении давления аргона с 5 до 20 Па, а затем падает при превышении этого давления. Давление в 20 Па обеспечивает достаточно однородное распределение осаждаемого молибдена на подложке размером до 4 см. Однако сера эффективнее осаждается на подложку вблизи мишени, чем на удалении от нее. Поэтому величина *x* изменяется от 4,5 до 1. Для получения покрытий с однородным составом на достаточно большой площади подложки требуется проводить перемещения и вращения подложки в процессе нанесения MoS_x-покрытий скользящим лазерным факелом.

Исследования морфологии покрытий, формируемых осаждением скользящего факела, показали, что она не сильно зависит от состава покрытий и характеризуется достаточно плотной упаковкой округлых частиц размером менее 50 нм. Агломерация таких наночастиц вызывает формирование округлых частиц размером от 100 до 500 нм. На рис. 5 показаны характерные СЭМ-изображения покрытий, полученных в различных режимах осаждения скользящим факелом. Микрозондовые исследования не выявили наличия субмикронных частиц молибдена на поверхности покрытия. Частицы Mo нанометровых размеров присутствуют на поверхности и дают яркий светлый контраст, однако их поверхностная концентрация невелика и они не оказывают непосредственного влияния на морфологию покрытия. На поверхности покрытий присутствуют округлые частицы микронного размера, которые состоят из множества плотноупакованных круглых наночастиц. Нельзя исключить, что зародышем-ядром таких частиц могли быть осажденные из факела частицы субмикронного размера. При формировании покрытий скользящим пучком в условиях относительно высокого давления буферного газа на поверхность осаждается поток атомов Mo и S, рассеянных на молекулах газа и имеющих широкую диаграмму углов падения на поверхность. Это способствует росту частицы-ядра со всех сторон, т. е. теневой эффект отсутствует.

На рис. 5, *в* выделена область покрытия, которая подвергалась механическому воздействию, имитирующему скольжение контртела. Видно, что материал покрытия достаточно пластичный, а трибовоздействие приводит к сглаживанию рельефа. Это может быть обусловлено аморфной структурой формируемых MoS_x-покрытий скользящим лазерным факелом. На рис. 6 показаны результаты исследования этих покрытий методом комбинационного рассеяния света (КРС). В КРС-спектрах всех покрытий преобладали три уширенные полосы отражения, расположенные около значений волнового числа, равных 350, 450 и 550 $см^{-1}$. Характер таких спектров указывал на аморфный характер

up_318.indd 121 28.02.2018 15:05:31

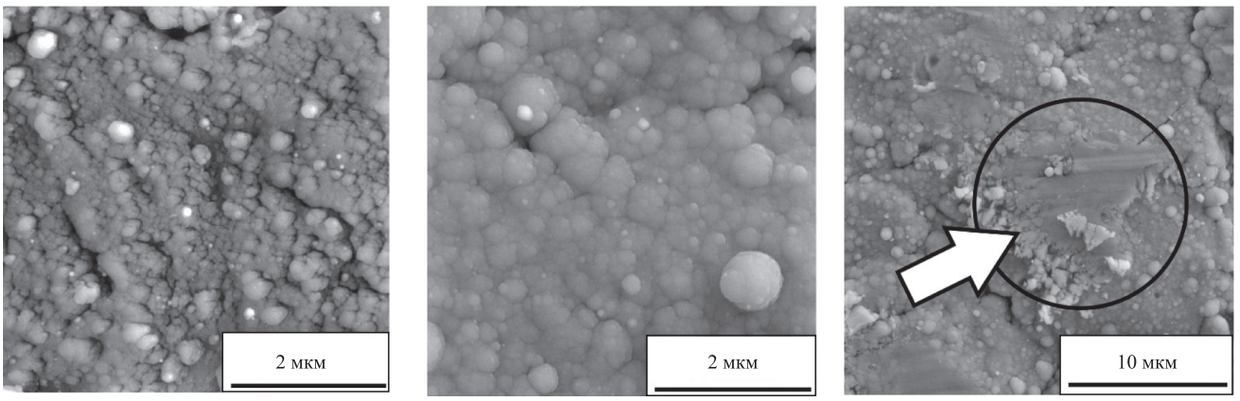


Рис. 5. СЭМ-изображения MoS_x-покрытий, осажденных скользящим лазерным факелом на расстоянии 1 см от мишени при давлениях аргона 5 (*а*), 20 (*б*) и 30 Па (*в*). Стрелкой указана область модифицирования покрытия, образовавшаяся после контакта с контртелом

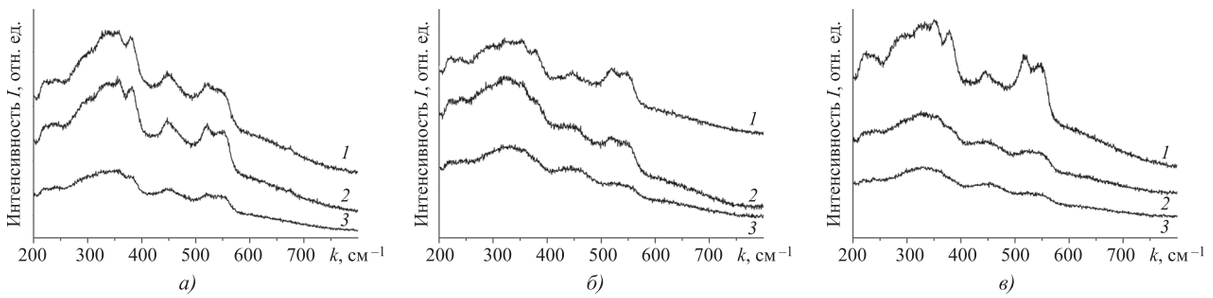


Рис. 6. КРС-спектры для MoS_x-покрытий, осажденных скользящим лазерным факелом на расстоянии 1 (*1*), 2,5 (*2*) и 4,5 см (*3*) от мишени при давлениях аргона 5 (*а*), 20 (*б*) и 30 Па (*в*)

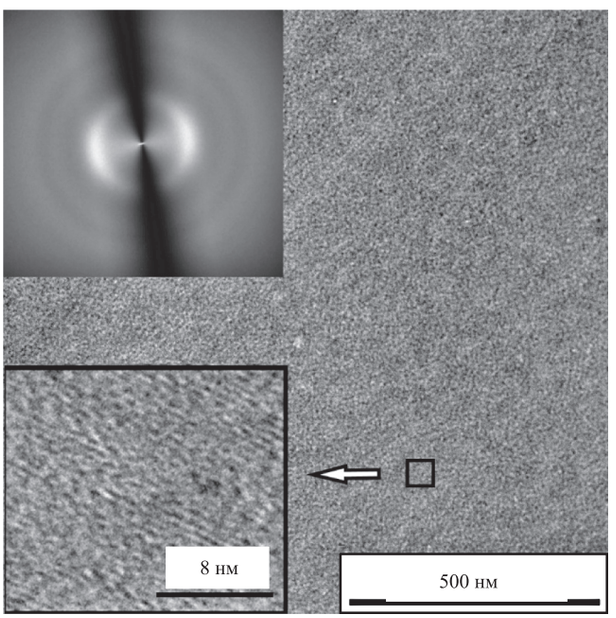


Рис. 7. ПЭМ-изображение и микродифракция для тонкой пленки MoS_x, полученной осаждением скользящего лазерного факела при давлении 10 Па. На вставке показано ПЭМ-изображение высокого разрешения для локальной области пленки

локальной упаковки атомов Mo и S. На отдельных участках покрытий на фоне полос присутствовали относительно узкие линии, возникновение которых объясняется локальным упорядочением в аморфной сетке и формированием кластеров типа $[Mo_3S_{13}]^{2-}$ [13]. Такой эффект проявлялся в основном в участках с высокой концентрацией серы ($x \geqslant 4{,}5$) при различных по давлению буферного газа режимах осаждения из скользящего факела.

Отсутствие в спектрах КРС для MoS_x-покрытий характерных для слоистой 2H-фазы линий для значений волнового числа k 380 и 408 $см^{-1}$ не исключало возможность локального упорядочения в аморфной структуре по такому типу упаковки атомов Mo и S. Дополнительные ПЭМ- и МД-исследования пленок, полученных осаждением скользящего факела, показали, что в аморфной матрице формируются нанокластеры с ламинарной молекулярной упаковкой. Характерные результаты электронно-микроскопических исследований тонких пленок MoS_x, осажденных на кристаллы NaCl, представлены на рис. 7. Толщина этих пленок не превышала 40 нм. Поэтому особенности морфологии, обнаруженные у более толстых покрытий при СЭМ-анализе, в таких плен-

up_318.indd 122 28.02.2018 15:05:31

ках не возникали. При низком увеличении видно, что пленка обладала ровным контрастом без присутствия частиц субмикронных и нанометровых размеров. На ПЭМ-изображении высокого разрешения видны чередующиеся светлые и темные полосы, расстояние между которыми составляет примерно 0,65 нм. Такой контраст характерен для слоистой упаковки 2H-MoS_2-фазы в случае разворота базисных плоскостей перпендикулярно к поверхности пленки. Упорядочение, вероятно, сводилось лишь к формированию атомных Mo- и S-плоскостей, а взаимная ориентация между плоскостями вокруг базисной оси отсутствовала. Малый размер квазикристаллов с ламинарной упаковкой и высокая степень их дефектности исключали формирование резонансного отражения, характерного для 2H-фазы, при измерениях КРС.

Выводы

При получении твердосмазочных покрытий из дисульфида молибдена методом импульсного лазерного осаждения в традиционном и наиболее простом исполнении явно проявляется недостаток этого метода, заключающийся в осаждении на покрытие частиц субмикронных размеров. Этот эффект проявляется при использовании излучения как из УФ, так и из ИК-диапазона длин волн. Подбором лазерного флюенса можно добиться определенного снижения плотности осажденных частиц, а регулирование давления буферного газа позволяет изменять отношение атомных концентраций молибдена и серы, что является важным фактором в трибологических свойствах покрытий MoS_x.

Изменение геометрии осаждения лазерного факела, т. е. переход от осаждения по нормали к поверхности к осаждению скользящим вдоль поверхности подложки лазерным факелом, позволяет практически полностью исключить осаждение частиц субмикронных размеров. Для повышения скорости роста покрытий в такой геометрии осаждения необходимо использовать буферный газ, который обеспечивает рассеяние атомарной фракции на большие углы относительно направления распространения факела. Различие в массах атомов молибдена и серы обусловливает тот факт, что вблизи мишени покрытия оказываются обогащенными серой, а на удалении от мишени — молибденом. Для получения однородного состава необходимо разрабатывать методику перемещения подложки в процессе нанесения покрытий.

При осаждении рассеянного на газе лазерного факела формируются покрытия, состоящие из плотной упаковки округлых частиц MoS_x нанометровых размеров. В аморфной матрице таких покрытий возможно локальное упорядочение атомов с образованием кластеров Mo_3—S (при повышенной концентрации серы) и квазикристаллов MoS_2 с ламинарной упаковкой атомов Mo и S (для покрытий с составом, достаточно близким к стехиометрическому).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Frictional** behavior of self-adaptive nanostructural Mo—Se—C coatings in different sliding conditions / F. Gustavsson, S. Jacobson, A. Cavaleiro, T. Polcar // Wear. 2013. Vol. 303. P. 286—296.
2. **Highly** oriented MoS_2 coatings: tribology and environmental stability / J.F. Curry, N. Argibay, T. Babuska et al. // Tribol. Lett. 2016. Vol. 64. Art. no 11.
3. **Surface** Modification of diamond-like carbon coatings to control over run-in processes in friction pair / S.N. Grigoriev, V.Yu. Fominski, M.A. Volosova et al. // J. of Friction and Wear. 2016. Vol. 37. No. 1. P. 7—14.
4. **A high-resolution** TEM/EELS study of the effect of doping elements on the sliding mechanisms of sputtered WS_2 coatings / F. Gustavsson, M. Bugnet, T. Polcar et al. // Tribol. Transactions. 2015. Vol. 58. Art. no 1. P. 113—118.
5. **Tribological** properties of gradient Mo—Se—Ni—C thin films obtained by pulsed laser deposition in standard and shadow mask configurations / S.N. Grigoriev, V.Yu. Fominski, R.I. Romanov, A.G. Gnedovets // Thin Solid Films. 2014. Vol. 556. P. 35—43.
6. **Deposition** and properties of MoS_2 thin films grown by pulsed laser evaporation / M.S. Donley, P.T. Murray, S.A. Barber, T.W. Haas // Surf. Coat. Technol. 1988. Vol. 36. P. 329—340.
7. **О влиянии** наночастиц на морфологию твердосмазочных $MoSe_x$-покрытий, наносимых импульсным лазерным осаждением / И.С. Еремин, Д.В. Фоминский, А.А. Соловьев, С.П. Посеренин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 5. С. 41—47.
8. **Evolution** of surface topography in pulsed-laser-deposited thin films of MoS_2 / S.D. Walck, J.S. Zabinski, M.S. Donley, J.E. Bultman // Surf. Coat. Technol. 1993. Vol. 62. P. 412—416.
9. **Получение** и исследование трибологических свойств твердосмазочных покрытий, содержащих шарообразные наночастицы металла / Р.И. Романов, Д.В. Фоминский, Н.П. Мацнев, С.П. Посеренин // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 1. С. 34—40.
10. **Импульсное** лазерное осаждение тонкопленочных покрытий с применением капельной заслонки / В.Ю. Фоминский, Р.И. Романов, А.Г. Гнедовец, В.Е. Кошманов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 12. С. 41—47.
11. **Shadow** masked pulsed laser deposition of WSe_x films: Experiment and modeling / S.N. Grigoriev, V.Yu. Fominski, R.I. Romanov et al. // Appl. Surf. Sci. 2013. Vol. 282. P. 607—614.
12. **Bird G.A.** Molecular Gas Dynamics and the Direct Simulation of Gas Flows. Clarendon, Oxford, 1994.
13. **Kibsgaard J., Jaramillo T.F., Besenbacher F.** Building an appropriate active-site motif into a hydrogen-evolution catalyst with thiomolybdate $[Mo_3S_{13}]^{2-}$ clusters // Nature Chem. 2014. Vol. 6. P. 248—253.

up_318.indd 123 28.02.2018 15:05:31

УДК 621.794

М.Л. Скрябин
(Вятская государственная сельскохозяйственная академия, г. Киров),
И.Н. Смехова
(Вятский государственный университет, г. Киров)
E-mail: max.dvs.@mail.ru

Условия формирования нанопористых структур оксидных пленок при микродуговом оксидировании поршневых алюминиевых сплавов

Рассмотрен один из перспективных методов поверхностного упрочнения поршневых алюминиевых сплавов — микродуговое оксидирование. Представлены схемы формирования барьерного и наружного слоев поверхностного покрытия в водных электролитах. Показан механизм образования границы раздела. Рассмотрены условия формирования слоев с большой пористостью и метод воздействия на нее. Описана экспоненциальная зависимость плотности тока от напряженности электрического поля в поверхностной пленке основного металла. Обоснована роль микроразрядов в формировании оксидных слоев на обрабатываемой поверхности. Предложены и описаны условия формирования оксидных пленок на поверхности поршня на основе физико-геометрической модели Келлера и выявлены их характерные особенности.

Ключевые слова: *поршневые алюминиевые сплавы, микродуговое оксидирование, пленочные покрытия, физико-геометрическая модель Келлера, пленочная пористость.*

The article considers one of the promising methods of surface hardening of piston aluminum alloy — microarc oxidation. The schemes of formation of the barrier and outer layers surface treatment in aqueous electrolytes are presented. Shows the mechanism of formation of the interface. The conditions for formation of layers with high porosity and method of exposure on it are considered. Describes the exponential dependence of the current density from the electric field in the surface film of the base metal. The role of discharges in the formation of oxide layers on the treated surface is justified. Proposed and described the conditions of formation of oxide films on the surface of the piston on the basis of physico-geometrical model of Keller and identified their characteristics.

Keywords: *piston aluminum alloys, microarc oxidation, film coatings, physico-geometrical model of Keller, film porosity.*

В связи с ростом удельной мощности современных двигателей внутреннего сгорания и возрастанием нагрузки на цилиндропоршневую группу остро встал вопрос о повышении надежности поршневых алюминиевых сплавов [1]. Кроме того, все больше транспортных средств переводится на альтернативные виды топлива. При работе тепловых двигателей на альтернативных топливах на поршень действуют более высокие механические (давление газов, силы инерции) и тепловые нагрузки, чем при работе на штатном топливе [2]. Вследствие высоких температур поверхности днища поршня (обычно более 300 °С) прочность его материала снижается, что может привести к образованию в поршне трещин [3]. Среди основных методов упрочнения поршневых сплавов можно выделить микродуговое оксидирование (МДО). Этот метод упрочнения является одним из наиболее эффективных и перспективных в современном машиностроении.

Большинство известных работ по МДО носит исследовательский или прикладной характер, а теоретические разработки по механизму МДО практически отсутствуют. В целом число работ, посвященных МДО-воздействию на поверхность металлических материалов, постоянно растет, что характеризует данный процесс упрочнения как перспективный [4]. В настоящее время не существует однозначных теорий и единого механизма формирования структуры покрытий во время МДО. Но, на наш взгляд, основной является физико-геометрическая модель Келлера. Рассматривая

up_318.indd 124 28.02.2018 15:05:31

наглядную физико-геометрическую модель, можно отметить, что при микродуговом оксидировании в начальный момент времени на поверхности основного металла возникает барьерный слой [5].

Физико-геометрическая модель формирования оксидного анодно-искрового покрытия может быть представлена механизмом образования окисных слоев в доискровом режиме. Для полного понимания и обобщения процесса образования анодных оксидных пленок нужно рассмотреть схемы строения тонких оксидных покрытий на группах вентильных металлов. В данной работе рассматривается образование оксидных пленок при МДО на поршневых алюминиевых сплавах. В работах [5, 6] было доказано, что искровой разряд возможен на аноде только в том случае, если обрабатываемая поверхность покрыта тонким слоем диэлектрика. Именно такие свойства имеет тонкая оксидная пленка барьерного слоя. Этот слой образуется на первоначальной стадии МДО. При повышении диэлектрической прочности тонкой пленки барьерного типа повышается напряжение начала прианодного искрообразования [6]. Прианодное окисление поршневых алюминиевых сплавов (как и других металлов вентильной группы) в электролитах, которые частично растворяют анодный оксид (с использованием водного раствора H_2SO_4), определяет кинетику формирования особых анодных оксидных пленок. Эти пленки характеризуются наличием основных пор, расположенных нормально к поверхности основного металла (рис. 1) и отделенных от него очень плотным, барьерным слоем.

Пористые анодные оксидные пленки при оптимально подобранных режимах оксидирования

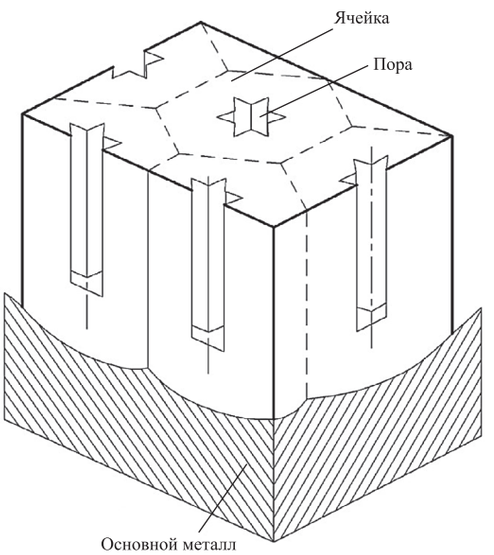


Рис. 1. Идеальная пористая структура анодной оксидной пленки на поверхности поршневого алюминиевого сплава

могут быть выращены до толщины в сотни микрометров. Рассматривая формирование анодных покрытий, можно отметить регулярность формирования ячеек на поверхности основного металла. Для поршневых алюминиевых сплавов главная задача состоит в получении близких к идеальным пористых пленок. Эти оксидные пленки должны обладать низкой дефектностью регулярной структуры ячеек и равномерным распределением пор. Для этого необходимо использовать особенную методику — длительное микродуговое оксидирование алюминия в водном растворе серной кислоты. В результате получается практически идеальная структура по типу пчелиных сот [7].

Основным электролитом, в котором микродуговое оксидирование приводит к образованию поверхностных пленок с наличием регулярно-пористой структуры, является водный раствор серной кислоты. Также проводились исследования с использованием щавелевой и ортофосфорной кислот, но в этих случаях формирование пористой структуры отличалось неравномерностью.

Основной характеристикой, от которой зависит скорость формирования оксидных слоев, согласно классической теории является плотность ионного тока $i_и$, представляющая собой силу электрического тока, который протекает через единицу площади поверхности. Плотность тока экспоненциально зависит от напряженности электрического поля E в поверхностной пленке основного металла. Кроме того, важнейшим показателем является толщина барьерного слоя h, от которой зависит качество оксидированной поверхности основного металла [8],

$$h = \frac{\beta U}{\ln i_и - \ln \alpha} = m_{б.с} U,$$

где $m_{б.с}$ — эффективная скорость роста барьерного слоя в основном металле при постоянной плотности ионного тока $i_и$ в гальваностатическом режиме; U — падение напряжения на пленке.

Кинетическая зависимость анодного потенциала $U_а$ от времени воздействия t при постоянной плотности тока (при которой происходит формирование пористого оксидного слоя на поверхности алюминия) приведена на рис. 2.

Рассматривая и анализируя основные участки графической зависимости, можно выделить четыре стадии роста пористых анодных оксидных пленок. Стадия 1 характеризуется линейной зависимостью для роста анодного потенциала. Именно на этой стадии начинает образовываться плотная оксидная пленка. Толщина формируемого барьерного слоя будет зависеть от величины потенциала формирования (это подтверждается многочисленными экспериментами). К концу этой

up_318.indd 125 28.02.2018 15:05:32

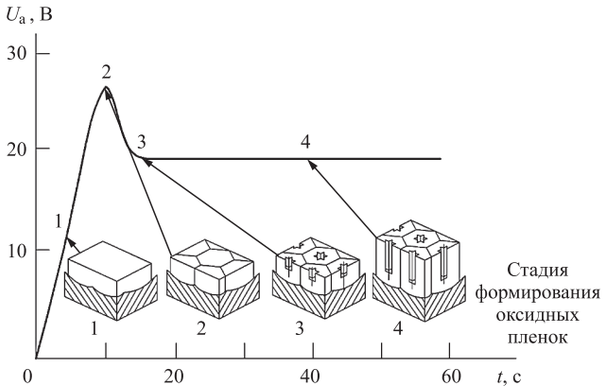


Рис. 2. Кинетическая зависимость анодного потенциала от времени при микродуговом оксидировании алюминия в 3%-ном водном растворе H_2SO_4 при использовании гальваностатического режима ($i_и$ = 25 мА/см^2)

стадии можно отметить в наружных областях барьерного слоя наличие мелких образований глубиной около 8...12 нм. На стадии 2 происходит замедление скорости роста анодного потенциала. Это характеризуется началом зарождения и формирования микропор в поверхностной оксидной пленке. Также на этой стадии продолжается "расползание" наружной области оксидной пленки по поверхности основного металла и определяются преимущественные пути формирования дальнейших проникновений. Часто происходят их углубление и разветвление отдельных участков оксидной пленки. В некоторых случаях появляются разрывы, приводящие к нарушению структуры. Чаще всего подобные эффекты наблюдаются около границы пленка—электролит [6].

На стадии 3 происходит спад анодного потенциала, вызванный дальнейшим поперечным расширением локальных путей проникновения. Из-за этого явления общее сопротивление барьерной пленки уменьшается, и одновременно с этим происходит временное снижение напряжения на аноде. На последней стадии (стадии 4) напряжение на аноде остается постоянным, так как толщина барьерного слоя практически неизменна. Здесь имеет место равновесие, которое усиливается вследствие частичного растворения оксида. Основное растворение наблюдается у дна пор и на границе металл—оксид. Это объясняется миграцией ионов O^{2-}/OH^- через барьерный слой, находящийся у основания пор. Именно на этой стадии начинается формирование регулярных пор. Обобщая, можно отметить, что растворение части оксидной пленки является главным условием роста пористого оксидного слоя. Причем чем выше "агрессивность" электролита, его концентрация и температура, тем более низким значениям напряжения на аноде соответствует максимальная ордината кинетической зависимости. Потенциальная эффективность образования анодных оксидных пленок на поршневых алюминиевых сплавах чаще всего не превышает 70...75 % и постепенно уменьшается с увеличением времени оксидирования [6].

Формирование пористой анодной оксидной пленки при МДО можно осуществить при постоянном напряжении. Кинетика процесса будет характеризоваться изменением плотности ионного тока $i_и$ в зависимости от времени t.

В начальный период времени происходит снижение плотности ионного тока $i_и$, а затем она возрастает до определенного постоянного значения. Подобный характер изменения $i_и$ достаточно специфичен и характерен только для образования пористой пленки. Исследования показали, что изменение морфологических особенностей пленочного покрытия связано с изменением плотности ионного тока. Данная зависимость представлена на рис. 3.

В области падения плотности ионного тока (*a*) начинает образовываться пленка барьерного типа. Образование происходит достаточно быстрыми темпами. В области *b* поверхность вновь образованной пленки становится более волнистой, начинается формирование отдельных ячеек. В области *c* с возрастанием плотности ионного тока начинают формироваться отдельные поры, условный диаметр которых колеблется в пределах 2...4 нм. Условный диаметр отдельных пор может достигать 25 нм. В зоне постоянства плотности ионного тока *d* исходная структура сохраняется, но толщина образованной пористой пленки возрастает. На основе анализа кинетики роста отдельных ячеек и морфологии пленочных покрытий предлагается следующая качественная модель образования и развития процессов роста и растворения оксидных пленок [9].

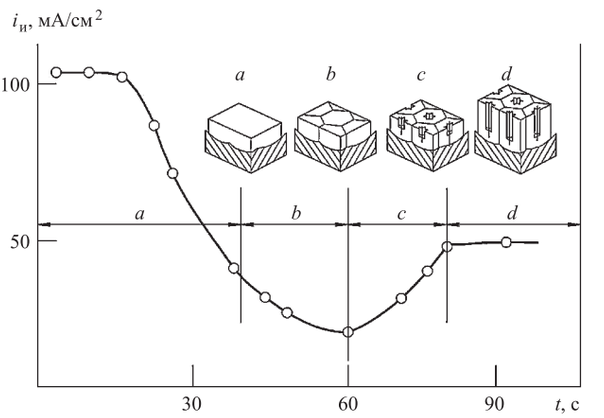


Рис. 3. Изменение плотности ионного тока по времени при микродуговом оксидировании в 3%-ном водном растворе серной кислоты при температуре 45 °С (U_a = 30 В)

up_318.indd 126 28.02.2018 15:05:32

В начальный момент времени, на стадии *a*, скорость образования анодной оксидной пленки при МДО достаточно большая. Это объясняется малой толщиной пленки и большой плотностью ионного тока. Из-за повышенных значений напряженности магнитного поля в слое раствора происходит ускорение разложения H_2SO_4 с выделением анионов S_4^{2-}. Эти анионы вступают в реакцию с локально мигрирующими катионами Al^{3+}. В этом случае происходит образование комплексных ионов $Al(S_4^{2-})_3^{3-}$, которые впоследствии переходят в раствор. На данной стадии растворение происходит достаточно легко. Именно поэтому ионы S_4^{2-} не попадают в оксидную пленку в виде исходных компонентов. При приближении к стадии *b* барьерный слой увеличивается, электрическое поле ослабевает и снижается плотность ионного тока. Это облегчает попадание ионов S_4^{2-} в пленку. На стадии *c* электрическое поле еще более ослабевает и вместе с S_4^{2-} в наружный слой оксидной пленки начинают попадать ионы водорода H^+. В этом случае растворение происходит только на дне пор, где напряженность электрического поля сохраняет свое значение. Увеличение тока на стадии *c* связано с образованием полусферической формы дна пор и с увеличением площади поверхности поры. Вследствие этого толщина барьерного слоя немного уменьшается по сравнению со стадией *b* [10].

Подобная кинетическая зависимость тока сохраняется практически во всех порообразующих электролитах: здесь всегда наблюдается спад анодного тока, а впоследствии происходит его увеличение до определенного постоянного значения.

Анализируя кинетику, можно отметить, что в процессе роста пористой оксидной пленки, после того как происходит зарождение пор и толщина барьерного слоя стабилизируется, микродуговое оксидирование сводится к увеличению толщины пористой части оксида. Толщина пористой части сначала увеличивается линейно, а затем происходит ее насыщение. Такая зависимость объясняется тем, что с течением времени происходит удлинение пор и перегородки между ними становятся тоньше за счет химического растворения оксида. Скорость химического растворения оксида гораздо ниже скорости электрохимического растворения. Если температура водного раствора электролита достаточно высока, а длительность процесса микродугового оксидирования существенна, то за счет химических реакций растворения к моменту окончания процесса стенки полученных пор теряют механическую прочность и осыпаются. Понижая "агрессивность" электролита, можно повысить толщину пористого слоя.

Проведя комплексный анализ кинетики микродугового оксидирования, уже по виду графических зависимостей для плотности тока и анодного потенциала можно оценить все морфологические особенности получаемой оксидной пленки. Но несмотря на однозначность выводов четкая интерпретация затруднительна, так как в процессе микродугового оксидирования одновременно происходят несколько химических и физических процессов: окисление основного металла, рост и растворение оксидов, изменение линейных размеров пор. Следует отметить, что практически все проведенные исследования морфологии пористых оксидных пленок посвящены изучению строения пленок только на стадии стационарного роста пор.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Скрябин М.Л.** Современные материалы для поршней двигателей внутреннего сгорания // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. "Наука — Технология — Ресурсосбережение": сб. науч. тр. Киров, Вятская ГСХА, 2016. Вып. 12. С. 374—379.

2. **Скрябин М.Л.** Применение природного газа как альтернативного топлива в дизеле с промежуточным охлаждением наддувочного воздуха // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Матер. IX Междунар. науч.-практ. конф. "Наука — Технология — Ресурсосбережение": сб. науч. тр. Киров, Вятская ГСХА, 2016. Вып. 12. С. 369—374.

3. **Скрябин М.Л.** Выбор современных материалов для поршневой группы при работе дизеля на альтернативных видах топлива // Улучшение эксплуатационных показателей двигателей внутреннего сгорания: Материалы IX Междунар. науч.-практ. конф. "Наука — Технология — Ресурсосбережение": сб. науч. тр. Киров, Вятская ГСХА, 2016. Вып. 12. С. 359—364.

4. **Характер** разряда в системе металл—оксид—электролит при микродуговом оксидировании на переменном токе / А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин, О.Н. Дунькин, О.С. Невская // Известия АН. Сер. Физическая. 2000. Т. 64. № 4. С. 759—762.

5. **Микродуговое** оксидирование (теория, технология, оборудование) / И.В. Суминов, А.В. Эпельфельд, В.Б. Людин и др. М.: ЭКОМЕТ, 2005. 368 с.

6. **Плазменно-электролитическое** модифицирование поверхности металлов и сплавов / И.В. Суминов, П.Н. Белкин, А.В. Эпельфельд и др. М.: Техносфера, 2011. 464 с.

7. **Ракоч А.Г., Бардин И.В.** Микродуговое оксидирование легких сплавов // Металлургия, 2010. № 6. С. 58—61.

8. **Гюнтершульце А., Бетц Г.** Электролитические конденсаторы. М.: Оборонгиз, 1938. 272 с.

9. **Розен А.Е., Артемьев А.Ю.** Упрочнение поверхности деталей из алюминиевых, титановых и циркониевых сплавов микродуговым оксидированием. М.: Наука, 2015. 145 с.

10. **Thickness** effects on the mechanical properties of micro-arc oxide coatings on aluminium alloys / X. Nie, A. Leyland, H.W. Song et al. // Surface and coatings technology. 1999. No. 116. P. 1055—1060.

up_318.indd 127 28.02.2018 15:05:32

УДК 628.9:621.793

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

Способы уменьшения ртутной опасности, упрочняющие технологии и защитные покрытия

Ведутся работы по созданию ламп с ртутьнепроницаемыми неразрушающимися оболочками. Рассмотрены наиболее эффективные решения по составу защитных покрытий и способам их формирования на поверхности ламп. Приведены данные, полученные экспериментальным путем.

Ключевые слова: *лампа, источник света, ртуть, защитное покрытие, слой, технология.*

Work is underway on the creation of lamps with rotineiramente indestructible casings. Considered the most effective decisions on the composition of the protective coatings and methods of their formation on the surface of the lamps. The data are obtained experimentally.

Keywords: *lamp, light source, mercury, coating, layer, technology.*

Самым радикальным способом борьбы с ртутной опасностью в области светотехники является исключение использования ртути как элемента (рабочего вещества) конструкции осветительного устройства. Уже ведутся работы по созданию безртутных ламп [1—4]. Однако необходимо отметить, что ртуть обладает столь уникальными свойствами, что полноценно заменить ее очень трудно. Разработанные безртутные лампы в целом имеют худшие характеристики, чем аналогичные ртутные лампы, но работы в этом направлении будут продолжаться [2].

В последние десятилетия ртутьсодержащие источники света (ИС) получили широкое распространение. Для повышения безопасности и технологичности таких ИС ведутся работы по созданию ламп с ртутьнепроницаемыми неразрушающимися оболочками, а также совершенствуются системы утилизации ламп. Следует отметить, что важным требованием к защитным покрытиям в ИС является слабое поглощение излучения, выходящего из колбы.

Рассмотрим наиболее эффективные решения по составу покрытий и способам их формирования на поверхности ламп, описанные в патентной литературе. Информация в хронологическом порядке приводится в работах [1, 2]. Ряд таких решений рассмотрен в работе [3].

Для упрочнения люминесцентных ламп (ЛЛ) и поглощения излучения в областях УФ-А и УФ-В (300...400 нм) предложено покрывать колбу полиамидной пленкой толщиной ~ 20 мкм, получаемой из раствора поли-γ-метил-Д-глутаната в дихлорэтане с добавками перхлорида этилена.

Для мощных ламп (с током $I_л$ = 800...1500 мА) предложена пластиковая защитная оболочка, предохраняющая от продуктов взрыва колбы (остатков стекла, ртути). Под оболочкой в зоне электродов (наиболее нагретые участки) предложено устанавливать вкладыш в виде сетки из алюминия или меди, который защищает оболочку от перегрева.

Разработан способ покрытия ЛЛ прозрачной ударовязкой, неломкой пластиковой защитной термоусадочной пленкой. В цилиндрический рукав из указанной пленки вставляют две ЛЛ и изгибают его в зонах между ЛЛ и у концов рукава, помещают вертикально в ванну с горячей водой, а после термоусадки пленки у концов ЛЛ лишнюю пленку убирают.

Разработана конструкция оболочки из прозрачного пластика, способствующей увеличению рабочей температуры колбы и световой отдачи лампы при низких температурах (например, в холодильных камерах) и предохраняющей колбу от разрушения при транспортировании. Но эта оболочка не предотвращает выход ртути в окружающую среду при разрушении лампы.

Предложен способ получения защитного покрытия лампы с помощью термоусадочной пленки, запаянной с одной стороны и погруженной вместе с лампой в ванну с водой, нагретой до температуры t = 95 °С, время термоусадки пленки —

up_318.indd 128 28.02.2018 15:05:32

9 с. Зачистка пленки с концов выполняется перед установкой лампы в светильник.

Разработана конструкция защитной сетки из листового алюминия толщиной 0,25 мм с отверстиями, устанавливаемой поверх поликарбонатной прозрачной для света трубки, причем концы сетки и трубки крепятся к цоколю лампы.

Во избежание разлета осколков стекла, предложено внешнюю поверхность ЛЛ покрывать пленкой на основе смолы, затвердевающей под действием УФ-излучения. Пленка наносится следующим образом. ЛЛ движется по конвейеру, попадает в резервуар со смолой и, вращаясь вокруг своей оси, покрывается пленкой, которая отвердевает в облучательной камере. Процесс непрерывный.

Предложено защитную пленку наносить в четыре этапа: предварительный прогрев лампы до температуры t = 65...205 °С (время — 4 с...5 мин); нанесение на поверхность полимерной пудры в камере при t = (35±3) °С; нагрев до t = 107...205 °С и полимеризация пленки; охлаждение лампы до t = 26...28 °С и снятие с конвейера. Пленка имеет толщину 0,5...1 мм, является однородной и прозрачной. Напыление порошка полимера происходит при продуве воздуха через резервуар с порошком при наложении электрического поля. В работе [3] описан процесс изготовления полимерного рукава, защищающего людей и окружающую среду от осколков стекла и люминофора при разбитии ЛЛ. Рукав надевается на ЛЛ.

Предложено изготовить колбу лампы из пластмассы, прозрачной для света. Для герметичности внутреннего объема на внутреннюю или внешнюю стенку лампы наносится сплошная тонкая пленка кремниевого конденсированного полимера. В работе [3] даны рекомендации по химическому составу пленок, приведены режимы технической обработки. Толщина стенок колб составляет 0,5...2 мм, толщина пленок — 0,5...3 мкм.

Разработана ЛЛ, в которой в зоне электродов (t = 102...125 °С) предложено в качестве защитного покрытия применять тефлон (толщиной 5 мм), а в средней части ЛЛ — полимер сюрлин (толщиной 0,4 мм). Части покрытия скрепляются между собой алюминиевыми держателями. Покрытие на колбу получают методом термической усадки полимерной трубки.

Предложено прямые трубчатые ЛЛ большой мощности (P = 110 Вт) оклеивать тонкой пленочной оболочкой из органического полимерного материала, а на цокольные части лампы надевать кольцевые муфты из эластичной силиконовой резины (толщиной 0,2 мм).

Предложено на внешнюю поверхность стеклянной колбы наносить тонкую защитную пленку на основе синтетической смолы. Поверхностное натяжение пленки повышает механическую прочность колбы.

Для увеличения механической прочности колбы галогенной лампы высокого давления (ГЛВД) предложено наносить защитный слой (толщиной 100...400 мкм) на внешнюю поверхность колбы. Покрытие упрочняет колбу, особенно вблизи цоколя, и обеспечивает ее ударопрочность.

Описана технология нанесения защитной пленки толщиной ~ 100 мкм на внешнюю поверхность колбы. Вначале распылителем наносится слой водной эмульсии, который сушится, а затем электростатическим напылением — слой органической фторсодержащей пластмассы. Нанесенный слой при высокой температуре сплавляется в прозрачную сплошную пленку.

Для нанесения защитной пленки предложено использовать резиноподобные прозрачные для света синтетические смолы двух марок: YSR 3022 (300 ч) и YG 6843 (12 ч), которые тщательно перемешивают и растворяют в растворителе. Используется метод окунания и сушки при t = 70 °С и скорости воздуха V = 5 м/с.

Описано нанесение матовой защитной пленки на колбы прямых ЛЛ. Для нанесения пленки используется специальная резиноподобная синтетическая кислородосодержащая силиконовая смола типа YE 5505 японской фирмы, которая растворяется в органическом растворителе. Способ нанесения и сушка, как в предыдущем случае.

Для нанесения защитной пленки предложено использовать органические смолы двух сортов: DG-439 (300 ч) и DN-960 (185 ч), которые растворяются в органическом растворителе. Технология нанесения и сушка аналогичны используемым в двух предыдущих случаях. В защитную пленку, наносимую на колбу ЛЛ, предложено вводить вещества, поглощающие УФ-излучение.

В ходе ресурсных испытаний ламп ДБ240 и ДБ300, а также образцов зарубежных ламп было установлено, что основной причиной уменьшения излучения ламп при их работе является уменьшение пропускания излучения колбой лампы. Проведенные ранее эксперименты показывают следующее:

1. Пропускаемость кварца лампы восстанавливается практически до первоначального уровня при нагреве кварца до температуры 700...900 °С. Если прогревается лампа без ее разрушения, то при включении разряда пропускаемость быстро, за ~ 5 мин, падает до уровня, близкого к пропускаемости до нагрева.

2. Пропускаемость кварца падает из-за образования на внутренней поверхности кварца, плохо пропускающего излучение слоя вещества, или модифицированного кварца.

3. В состав образующегося на внутренней поверхности колбы слоя, по косвенным данным, входит ртуть.

Цель работы — провести анализ слоя, образующегося на внутренней поверхности бактерицидных амальгамных ламп, для определения его возможного состава.

up_318.indd 129 28.02.2018 15:05:33

Для проведения экспериментов использовали образцы, вырезанные из кварцевых колб ламп ДБ 240, отработавших ~ 13 000 ч. Лампа ДБ 240 (давление 2,7 торр, индиевая амальгама с содержанием ртути 5 %) работала с разрядным током 2,1 А на воздухе в коробе при наличии принудительной вентиляции. Для анализа использовали участки кварца, вырезанные из центральной части колб ламп.

Провели измерения пропускаемости образцов кварца, вырезанных из колб отработавших ламп до и после воздействия на них растворами кислот и щелочей. Пропускаемость образцов измеряли на спектрофотометре СФ-26.

В табл. 1 и 2 представлены результаты измерений пропускаемости τ на нескольких длинах волн (254, 300, 350, 400 нм) при обработке образцов растворами концентрированной азотной кислоты (70 %) и гидроксида натрия (получен растворением твердого NaOH в воде). Влияния концентрированной уксусной кислоты на пропускаемость образцов не обнаружено.

Образцы полностью погружали в кислоту или щелочь, после определенного времени промывали водопроводной водой, дистиллированной водой, протирали тканью, смоченной спиртом, и высушивали. Измеренная пропускаемость представляет собой отношение сигнала фотодатчика спектрофотометра СФ-26 в присутствии испытуемого образца и к сигналу без него. При измерении образцы помещали в одно и то же положение, погрешность измерения пропускаемости не превысила 0,5 %.

Таблица 1

Усредненные результаты измерения пропускаемости образца при воздействии на него кислоты (HNO_3)

Состояние образца	τ_{254}, %	τ_{350}, %	τ_{400}, %
До обработки	20,5	—	—
После 40 минут в HNO_3	22,5	—	—
После 24 часов в HNO_3	27,4	47,4	58,6
После прогрева горелкой на воздухе до 700...900 °С	89,3	94,6	94,8

Таблица 2

Усредненные результаты измерения пропускаемости образца при воздействии на него щелочи (NaOH)

Состояние образца	τ_{254}, %	τ_{300}, %	τ_{350}, %	τ_{400}, %
До обработки	23,5	28,3	37,2	45,5
После 1 ч в NaOH	44,1	53,0	66,0	74,8
После 1,5 ч в NaOH	74,0	86,0	89,5	90,5
После прогрева горелкой на воздухе до 700... 900 °С	82,2	90,1	91,6	91,7

Таблица 3

Элементный состав образца

Элемент	Содержание, % ат.	Погрешность определения σ, %
O	60,96	1,7
Si	38,76	0,6
Hg	0,28	13,3

Как следует из полученных данных, кислота оказывает очень малое влияние на пропускаемость образца. Можно предположить, что малое изменение пропускаемости при воздействии кислоты обусловлено тем, что снимается налет металлов и каких-то иных растворимых в кислоте составляющих, не играющих значительной роли в общей пропускаемости образцов. Воздействие щелочи можно объяснить как взаимодействием с веществами слоя, так и слабым растворением кварца, что приводит к "смыванию" ухудшающего пропускаемость слоя.

Анализ поверхности кварцевых образцов выполнен на сканирующем электронном микроскопе в лаборатории электронной микроскопии Института геологии рудных месторождений, петрографии, минералогии и геохимии РАН (ИГЕМ РАН) и в Институте энергетических проблем химической физики РАН (ИНЭПХФ РАН). В ИНЭПХФ РАН получены качественные результаты и кроме кислорода и кремния на поверхности образцов обнаружена лишь ртуть в незначительных количествах (с помощью электронного микроскопа Camebax MBX-1). Эксперименты с образцами, вырезанными из колбы отработавшей лампы, в ИГЕМ РАН проводили на электронном микроскопе японской фирмы JEOL.

Элементный состав образцов определяли в аналитическом блоке. Так как электронный пучок тормозится в некоторой области, то мы имеем атомный состав не на поверхности, а в некоторой области диаметром 5...10 мкм. Кроме ртути, а также кремния и кислорода, входящих в кварц, присутствие других элементов не обнаружено. Элементный состав представлен в табл. 3.

Если считать, что анализ выполнен верно, то испытуемый образец обеднен кислородом по отношению к кварцу (SiO_2). При содержании Si 38,8 % кислорода должно было быть 77,6 %. Такой результат противоречит гипотезе о том, что потемнение кварца вызвано оседанием на его поверхности оксида ртути, для образования которого кислород выделяется не из кварца (на электроде). В этом случае содержание кислорода должно было быть увеличенным, а не уменьшенным по отношению к удвоенной концентрации кремния. Кроме того, оксиды ртути должны растворяться в кислоте.

Масс-спектрометрический анализ летучих веществ выполнили в ИНЭПХФ РАН. Для анализа образцы, вырезанные из колб ламп, измельчали в металлической ступке и помещали в кювету (пробирку диаметром ~ 1 см) — каждый образец в свою кювету, которую откачивали ртутным диффузионным насосом. Всю кювету нагревали до определенной температуры. При нагреве кюветы проводили масс-спектрометрический анализ газов, выделяющихся из образца. Для калибровки

up_318.indd 130 28.02.2018 15:05:33

интенсивности сигнала масс-спектрометра использовали аргон, подаваемый в систему через натекатель с постоянной скоростью.

Интересно отметить, что максимумы выхода ртути и углекислоты в диапазоне температур 450...600 °С не совпадают, причем температуре 550 °С соответствует максимум выхода ртути, 460 °С — углекислого газа. Более высокая температура десорбции ртути может означать более высокую энергию связи атома ртути с подложкой по сравнению с углекислотой.

В результате анализов получено, что пленка не взаимодействует с кислотой и с основаниями. Анализы не выявили заметных следов других элементов, кроме H, O, C, Si, Hg. Не обнаружено металлов, которые могли бы быть в составе задерживающего УФ-излучение слоя (из амальгамы, электродов и т. п.). Основная масса адсорбированных элементов уходит с поверхности при температуре 250...300 °С, часть связанной ртути удаляется при нагреве до 550...600 °С. Приповерхностный слой колбы обеднен кислородом по отношению к кварцу $(SiO_2)_n$. Так как данные, полученные на электронном микроскопе, относятся к некоторой приповерхностной области размером несколько микрометров, то на поверхности дефицит кислорода должен проявляться в еще большей степени. Кроме того, при нагреве не наблюдается какого-то заметного выделения кислорода в молекулярном или атомарном виде. Для соотнесения выхода ртути и просветления кварца был проведен следующий эксперимент: была измерена пропускаемость образца, вырезанного из колбы отработавшей лампы, до и после выдержки его в печи при температуре 250...300 °С в течение 2,5 ч.

В табл. 4 представлены результаты измерения пропускаемости образцов после нагрева до 300 °С.

Можно предположить, что ртуть связывается с кварцем, причем образуются связи двух типов: более и менее прочные. Можно также предположить, что по аналогии с CO_2 в одном случае Hg связывается с двумя атомами кислорода, связанного с кремнием, в другом — с кислородом и с — OH-группами. Возможно, ртуть связывается непосредственно с атомами кремния. В пользу последнего предположения также говорит тот факт, что силициды металлов растворимы в растворах щелочей.

Таблица 4

Результаты измерения пропускаемости образца при нагреве до 300 °С

Состояние образца	τ_{254}, %	τ_{300}, %	τ_{350}, %	τ_{400}, %
До обработки	23,6	28,2	37,2	45,3
После нагрева в открытой печи (на воздухе) до 250... 300 °С	52,0	61,2	68,8	75,0

Уменьшение пропускаемости слоя во время работы лампы следовало бы приписать увеличению доли активных центров, на которые может садиться и связываться ртуть. Такое увеличение может быть обусловлено как разрушением связей в самом кварце, так и "снятием" с занятых активных центров других веществ. Первый случай представляется более вероятным, так как осаждение пленки происходит после продолжительного воздействия на кварц плазмы и излучения разряда, кроме того, после удаления пленки нагревом она снова быстро образуется в лампе после зажигания разряда. Возможны как разрыв связи Si—O под действием электронного удара (энергия связи Si—O ~ 4,5 эВ — оценка по энергии образования SiO_2), так и протекание процессов кристаллизации кварца в приповерхностной области.

Если происходит разрушение связей Si—O, то оно, казалось бы, должно идти более интенсивно при увеличении концентрации электронов и их энергии. Однако энергия электронов в плазме не связана напрямую с энергией долетающих до стенки электронов из-за наличия потенциального барьера на стенке. Можно предположить, что энергия для разрушения связей в кварцевом стекле поставляется возбужденными атомами или ионами, рекомбинирующими и тушащимися на стенке.

Выводы

1. Уменьшение пропускаемости колбы лампы обусловлено образованием ртутьсодержащего слоя на внутренней поверхности колбы лампы в разряде.

2. Не обнаружено наличия значительного (одного порядка со ртутью) количества материала оксидного покрытия электрода или входящих в амальгаму элементов в составе светопоглощающего слоя.

3. Предположительно, слой на колбе возникает при химическом взаимодействии ртути с активными центрами, образующимися на поверхности кварца под воздействием плазмы и/или излучения разряда.

4. Необходимо найти защитные покрытия, увеличивающие пропускаемость кварцевой колбы, и провести экспериментальные исследования.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

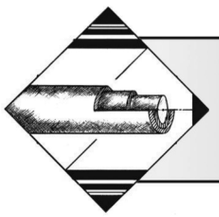
1. **Микаева С.А.** Создание нового поколения люминесцентных устройств с улучшенными световыми характеристиками. М.: Научтехлитиздат, 2004. С. 210.

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_318.indd 131 28.02.2018 15:05:33



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 621.9.048.3:621.45.043

В.Н. Сокольников, Г.А. Сухочев, С.Н. Коденцев
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: sokolnikovv@inbox.ru

Технологическое обеспечение эксплуатационных показателей при доводке роторов комбинированной обработкой

Работа посвящена изучению технологических проблем, возникающих при статической и динамической балансировках высокооборотных роторов турбонасосных агрегатов. Приведены эксплуатационные условия их работы в связи с разупрочнением рабочих поверхностей от нежелательной технологической наследственности. Показаны пути совершенствования процессов технологической доводки с использованием методов локальной отделочно-упрочняющей комбинированной обработки.

Ключевые слова: *устранение дисбаланса, динамическая балансировка, удаление излишнего материала, зоны разупрочнения, комбинированное упрочнение микрошариками.*

The work is devoted to the study of technological problems arising during static and dynamic balancing of high-speed rotors of turbo-pump aggregates. Their operating conditions in connection with the weakening of working surfaces from undesirable technological heredity are shown. Ways of improving the processes of technological debugging using methods of local finishing and strengthening combined processing are shown.

Keywords: *elimination of imbalance, dynamic balancing, removal of excess material, softening zone, combined hardening by microspheres.*

Высоконапорные турбонасосные агрегаты (ТНА) и турбонасосные гидроагрегаты (ТНГА), применяемые в ракетно-космической технике, имеют частоты вращения ротора 1000 $с^{-1}$ и более. В связи с этим их подшипники даже при небольшом смещении центра масс ротора воспринимают сильнейшие нагрузки. Высокие статические и динамические нагрузки влияют прежде всего на работоспособность лопаточных деталей ротора как наиболее напряженных элементов не только ТНА, но и ракетного двигателя в целом. Относительно большие радиальные габариты и сложная силовая схема корпусных деталей способствуют тому, что ряд элементов конструкции ТНА работает в области упругопластических деформаций. Необходимость достижения требуемой долговечности конструкции ТНА делает актуальной задачу обеспечения малоцикловой и многоцикловой усталости при высоком уровне напряженности ее элементов.

Следовательно, совершенство двигателя в значительной степени зависит от напряженности турбины. Поэтому в водородных двигателях лопатки турбины всегда являются высоконапряженными элементами, определяющими ресурс двигателя. Сложность условий работы турбины заключается в воздействии на нее ряда трудно учитываемых факторов: кратковременного повышения температуры при запуске и выключении двигателя, неравномерности температурного поля на входе, пульсаций давления в проточной части, способа выхода на рабочий режим и порядка выключения, циклограммы работы двигателя, деформации диска из-за утечек в турбину холодного водорода.

Разрушающая окружная скорость для турбины при криогенной температуре составляет около 800...900 м/с. Вибрационное состояние конструкции характеризуется высокими собственными частотами — до 8000 Гц [1]. Статическая прочность рабочего колеса турбины обеспечивается на всех режимах эксплуатации двигателя и подтверждается испытаниями на разгонном стенде. Значение разрушающей частоты вращения лежит в области свыше 50 000 $мин^{-1}$. Однако в процессе эксплуатации при циклической работе двигателя на режимах, превышающих 100 % номинального, в зонах корневых сечений лопаток и их сопряжения с бандажом возникают трещины. Часто такие дефекты распространяются и на ступицу вблизи корневых сечений лопаток. В указанных зонах местные напряжения с учетом их концентрации

up_318.indd 132 28.02.2018 15:05:33

превышают предел текучести материала. Это может приводить к образованию трещин в лопатках через пять-шесть циклов нагружения. На лопатки воздействуют не только циклическая температурно-силовая нагрузка, связанная с запуском и остановом двигателя, но и пульсации давления. Переменные напряжения в лопатках от этой нагрузки относительно невелики и составляют порядка 10 МПа при частоте нагружений до 20 000 Гц.

Для предотвращения таких нагрузок на подшипники для роторов всех видов ТНА вводятся требования по балансировке и фактическому дисбалансу роторов. Надежность жидкостных ракетных двигателей (ЖРД) в значительной степени определяется динамическими нагружениями и высокочастотными вибрациями роторов ТНА, возникающими на установившихся и переходных режимах работы. Даже кратковременные выходы их за допустимые пределы часто приводят к поломкам подшипников, возгораниям кислородных насосов, разрывам корпусов, другим опасным отказам агрегатов ЖРД [2]. В связи с этим проблема балансировки энергетических машин, высокоточного уравновешивания механизмов с достижением минимального уровня остаточного дисбаланса имеет крайне важное значение. Причем данная проблема является одной из самых сложных в современной технике.

В общем виде известные методы балансировки [3] объединяет то, что для приведения центра масс на ось для снижения сил, действующих на опоры, проводится балансировка роторов посредством или снятия части металла конструкции со стороны "тяжелого" участка, или установки дополнительных грузов со стороны "легкого". При производстве ТНА применяются два наиболее распространенных вида балансировки его вращающихся деталей и узлов: статистическая и динамическая. Статистическая балансировка проводится для центробежных и осевых колес, импеллеров, дисков турбин и других составных частей ротора в качестве предварительной. Она заключается в выполнении комплекса технологических операций по определению места для балансировочных грузов и их установке в целях уменьшения главного вектора дисбалансов невращающегося ротора.

После статической проводится динамическая балансировка, которая основана на установлении взаимосвязи реакций в опорах вращающегося ротора с дисбалансом масс и включает целый ряд операций, конечная цель которых заключается в определении положения и массы избыточного материала и его удалении с деталей ротора в целях уменьшения дисбаланса до значения, указанного в конструкторской документации. При идеальной динамической уравновешенности центры масс в любой из плоскостей объекта балансировки должны лежать на оси вращения. Так как практически очень трудно выявить местоположение плоскости неуравновешенности, то процесс динамической балансировки сводится к устранению или, вернее, к снижению до допустимого уровня инерционных сил, действующих на опоры ротора.

Для этого доводку быстроходных роторов, изготавливаемых для ТНА ракетно-космической техники, проводят согласно общеустановленным правилам:

значения остаточных дисбалансов ротора следует определять прямым измерением (например, методом обхода контрольным грузом);

при балансировке на зарезонансных станках со стробоскопом для каждого типоразмера роторов агрегатов подачи следует изготавливать эталонный ротор, который является технологическим образцом;

средства технологического оснащения при балансировке ротора должны обеспечивать постоянную воспроизводимость показаний индикатора значений дисбаланса;

балансировку роторов следует проводить на технологических подшипниках, радиальный зазор в которых не должен превышать верхней границы 7-й группы стандартных зазоров;

перед балансировкой ротора необходимо вводить в зазор между внутренним кольцом и сепаратором подшипника смазку и периодически добавлять ее в процессе балансировки;

следует проверять плавность вращения подшипника при вертикальном положении оси вращения перед каждой сборкой ротора на балансировку;

балансировку консольных роторов на станках, не предназначенных для их балансировки, следует проводить в балансировочных рамках, которые должны обладать достаточной жесткостью и минимальной массой;

опорные поверхности и посадочные места под подшипники необходимо выполнять с полем допуска h6, H7 с обеспечением параметра шероховатости *Ra* от 0,8 до 0,4 мкм и допускаемой соосностью относительно общей оси опорных поверхностей 0,015 мм;

рабочая зона для балансировки должна быть изолирована от оборудования, оказывающего вибрационное влияние на показания индикатора дисбаланса балансировочного станка;

ротор должен поступать на участок балансировки чистым, без видимых невооруженным глазом следов загрязнений;

место съема металла с поверхностей ротора должно быть отделено от участка балансировки и оборудовано вытяжной вентиляцией;

относительная влажность воздуха в балансировочном помещении должна быть не выше 70 %, температура воздуха — не ниже 15 °С и не выше 30 °С.

На рис. 1 показана деталь ротора на балансировочном стенде.

Методы балансировки быстроходных роторов, к сожалению, предусматривают снятие излишков ме-

up_318.indd 133 28.02.2018 15:05:33

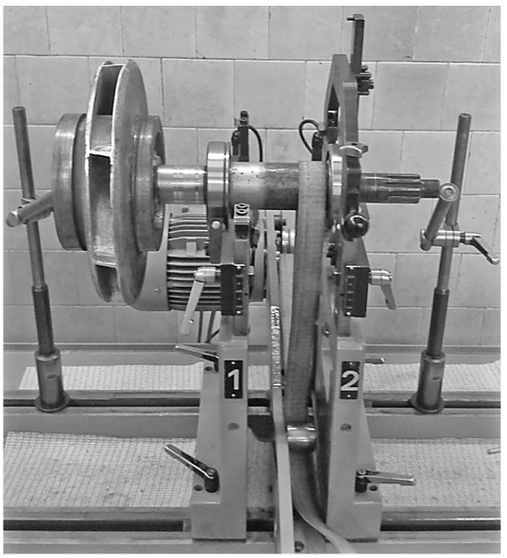


Рис. 1. Деталь ротора на балансировочном стенде

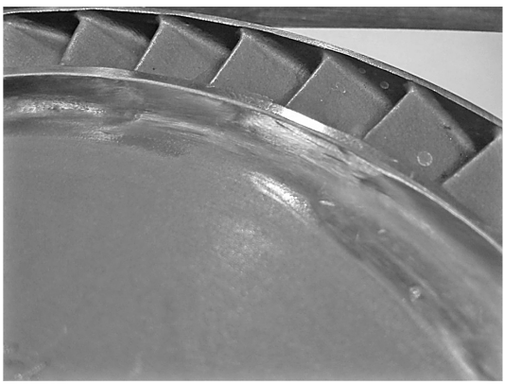


Рис. 2. Зона снятия материала (с характерным блеском) для устранения дисбаланса на турбине

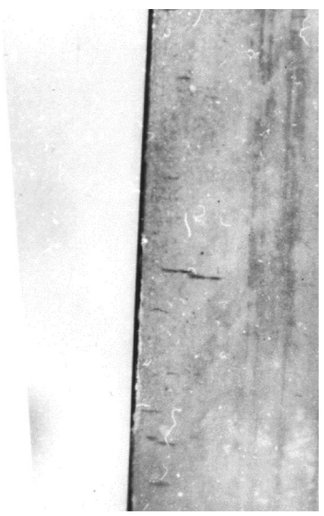


Рис. 3. Трещиноватый поверхностный слой после зачистки и полирования зоны снятия материала при балансировке

талла в местах повышенной концентрации эксплуатационных экстремальных напряжений (рис. 2).

Так как все лопаточные детали роторной группы подвергают в процессе изготовления отделочно-упрочняющей обработке [4], повышающей ресурс рабочих поверхностей, то снятие металла при балансировке в отдельных зонах приводит к снятию наклепа и неуправляемому перераспределению остаточных напряжений в поверхностном слое материала. Остающиеся после механической обработки риски на поверхности являются дополнительными концентраторами напряжений. Неоднородная структура в обрабатываемом материале, неравномерный припуск на обработку, нестационарный характер воздействий при формообразующих операциях изготовления рабочих колес насосов и ряд других факторов приводят к неоднородному пластическому деформированию и неравномерной усталостной прочности поверхностного слоя межлопаточного канала. В результате действия указанных факторов в поверхностном слое проточных поверхностей насосных агрегатов формируются нестабильные по его площади и толщине физико-механические свойства, отрицательно влияющие на прочностные характеристики лопаток [1].

Существенное влияние на свойства поверхностного слоя детали и усталостную прочность агрегата в целом оказывают механическая зачистка борфрезами и финишная абразивная обработка. Значительно снижая шероховатость поверхности, шлифование между тем формирует микронеровности. Их профиль характеризуется острыми вершинами и впадинами с малым радиусом закругления, которые служат концентраторами напряжений и уменьшают площадь опорной поверхности. Из-за тепловых явлений в зоне резания при абразивном шлифовании в тонких слоях образуется структурная неоднородность, снижается микротвердость, образуются остаточные напряжения растяжения, растет количество остаточного аустенита и появляются поверхностные и приповерхностные микротрещины, соизмеримые по величине с микровыступами и микровпадинами рельефа поверхности (рис. 3).

При абразивном шлифовании могут иметь место такие дефекты, как прижоги. Мероприятия по их устранению часто оказываются неэффективными.

Все указанные выше дефекты, связанные со шлифованием, могут наследоваться готовым изделием и приводить к снижению ресурса его работы. Широко применяемые методы окончательной обработки (шлифование, полирование, доводка) позволяют создать необходимую форму деталей с заданной точностью, однако при этом часто не обеспечиваются оптимальное качество и заданные физико-механические свойства поверхностного слоя.

Предложено заданное качество поверхностного слоя материала достигать комбинированным упрочнением микрошариками, которое сочетает в себе механическое деформирующее воздействие и

up_318.indd 134 28.02.2018 15:05:33

анодное растворение обрабатываемой поверхности. При этом стружка не образуется, а происходит тонкое пластическое деформирование поверхностного слоя. Анодное растворение интенсифицирует процесс за счет удаления оксидной пленки в зоне контакта микрошариков с поверхностью [1] и частично снижает ее шероховатость. В результате комбинированной обработки упрочняется поверхностный слой, формируются остаточные напряжения сжатия, повышаются усталостная прочность, стойкость к коррозионным воздействиям. Во многих случаях применением микрошариков и газожидкостной токопроводящей среды [5] удается повысить запасы усталостной прочности деталей, работающих при знакопеременных нагрузках, более чем в два раза.

В нашем случае комбинированную обработку турбин микрошариками фракции 100...200 мкм после завершения балансировки и снятия "лишнего" материала проводили на установках эжекторного типа (рис. 4) с наложением тока низкого напряжения при следующем режиме: расстояние по оси сопла между его срезом и поверхностью образца $L = (50 \pm 5)$ мм; время обработки каждого участка поверхности — 60 с; угол соударения потока микрошариков с поверхностью $\Delta\alpha = (60 \pm 5)^\circ$; диаметр сопла — 10 мм; частота вращения шпинделя установки $n_{вр} = 20...60$ мин$^{-1}$; давление сжатого воздуха в струйном аппарате — 0,2...0,4 МПа; напряжение — 2...5 В; расход газожидкостной слабопроводящей среды — 2 м^3/мин.

Газожидкостная слабопроводящая среда состоит из воздуха и распыленной до капельной фракции технической воды, являющейся слабым проводником. В отличие от сплошного потока жидкости она не снижает и без того малую кинетическую энергию микрошариков. Если требуется снизить параметр шероховатости на величину $\Delta Rz_{исх}$, то припуск $z = Rz_{исх} - Rz_к$ ($Rz_{исх}$, $Rz_к$ — параметры исходной шероховатости до и после обработки соответственно) и минимальное время обработки элементного участка (площади пятна контакта единичного микрошарика с обрабатываемой поверхностью)

$$t_{уч\ min} = \frac{B_{ок}\gamma(\Delta Rz_{max})}{\alpha\eta\psi_{гж}U},$$

где γ — плотность материала детали, г/мм^3; $B_{ок}$ — суммарная толщина оксидных пленок в момент контакта микрошариков с заготовкой, мм; α — электрохимический эквивалент материала детали, кг/Кл; η — выход по току; $\psi_{гж}$ — электропроводность газожидкостной среды, подаваемой с микрошариками, См (зависит от концентрации жидкости); U — напряжение на электродах при анодном растворении, В.

Положительными характеристиками процесса низковольтного анодного растворения при постоянной механической депассивации поверхности микрошариками являются:

возможность использования слабопроводящей распыленной до капельной фракции технической воды;

низкое напряжение (2...5 В), так как за счет соударений микрошариков с поверхностью заготовки электрическое сопротивление снижается до минимума.

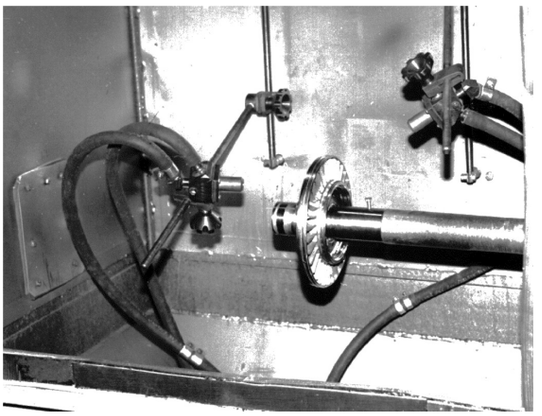


Рис. 4. Турбина в рабочей камере эжекторной установки

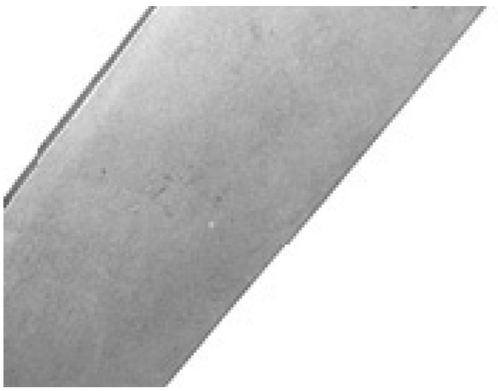


Рис. 5. Поверхность образца после комбинированной обработки микрошариками

Экспериментальные исследования показали, что время обработки микрошариками для получения требуемой шероховатости и равномерного наклепа в элементной зоне составляет доли минуты, что на порядок ниже, чем время обработки при виброударном осаживании микронеровностей.

Достижимое изменение параметра шероховатости ΔRz в этом случае во многом зависит от скорости анодного растворения, которая в момент удара резко увеличивается из-за повышения удельной проводимости в месте соударения в 2...3 раза. При этом создается сглаженный регулярный микрорельеф без концентраторов напряжений — микротрещин и микровыступов (рис. 5), а микрошарики формируют стабильную шероховатость, определяемую их размерами и механическими свойствами поверхностного слоя с учетом сплошности перекрытия отпечатков следов соударений не менее 95 %. Для высокопрочных никелевых сплавов $Rz = 2,5...3,2$ мкм.

up_318.indd 135 28.02.2018 15:05:34

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сухочев Г.А.** Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. Воронеж, ВГУ, 2003. 287 с.
2. **Сухочев Г.А.** Технологические методы повышения эксплуатационных показателей транспортных машин в экстремальных условиях // Техника машиностроения. 2005. № 3. С. 52—54.
3. **Сухочев Г.А., Сокольников В.Н., Коденцев С.Н.** Технологические аспекты балансировки высокооборотных роторов // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2016. № 2 (316). С. 99—105.
4. **Повышение** усталостной прочности поверхностей сложного профиля / Г.А. Сухочев, В.П. Смоленцев, Н.К. Мешков, В.А. Пожидаев // Наука производству. 1999. № 10. С. 47—48.
5. **Технологическое** обеспечение качества лопаточных деталей с использованием наукоемких нетрадиционных методов обработки / Г.А. Сухочев, А.В. Капустин, Е.Г. Смольянникова, Д.М. Небольсин // Насосы. Турбины. Системы. Воронеж: ООО ИПЦ "Научная книга", 2011. № 1. С. 34—42.

УДК 621.91.01

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

Использование покрытий для повышения качества изделий и интенсификации процесса резания материалов с разными физико-механическими свойствами

Приведены обобщенные данные экспериментальных исследований и производственного опыта применения технологических покрытий в качестве средств повышения обрабатываемости материалов резанием. Показано, что при сочетании определенных свойств обрабатываемого материала и условий обработки использование покрытий может обеспечивать существенное повышение качества изделий и технико-экономических показателей процесса резания.

Ключевые слова: *обработка резанием, технологическое покрытие, пропитка, качество обработанной поверхности, период стойкости инструмента, точность изготовления, производительность обработки.*

The results of experimental studies and industrial experience of the application of technological coatings as a means of improving the machinability by cutting are given. It is shown that at combination of certain properties of the processed material and processing conditions the use of coatings can provide significant improvement of product quality and technical-economic indicators of the cutting process.

Keywords: *machining, process coating, impregnation, surface quality, tool life, accuracy of manufacturing, machining performance.*

Введение

К областям рационального применения покрытий сегодня традиционно относят защиту металлов от коррозии, предохранение от разрушения неметаллических материалов, улучшение специальных служебных свойств изделий (триботехнических, декоративных), отделку поверхностей деталей, временную защиту в условиях транспортировки, хранения и консервации, придание поверхности изделия желаемых свойств, а также использование покрытий в качестве ремонтного материала для исправления дефектов поверхностей изделий, полученных ими в условиях эксплуатации [1—4]. Однако к настоящему времени сформировалось еще одно направление эффективного использования технологических покрытий — это улучшение обрабатываемости материалов резанием [1, 5—8].

В статье рассмотрено влияние на выходные показатели обработки резанием разных видов покрытий, как искусственно наносимых, так и самопроизвольно возникающих, происхождение которых обусловлено физико-химическим механизмом непосредственно процесса резания [9—12].

Результаты исследований

Главной проблемой механической обработки резанием (лезвийной и особенно абразивной) для ряда разновидностей волокнистых полимерных композиционных материалов (ПКМ) является обеспечение требуемого качества поверхностного слоя изделия. Известно, что в процессе резания таких материалов в результате перерезания волокон наполнителя на обработанной поверхности образуется ворс [2, 7, 8, 13], исключающий в большинстве случаев возможность достижения

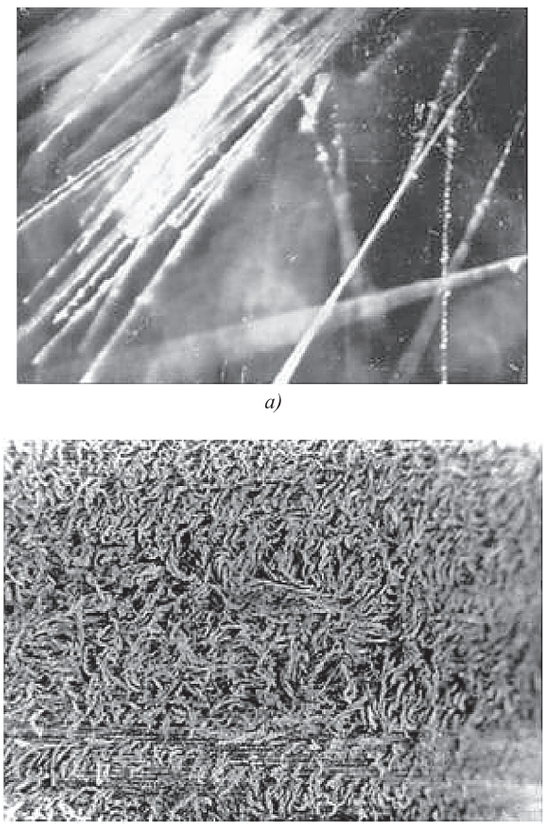
up_318.indd 136 28.02.2018 15:05:34

требуемых показателей качества в соответствии с технической документацией. Особенно высокой склонностью к образованию ворса обладают полиармированные гибридные композиционные материалы (КМ), содержащие гетероволокнистые нити, существенно отличающиеся прочностными и упругими свойствами, пространственные многокомпонентные структуры КМ (например, каркас 3D из стеклянных и кварцевых волокон) и особенно органопластики или композиции, содержащие органические волокна из арамидных полимеров: Армос, СВМ, Терлон и др. (рис. 1). В отдельных случаях ворсистость поверхности после механической обработки не устраняется ни одним из традиционных способов, включая чистовые и финишные технологические методы обработки. Дополнительное механическое воздействие на поверхностный слой волокнистых композитов зачастую вызывает формирование новых дефектов и развитие уже имеющихся, накопление микроповреждений.

В МГТУ им. Н.Э. Баумана разработан метод резания с дополнительным технологическим покрытием (ДТП) [7, 13], обеспечивающий удаление ворса и повышение качества обработанной поверхности. Сущность метода заключается в том, что обработка в окончательный размер состоит из двух этапов: сначала выполняют предварительную обработку в окончательный размер, затем образовавшийся на поверхности ворс связывают нанесением твердеющего технологического покрытия, которое удаляют при повторном (окончательном) проходе режущего инструмента в тот же размер (рис. 2). В качестве покрытия используют различные типы связующего, применяемого при изготовлении ПКМ, или быстротвердеющие клеи и лаки, имеющие химическое сродство с основным материалом. Технологическое покрытие заполняет неровности обрабатываемой поверхности заготовки, образует после полимеризации твердое соединение с обрабатываемым материалом и обеспечивает хорошую адгезию отдельных ранее перерезанных волокон со связующим.

На втором этапе обработки в окончательный размер одновременно с удалением покрытия режущим инструментом срезается и ворс, прочно удерживаемый связующим (рис. 3). При этом, как правило, существенно уменьшается шероховатость обработанной поверхности, частично устраняются дефекты поверхностного слоя изделия (микротрещины, локальные сколы и отслоения матрицы), связанные с процессом стружкообразования на предварительном проходе инструмента. На режимах тонкого точения резание с ДТП позволяет получить параметр шероховатости поверхности деталей из органопластика Ra = 0,5...1,25 мкм, отклонение от круглости — 3-й, 4-й степени точности, высокую точность размеров (6-го, 7-го квалитета).

Качество обработанной с ДТП поверхности (параметр шероховатости, глубина дефектного слоя и др.) зависит от ряда сопутствующих факторов, и в



а)

б)

Рис. 1. Поверхность изделия из волокнистого ПКМ после токарной обработки:
а — трехмерный пространственный стеклопластик 3К1Ф3, армированный кварцевыми волокнами; *б* — органопластик СВМ-6

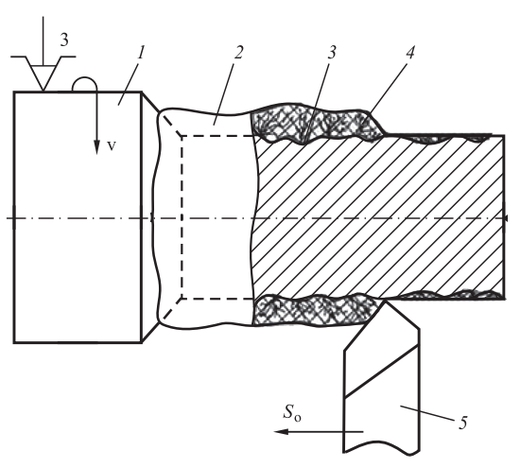


Рис. 2. Схема точения ПКМ с дополнительным технологическим покрытием (чистовой проход):
1 — заготовка; *2* — технологическое покрытие; *3* — профиль обработанной поверхности после первого (предварительного) прохода инструмента; *4* — ворс, образовавшийся на поверхности после первого прохода; *5* — инструмент; v — скорость резания; S_o — подача

up_318.indd 137 28.02.2018 15:05:34

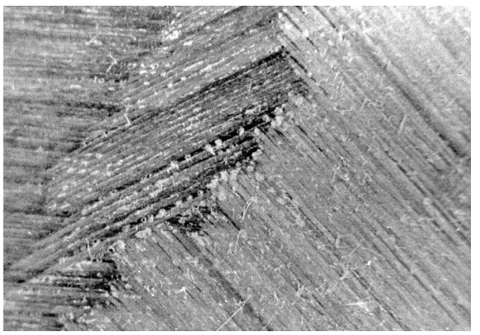


Рис. 3. Поверхность изделия из органопластика СВМ-6 после токарной обработки с ДТП

первую очередь от толщины слоя покрытия $h_п$ и исходной ворсистости поверхности, подготовленной под покрытие. Количественной мерой ворсистости служит коэффициент ворсистости $K_в$, представляющий собой отношение площади поверхности, покрытой ворсом (см. рис. 1), к площади всей обработанной поверхности [13].

Ниже приводятся методика и результаты экспериментального исследования влияния толщины покрытия на шероховатость и ворсистость поверхности.

Испытания выполняли на операции наружного точения трубчатых образцов (наружный диаметр образца $D_{нар}$ = 130 мм, внутренний диаметр $D_{вн}$ = = 110 мм, длина L = 55 мм) из органопластика на основе арамидного волокна СВМ-6, полученных методом тангенциальной намотки. Обработку проводили на токарно-винторезном станке модели 1К62 резцами из быстрорежущей стали Р6М5 при следующих условиях обработки: скорость резания v ≈ 2,5 м/с, подача $S_о$ = 0,21 мм/об, глубина резания t = 0,3 мм; без СОЖ. Высоту микронеровностей измеряли с помощью двойного микроскопа Линника МИС-11. В качестве ДТП использовали эпоксидное связующее ЭДТ-10, которое применяли и при изготовлении обрабатываемых образцов, что обеспечило высокую прочность сцепления нанесенного слоя покрытия с основным материалом заготовки и ворсом, образовавшимся на первом проходе инструмента.

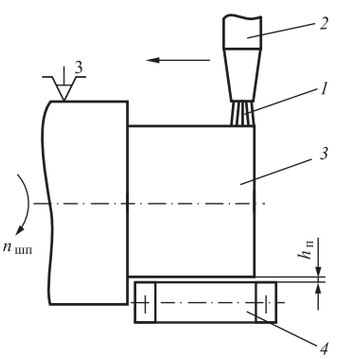


Рис. 4. Схема нанесения на поверхность образца технологического покрытия заданной толщины:
1 — покрытие; *2* — патрубок; *3* — образец; *4* — прижимная планка

Способ нанесения покрытия заданной толщины $h_п$ на предварительно обработанную поверхность образца схематично представлен на рис. 4. Эпоксидное связующее *1* из патрубка *2* наносится на предварительно обработанную резанием поверхность образца *3* при непрерывном вращении заготовки с малой угловой скоростью (частота вращения шпинделя $n_{шп}$ = 12,5 мин$^{-1}$), что позволяет обеспечивать равномерное распределение покрытия по всей поверхности заготовки. Вращение заготовки осуществляется до полного отверждения связующего. Для регулирования толщины слоя покрытия применяется специальная прижимная планка *4*, устанавливаемая в резцедержателе станка с зазором, равным необходимой толщине слоя ДТП $h_п$. Планку изготавливали из фторопласта, отличающегося малой адгезией по отношению к технологическому покрытию.

Экспериментально установлено, что при оптимальных условиях обработки метод резания волокнистых КМ с ДТП позволяет практически полностью устранить ворсистость обработанной поверхности (см. рис. 3), что не обеспечивается другими известными методами, и существенно повысить качество поверхностного слоя изделия.

На рис. 5 представлены экспериментальные зависимости параметра шероховатости *Ra* обработанной поверхности от толщины слоя покрытия $h_п$ (кривая *1*) и коэффициента исходной ворсистости $K_в$ после предварительного прохода инструмента перед нанесением слоя технологического покрытия (кривая *2*). Видно, что при $h_п \geqslant 1$ мм и $K_в \leqslant 0{,}35$ параметр шероховатости *Ra* = 0,63...0,32 мкм по ГОСТ 2789—73. Уменьшение толщины слоя покрытия менее 0,8...1 мм (рис. 5, кривая *1*) вызывает резкое повышение значения параметра *Ra*. При малой толщине покрытия прочность адгезионного взаимодействия ворса со связующим оказывается недостаточной для перерезания режущим инструментом выступающих волокон, которые под действием силовых факторов вытягиваются из связующего. В результате на обработанной поверхности при окончательном чистовом проходе инструмента образуются новые участки, покрытые ворсом ($K_в$ = 0,08...0,3), а также проявляются и другие поверхностные дефекты: локальные отслоения покрытия, микротрещины и т. п.

Качество обработки при резании с ДТП также во многом определяется состоянием поверхности после предварительного (первого) прохода инструмента перед нанесением технологического покрытия. Из зависимости *2* на рис. 5 следует, что при относительно небольших значениях коэффициента $K_в$ (до 0,35) метод резания с ДТП обеспечивает высокое качество обработки поверхности. Рост исходного коэффициента ворсистости ($K_в > 0{,}4$) вызы-

up_318.indd 138 28.02.2018 15:05:34

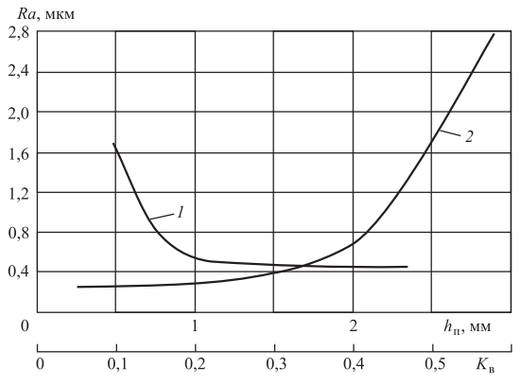


Рис. 5. Изменение параметра шероховатости поверхности *Ra* при резании с ДТП в зависимости от толщины слоя покрытия $h_п$ (*1*, $K_в$ = 0,35) и коэффициента исходной ворсистости поверхности $K_в$ (*2*, $h_п$ = 1,7 мм)

вает на чистовом проходе инструмента при резании с ДТП значительное увеличение параметра шероховатости поверхности *Ra*, приводит к образованию дефектов в наружном слое обработанной поверхности.

Значительный эффект по уменьшению напряженности процесса резания, улучшению качества обработки достигается при использовании в качестве покрытия твердых технологических сред (ТС) [14]. Твердые покрытия состоят из дисульфида молибдена, сульфида марганца или графита в сочетании с различными наполнителями и органическими смолами. В твердых ТС наполнителем может служить нефтяной церезин по ТУ 38.101507—79, парафиновая кислота по ГОСТ 23683—89 и стеариновая кислота по ГОСТ 6484—96. Состав наносят на обрабатываемую поверхность или режущий инструмент. В процессе резания под действием выделяющейся теплоты в условиях интенсивной деформации покрытие распадается и создает защитную атмосферу в зоне обработки. В результате уменьшаются сила и температура резания, увеличивается стойкость режущего инструмента, повышается точность обработки и улучшается качество обработанной поверхности.

Следует отметить, что механизм действия традиционных смазочно-охлаждающих жидкостей, применяемых при обработке резанием, объясняется в том числе образованием на трущихся поверхностях различных по своей физико-химической природе очень стойких пленок, препятствующих в процессе стружкообразования непосредственному контакту этих поверхностей и обеспечивающих снижение сил трения.

При изготовлении тонкостенных, ажурных изделий, трудности механической обработки которых связаны с малой жесткостью обрабатываемых поверхностей, применяют временные твердые покрытия [15]. В качестве твердого покрытия (ТС) может использоваться карбамид, который в расплавленном состоянии (температура плавления 132,7 °С) толстым слоем наносят на необрабатываемые поверхности заготовки и удаляют по завершении механической обработки. В этом случае покрытие не только увеличивает жесткость изделия, что позволяет повысить точность и производительность обработки, но и оказывает демпфирующее действие на процесс резания, снижает интенсивность автоколебаний инструмента и заготовки, обеспечивая тем самым повышение качества обработанных поверхностей.

Специфические технологические трудности возникают при обработке резанием вольфрама и его сплавов. Вольфрам, получаемый в основном путем спекания, при комнатной температуре обладает большой хрупкостью, что в процессе формообразования различными видами обработки резания (точением, сверлением и особенно фрезерованием, а также при нарезании резьб) вызывает появление микротрещин и выкрашивание отдельных участков обработанной поверхности. В США разработан специальный способ обработки вольфрама [16]. Поскольку после спекания вольфрам имеет пористую структуру (плотность составляет 84...90 % от теоретической плотности), перед обработкой резанием поры на поверхностях изделий заполняют материалом, не вступающим в реакцию с вольфрамом. В результате поверхностный слой представляет собой покрытие с иными физико-механическими свойствами по сравнению с исходным материалом. Наполнитель при механической обработке почти полностью устраняет опасность выкрашивания на поверхностях изделий и служит смазочным материалом при резании.

В качестве наполнителей для вольфрама наиболее часто применяют золото и серебро, а также медь, преимуществом которой является меньшая стоимость. После насыщения поверхностного слоя заготовки указанными металлами скорость резания может быть повышена на 100...300 %. При этом достигается высокое качество поверхности. Фрезерование и другие виды обработки резанием не вызывают затруднений, так как выкрашивания на обработанных поверхностях изделия в этом случае не происходит.

Инфильтрацию золота и серебра осуществляют в атмосфере водорода при температуре 1350 °С. Медь удаляют при температуре 1900 °С. В вольфраме остается чрезвычайно незначительное количество использовавшихся наполнителей [16].

Кроме наносимых извне покрытий на технико-экономические показатели обработки большое влияние оказывает самопроизвольно образующееся при определенных условиях резания металлов на передней поверхности инструмента покрытие, получившее название "нарост" (рис. 6). Нарост образуется из материала обрабатываемой заготовки непосредственно у режущей кромки инструмента, имеет слоистое строение и является следствием физико-химического механизма энер-

up_318.indd 139 28.02.2018 15:05:34

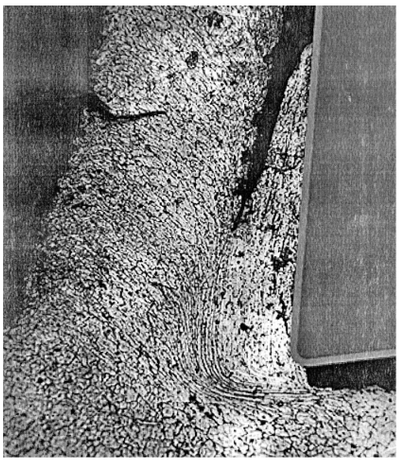


Рис. 6. Микрофотография корня стружки с наростом. Сталь 20Х13

гетических преобразований в локальной области зоны стружкообразования [9, 17, 18]. Твердость нароста в 2,5...3 раза превосходит твердость обрабатываемого материала.

При наиболее распространенных условиях резания сталей нарост достигает максимальной величины при температуре резания примерно 300 °С и пропадает при 600 °С [9]. В результате при скоростях резания, соответствующих указанному температурному интервалу, нарост выполняет защитные функции по отношению к инструменту. Перемещаясь по наросту, стружка смещается от режущих кромок, изнашивая переднюю поверхность лезвия инструмента на значительно большем расстоянии от режущей кромки, чем в случае отсутствия нароста. Свешивающаяся вершина нароста предохраняет заднюю поверхность инструмента от соприкосновения с поверхностью резания. Таким образом, нарост препятствует изнашиванию контактных поверхностей инструмента, способствуя увеличению производительности обработки и периода стойкости режущего инструмента. Вместе с тем явление наростообразования вызывает резкое увеличение шероховатости обработанной поверхности, что делает крайне нежелательным его возникновение при чистовой обработке. В связи с этим резание в условиях наростообразования рекомендуется применять при черновой и получистовой обработке.

Заключение

Представлены результаты опытного исследования и производственного целенаправленного использования технологических покрытий в нетрадиционной области их применения, а именно, при механической обработке резанием. Показано, что при определенных условиях обработки дополнительные покрытия являются высокоэффективным средством повышения обрабатываемости материалов резанием, а в отдельных случаях машиностроительного производства позволяют выполнять такие технологические задачи, которые в настоящее время не могут быть решены какими-либо иными способами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **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.
2. **Ковшов А.Н., Назаров Ю.Ф., Ярославцев В.М.** Нетрадиционные методы обработки материалов: Печатная версия мультимедийного учебника. М.: Изд-во МГОУ, 2007. 212 с.
3. **Газотермическое** напыление: учеб. пособие / под общ. ред. Л.Х. Балдаева. М.: ООО "Старая Басманная", 2015. 540 с.
4. **Солнцев С.С.** Защитные технологические покрытия и тугоплавкие эмали. М.: Машиностроение, 1984. 256 с.
5. **Ярославцев В.М.** Базовые положения общности технологических методов обработки // Материалы 7-го Всероссийского Совещания-семинара "Инженерно-физические проблемы новой техники". Москва, 20—22 мая 2003. М., 2003. С. 185—186.
6. **Ярославцев В.М.** Новые технологии повышения качества поверхностного слоя при резании волокнистых полимерных композиционных материалов // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Машиностроение. 2017. № 6. С. 79—88.
7. **Ярославцев В.М.** Технологические решения проблем обработки ракетных и аэрокосмических конструкций из композиционных материалов // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. Спец. выпуск "Композиционные материалы, конструкции и технологии". 2005. С. 41—62.
8. **Ярославцев В.М.** Высокоэффективные технологии обработки изделий из композиционных материалов // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 4. С. 1—24.
9. **Бобров В.Ф.** Основы теории резания металлов. М.: Машиностроение, 1975. 344 с.
10. **Ярославцев В.М.** Технологический процесс — энергетический преобразователь // Машиностроение и компьютерные технологии. 2012. № 7. С. 3.
11. **Ярославцев В.М.** Влияние деформационной структурной анизотропии обрабатываемых материалов на силу резания // Известия вузов. Машиностроение. 1976. № 12. С. 156—159.
12. **Ярославцев В.М.** Новая характеристика обрабатываемости металлов резанием // Известия вузов. Машиностроение. 1989. № 5. С. 144—148.
13. **Ярославцев В.М.** Обработка резанием полимерных композиционных материалов: учеб. пособие по курсу "Перспективные технологии реновации". М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2012. 182 с.
14. **Худобин Л.В., Бердичевский Е.Г.** Техника применения смазочно-охлаждающих средств в металлообработке. М.: Машиностроение, 1977. 189 с.
15. **Подураев В.Н.** Технология физико-химических методов обработки. М.: Машиностроение, 1985. 264 с.
16. **Справочник** по технологии резания материалов. В 2 кн. Кн. 2 / под ред. Г. Шпура, Т. Штеферле; пер. с нем. под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Машиностроение, 1985. 688 с.
17. **Подураев В.Н., Ярославцев В.М., Ярославцева Н.А.** Исследование свойств материала срезаемого слоя при точении с ОПД // Известия вузов. Машиностроение. 1974. № 12. С. 145—149.
18. **Ярославцев В.М.** Новое о процессе резания // Вестник МГТУ. Сер. Машиностроение. 2000. № 4. С. 32—46.

up_318.indd 140 28.02.2018 15:05:34

УДК 621.7.043

В.Ф. Безъязычный, Р.Н. Фоменко, М.А. Ганзен, М.Л. Первов
(Рыбинский государственный авиационный технический университет им. П.А. Соловьёва),
Н.В. Рассудов
(ПАО "Объединенная двигателестроительная корпорация — Сатурн", г. Рыбинск)
E-mail: technology@rsatu.ru

Автоматизированное нанесение смазочных материалов на заготовки лопаток газотурбинных двигателей при штамповке*

Рассмотрены современные технологии нанесения смазочных материалов на элементы штамповой оснастки, применяемые при автоматизированной штамповке заготовок лопаток компрессора газотурбинных двигателей в условиях крупносерийного производства. Приведены виды смазок на основе графита для нанесения на гравюры штампов и защитно-смазочных покрытий для нанесения на заготовки.

Ключевые слова: *смазка, штамп, лопатка компрессора, газотурбинный двигатель, автоматизация.*

The modern technology of applying lubricants on the elements of die tooling used in automated stamping billet compressor blades of gas turbine engines in the conditions of mass production are described. The types of lubricants based on graphite for applying on stamps prints and protective-lubricating coatings for applying on the workpiece are given.

Keywords: *lubricant, stamp, compressor blade, gas turbine engine, automation.*

Введение

В крупносерийном и массовом производстве лопаток компрессора, как правило, используются высокоточные исходные заготовки лопаток, получаемые штамповкой. При этом все большее распространение получают технологии, при которых перо лопатки окончательно формируется на заготовительном этапе и в дальнейшем не подвергается механической обработке (за исключением полирования или виброабразивной обработки). Это позволяет повысить производительность труда, однако требует повышенного внимания к операции объемной штамповки. Поскольку перо лопатки не имеет припуска на механическую обработку, наличие дефектов структуры материала, поверхностных отклонений или несплошностей (трещин) приводит к отбраковке лопаток.

Наряду с повышенными требованиями к точности штамповой оснастки и оборудования, режимам нагрева и деформирования особое внимание уделяется нанесению защитных покрытий на штампы и исходные полуфабрикаты. Защитные смазочные покрытия применяются для защиты поверхностей заготовок от повреждений, снижения коэффициента трения, обеспечения равномерности силы прессования, защиты заготовки от влияния атмосферы (окислительных процессов), а также уменьшения деформаций и износа штампов.

Содержание исследования

В качестве материалов для защитных смазочных покрытий широко применяются стеклоэмали [1, 2]. Стеклоэмали поставляются в виде мелкодисперсных порошков, из которых создаются суспензии на водной основе. Суспензии наносят на поверхности полуфабрикатов погружением или распылением. В ряде случаев успешно применяют теплозащитные покрытия Deltaglaze FB-651 или ОВТ-1 (ТУ 2113-141-05015182—2002). Покрытие ОВТ-1 представляет собой водорастворимую суспензию на основе коллоидного графита и тугоплавких металлов. Покрытие Deltaglaze FB-651 — водорастворимая суспензия на основе боратного стекла. При штамповке заготовок лопаток компрессора в качестве защитных покрытий применяют составы Condaforge 190B (для стальных заготовок) и ЭВТ-24 (для титановых заготовок). Нанесение защитных смазочных покрытий на

* Работа выполнена в рамках договора № 02.G25.31.0156 от 1 декабря 2015 г. с Минобрнауки России "Роботизированный комплекс автоматизированной штамповки лопаток компрессора ГТД".

up_318.indd 141 28.02.2018 15:05:34

полуфабрикаты выполняют не во всех технологических процессах объемной штамповки, а гравюра штампа смазывается всегда перед штамповкой.

На гравюру штампов наносят преимущественно бездымные смазки, уменьшающие трение при штамповке.

Лабораторные испытания смазок позволяют уменьшить объем длительных и дорогостоящих производственных испытаний, исключив из числа испытуемых смазки с неудовлетворительными физико-химическими и технологическими свойствами. Известно несколько способов определения эффективности технологических смазок [3—5]:

по изменению конечной высоты поковки или облоя необрезанной поковки;

по изменению геометрических параметров кольцевых заготовок при осадке;

по изменению конечного периметра облоя необрезанной поковки;

по изменению значений напряжений в станине пресса;

по изменению значений деформации станины пресса, с использованием методики определения коэффициента трения методом осадки кольца;

с использованием четырехшариковой машины трения или машины трения другой конструкции.

Наиболее достоверным способом оценки эффективности технологических смазок является их производственное испытание в реальных условиях с последующей оценкой качества получаемых штамповок. На основе предварительных испытаний различных технологических смазок, проведенных в ПАО "Объединенная двигателестроительная корпорация — Сатурн" ("ОДК-Сатурн"), были выбраны смазки, показавшие наилучшие эксплуатационные свойства и качество штампуемых образцов.

Производственные испытания показали, что в качестве смазок при штамповке заготовок из сталей и титановых сплавов могут быть использованы технологические графитовые смазки Condaforge 298 фирмы Condat или Lubrodal F29/2-TB фирмы Fuchs Lubritech. Высокое содержание в составах таких смазок мелкодисперсного графита гарантирует хорошую смачиваемость, хорошие разделительные свойства и смазывающую способность поверхностей горячего инструмента. Смазки разбавляются водой, являются бездымными, не выделяют токсичных веществ, имеют срок хранения и консистенцию, позволяющую использовать их в составе автоматизированных комплексов, хорошо распыляются форсунками, наносятся ровным слоем на гравюру штампа.

В процессе штамповки гравюра штампа автоматически обдувается сжатым воздухом и смазывается графитовой смазкой. Внешний вид гравюры штампа после нанесения смазки представлен на рис. 1.

В процессе штамповки смазка обеспечивает равномерность слоя покрытия и сохраняет свою сплошность после штамповки, образуя на поверхности гравюры штампа сухую адгезивную смазочную пленку. Графитовое покрытие легко удаляется с гравюры штампа обдувкой. Внешний вид лопатки, полученной штамповкой, показан на рис. 2.

Процесс нанесения защитных смазочных покрытий включает следующие действия:

подготовку защитных смазочных покрытий;

обезжиривание исходных заготовок лопаток;

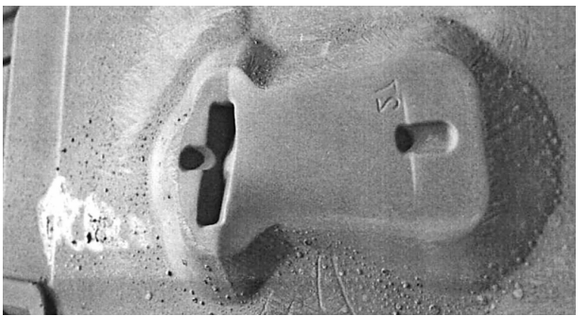


Рис. 1. Гравюра штампа после нанесения смазки Lubrodal F29/2-TB

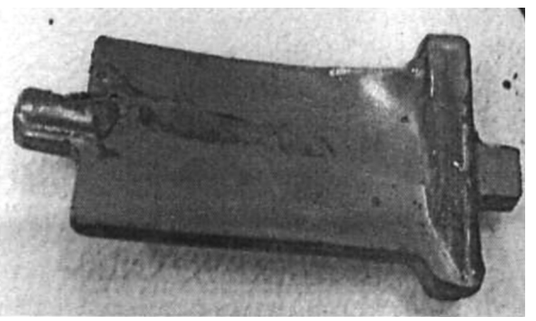


Рис. 2. Лопатка, полученная штамповкой, после обрезки облоя

нанесение покрытий на исходные заготовки лопаток;

сушку исходных заготовок лопаток;

хранение исходных заготовок перед отправлением на штамповку.

Выполнение этих операций в кузнечном цехе вызывает целый ряд неудобств. Поэтому операции нанесения смазочных материалов могут быть вынесены на отдельный технологический участок (рис. 3).

На представленном на рис. 3 участке находятся четыре рабочих места, размещенных на столах (верстаках) *1*. Посередине участка расположен проход (проезд), предназначенный для перемещения партий заготовок вручную либо при помощи грузовых тележек. Стеллаж *2* и мойки *3* разделяют участок в поперечном направлении. Таким образом, создается отдельное пространство для каждого рабочего места. Расстояние между элементами оборудования и ширина проходов выбраны в соответствии с рекомендациями ОНТП 14—93 [6, 7].

В некоторых производствах для нанесения смазки на полуфабрикаты используют автоматические линии [8], однако это экономически оправданно только в массовом производстве. Другой не менее важной задачей является автоматизированное нанесение смазки на поверхности штампа перед штамповкой каждой заготовки. Особенно это актуально при применении робототехнологических комплексов (РТК) для автоматизированной штамповки лопаток [9].

При создании РТК автоматизированной штамповки лопаток компрессора в ПАО "ОДК-Сатурн" было разработано специальное устройство для нанесения смазки. Это устройство осуществляет автоматизированную

up_318.indd 142 28.02.2018 15:05:35

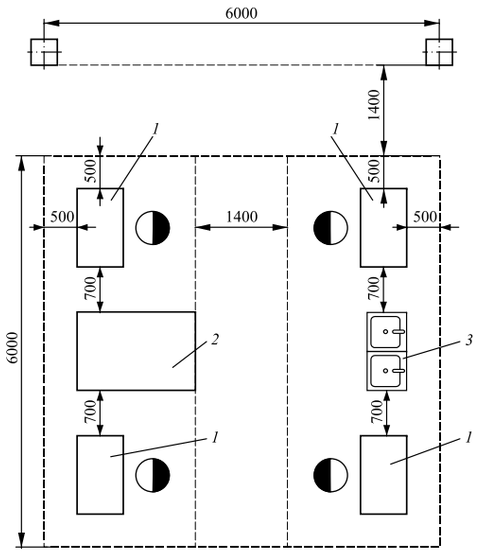


Рис. 3. Планировка технологического участка нанесения смазки:
1 — верстаки; *2* — стеллаж; *3* — мойки

очистку (обдувку) штампов сжатым воздухом после выполнения операции объемной штамповки (в целях удаления загрязнений и остатков облоя) и нанесение слоя графитовой смазки на штампы перед штамповкой следующей заготовки лопатки. Устройство является универсальным и позволяет наносить графитовую смазку на штамповую оснастку, используемую для производства всей номенклатуры заготовок лопаток компрессора, производимой на предприятии.

Основным элементом разработанного устройства, обеспечивающим его автоматическую работу, является промышленный робот Fanuc M-10iA, входящий в состав РТК автоматизированной штамповки.

На присоединительном фланце манипулятора робота располагаются две форсунки, предназначенные для распыления воздуха (обдувки) и графита соответственно. Графит распыляется по технологии Airless фирмы Nordson, при которой он не смешивается с воздухом или жидкостью, что повышает равномерность распыления, а также улучшает стойкостные характеристики штампов в отличие от классических технологий нанесения графита.

Система распыления графита включает в себя электронасос с баком и миксером и сетчатый фильтр, соединенные между собой трубопроводами. Миксер размалывает и перемешивает графит в частицы размером около 0,002 мм, обеспечивая равномерную консистенцию смазки. Насос прокачивает графит через фильтр, отсеивающий крупные частицы, к форсунке, через которую графит равномерно распыляется на поверхности штампов. Угол распыла является постоянным и определяется конструкцией форсунки. В дальнейшем для обеспечения универсальности устройства предполагается внедрить в конструкцию форсунки диафрагменный механизм, плавно регулирующий угол распыления.

При работе устройства в режиме обдувки воздух от заводской пневмосети давлением 0,6 МПа подается через специальный воздушный фильтр к воздушной форсунке, закрепленной на манипуляторе робота. Управление подачей воздуха и графита осуществляется с помощью электромеханических клапанов от общей системы управления РТК.

Устройство можно разделить на четыре основных блока (рис. 4):

робот-манипулятор Fanuc M-10iA *2*;

система для обдувки штампа (трубопроводы *4*, *11* и *12*; фильтр *3*; воздушная форсунка *1*);

система нанесения смазки на штамп (электронасос с миксером *5*; фильтр *7*; трубопроводы *6*, *8* и *10*; форсунка для графита *12*);

система управления подачей воздуха и графита *9*.

Для соединения трубопроводов и узлов устройства используются современные резьбовые фитинги с заданной силой затяжки, обеспечивающей их герметичность, фланцевые сопряжения, а также ряд сварных соединений.

Детали устройства изготовлены из коррозионностойких сталей или неметаллических материалов (гиб-

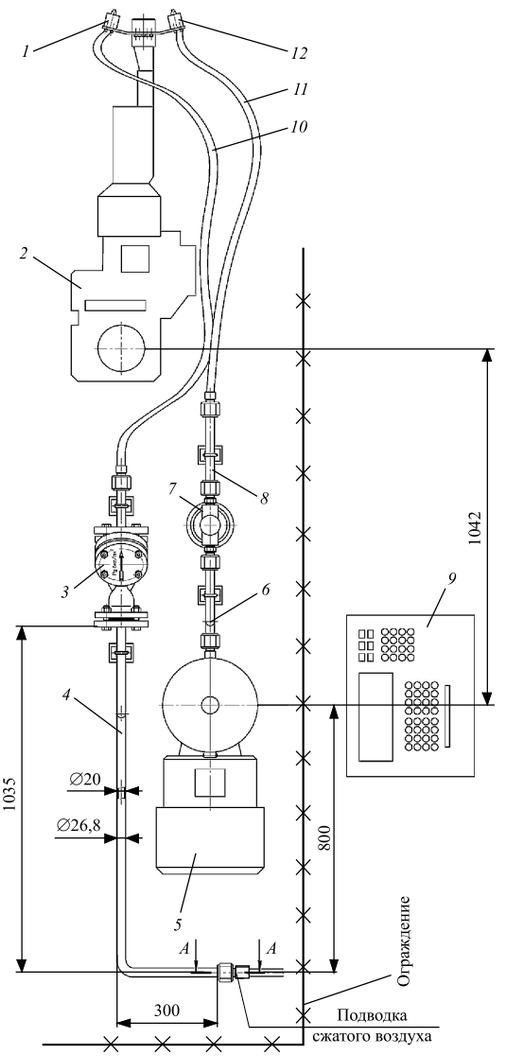


Рис. 4. Конструкция устройства для нанесения смазки

up_318.indd 143 28.02.2018 15:05:35

кие трубопроводы), что обеспечивает их требуемую долговечность. Форсунки и фланец манипулятора изготовлены из теплоустойчивой стали, обеспечивающей надежную работу в непосредственной близости от рабочей зоны пресса.

Основные элементы устройства фиксируются на фундаменте при помощи стоек. Подвод воздуха и графита к блоку форсунок на манипуляторе робота осуществляется при помощи гибких трубопроводов, остальные магистрали выполняются жесткими. Металлические трубопроводы заземляются для обеспечения безопасности персонала. Разработанное устройство обеспечивает выполнение необходимых функций при минимальном числе элементов и оптимальных затратах на производство и сборку устройства, в том числе за счет унификации и стандартизации элементов.

Непосредственно перед началом работы РТК оператором выполняются следующие действия:

внешний осмотр устройства в целях выявления повреждений и коррозии элементов;

проверка герметичности сетей: отсутствия утечек воздуха (по акустической эмиссии), следов графита на фитингах;

загрузка графита в бак электронасоса.

В процессе работы РТК не требуется обслуживание устройства оператором. Работа происходит согласно управляющей программе, заложенной в систему управления РТК, в следующей последовательности:

подвод манипулятора в межштамповую область (линейный);

обдувка верхней части штампа воздухом;

поворот фланца манипулятора (по часовой стрелке на 180°) и обдувка нижней части штампа;

поворот фланца манипулятора (против часовой стрелки на 180°), нанесение графита на верхнюю часть штампа;

поворот фланца манипулятора (по часовой стрелке на 180°), нанесение графита на нижнюю часть штампа;

поворот фланца манипулятора (против часовой стрелки на 180°);

отвод манипулятора из рабочей зоны (линейный).

После окончания работы РТК выполняют:

внешний осмотр устройства на предмет наличия механических повреждений, потери герметичности, износа форсунок;

очистку миксера от остатков графитовой смеси;

очистку фильтров (один раз каждые 10 рабочих дней или по необходимости).

Заключение

Применение автоматизированного устройства для нанесения смазки на штампы позволило сократить затраты времени на вспомогательные переходы операции штамповки (обдувку и смазку штамповой оснастки) на 50...60 %; снизить трудоемкость операции и существенно улучшить условия труда персонала кузнечного цеха (устранить прямой контакт с графитовой пылью).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петров А.Н., Соляков А.П.** Теплозащитные покрытия для прецизионной штамповки жаростойких сталей // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2013. Т. 2. № 2. С. 85—88.

2. **Бердичевский Е.Г.** Инновационные технологические смазки в процессах горячей обработки металлов // Инновации в машиностроении (ИнМаш—2015): сб. тр. VII Междунар. науч.-практ. конф.; под ред. В.Ю. Блюменштейна, А.А. Баканова, О.А. Останина, 2015. С. 246—250.

3. **Никольский Л.А., Фиглин С.З., Бойцов В.В.** Горячая штамповка и прессование титановых сплавов. М.: Машиностроение, 1975. 285 с.

4. **Санакоев Г.К., Проскудин А.П., Панина З.И.** Методика оценки технологических смазок для штамповки. Воронеж, ЭНИКМАШ, 1981. 81 с.

5. **Маврина В.Н.** Оценка технологической эффективности смазочно-охлаждающих сред при штамповке металлов // Смазочно-охлаждающие технологические среды: сб. науч. тр. М.: ЦНИИ информ. и техн. экон. исслед. нефтеперераб. и нефтехим. пром-сти, 1982. С. 110—116.

6. **Нормы** технологического проектирования предприятий машиностроения, приборостроения и металлообработки. ОНТП 14-93.

7. **Мельников Г.Н., Вороненко В.П.** Проектирование механосборочных цехов / под ред. А.М. Дальского. М.: Машиностроение, 1990. 352 с.

8. **Каргин Б.С., Каргин С.Б., Ткачёв Р.О.** Инновационные технологии изготовления и подачи смазок при горячей объемной штамповке сталей // Вісник Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". Сер.: Машинобудування. 2010. № 60. С. 216—218.

9. **Болотеин А.Н., Сутягин А.Н.** Разработка алгоритма выбора структуры роботизированного технологического комплекса для горячей штамповки лопаток ГТД // Вестник РГАТУ им. П.А. Соловьева. 2016. № 2 (37). С. 35—40.

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 28.12.2017 г. Подписано в печать 22.02.18 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_318.indd 144 28.02.2018 15:05:35