

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

Том 15
2019
№ 9 (177)
сентябрь

Издается с января 2005 г.

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

Председатель редакционного совета

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

Заместитель главного редактора

д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:

д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:

Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.Е. ГРОМОВ, д.ф.-м.н., проф.
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.В. СЛЕПЦОВ, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:

О.С. ЛУКАШЕНКО
А.В. ОРЛОВА
Е.А. СЕРИКОВА

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

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

СОДЕРЖАНИЕ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Гурьянов Г.Н., Гурьянов Н.Г. Оптимальное значение дельта-критерия формы очага деформации при волочении круглого сплошного профиля из материала с разными кривыми упрочнения 387

Зайдес С.А. От пластического отпечатка при внедрении рабочего инструмента к созданию новых процессов отделочно-упрочняющей обработки 399



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Иванов В.И. О путях повышения эффективности и универсальности электроискрового легирования 404

Ким В.А., Афанасьева А.А., Аунг Нгву Тэйн. Морфология поверхностей, сформированных импульсной лазерной обработкой сталей и сплавов 412

Ковтунов А.И., Нестеренко И.С., Семистенова Т.В. Двухстадийное алитирование стали: газопламенное напыление с диффузионным отжигом 418



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Некрылов А.М., Сухочев Г.А., Родионов А.О. Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы 421



УПРОЧНЯЮЩИЕ НАНОТЕХНОЛОГИИ

Верещака А.А., Табаков В.П. Исследование влияния архитектуры многослойного покрытия на работоспособность твердосплавного инструмента 427



ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

Вербенко И.А., Резниченко Л.А., Глазунова Е.В. Сегнетоэлектрические среды со структурой типа перовскита как основа нового поколения мемристорных композитных материалов 430

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: 05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки; 05.02.08 – Технология машиностроения; 05.05.03 – Колесные и гусеничные машины; 05.05.06 – Горные машины; 05.16.01 – Металловедение и термическая обработка металлов и сплавов; 05.16.05 – Обработка металлов давлением; 05.16.06 – Порошковая металлургия и композиционные материалы, в базу данных Chemical Abstracts, в Russian Science Citation Index на платформе Web of Science

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

Vol. 15
2019
№ 9 (177)
September

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr. of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistant

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

Chairman Assistants:

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

Editorial council:

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

Edition:

O.S. LUKASHENKO
A.V. ORLOVA
E.A. SERIKOVA

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

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

- Gur'yanov G.N., Gur'yanov N.G.** Optimum deformation zone shape delta criterion at drawing of round solid profile from different strength curves material 387
- Zaides S.A.** From plastic imprint in implementation of working tool to creation of new processes of finishing and strengthening treatment 399

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

- Ivanov V.I.** About ways of increase in efficiency and versatility of electrospark alloying 404
- Kim V.A., Afanas'eva A.A., Aung Ngve Tain.** Morphology of surfaces formed by pulsed laser processing of steels and alloys 412
- Kovtunov A.I., Nesterenko I.S., Semistenova T.V.** Two-stage aluminizing of steel: flame spraying with diffusion annealing 418

PROCESSING BY COMBINED METHODS

- Nekrylov A.M., Sukhochev G.A., Rodionov A.O.** Study of hardening treatment modes of blade channels of rotar group parts 421

STRENGTHENING NANOTECHNOLOGY

- Vereshchaka A.A., Tabakov V.P.** Effect of multilayer coating architecture on service-ability of carbide tool 427

POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

- Verbenko I.A., Reznichenko L.A., Glazunova E.V.** Ferroelectric media with perovskite structure as basis of new generation of memristor composite materials 430

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

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses according to groups of science specialty: 05.02.07 – Technology and equipment of mechanical and physical-technique processing; 05.02.08 – Mechanical-engineering technology; 05.05.03 – Wheeled and crawler machines; 05.05.06 – Mining machines; 05.16.01 – Metal science and heat treatment of metals and alloys; 05.16.05 – Metal pressure treatment; 05.16.06 – Powder metallurgy and composite materials,
Chemical Abstracts database, Russian Science Citation Index on Web of Science platform



УДК 621.778.016.3.004.18

Г.Н. Гурьянов (ОАО "НИИМетиз", г. Магнитогорск),
Н.Г. Гурьянов (ООО "Башкирская сетевая компания", г. Белорецк)
E-mail: ggnbelorhome@rambler.ru

Оптимальное значение дельта-критерия формы очага деформации при волочении круглого сплошного профиля из материала с разными кривыми упрочнения

Предложены формулы для расчета оптимального значения дельта-критерия формы очага деформации с учетом модели упрочнения, коэффициента трения и напряжения противонапряжения. Приведены зависимости от коэффициента вытяжки дельта-критерия, осевого напряжения, коэффициента запаса прочности И.Л. Перлина и показателя напряженного состояния В.Л. Колмогорова при фиксированном и оптимальном угле волочения. Модель упрочнения в меньшей степени влияет на оптимальное значение дельта-критерия, чем коэффициенты вытяжки, трения и напряжение противонапряжения. Показана связь дельта-критерия с напряжением волочения, коэффициентом запаса прочности и показателем напряженного состояния при разных моделях упрочнения и параметрах деформации. Впервые определено предельное значение дельта-критерия при фиксированном и оптимальном его значении предельное значение дельта-критерия больше при отсутствии деформационного упрочнения. С увеличением оптимального угла волочения уменьшается коэффициент запаса прочности и повышается коэффициент вытяжки. Предельное значение оптимального угла волочения (при коэффициенте запаса прочности, равном 1) меньше при отсутствии деформационного упрочнения. Показаны близкие значения дельта-критерия по предложенным зависимостям и формулам зарубежных исследователей. При расчете оптимального значения дельта-критерия необходимо учитывать также напряжение противонапряжения и модели упрочнения. Учет дельта-критерия способствует выбору рациональных режимов волочения круглого сплошного профиля.

Ключевые слова: волочение, проволока, прутки, рабочий канал волоки, критерий формы очага деформации, оптимальный угол волочения, запас прочности, показатель напряженного состояния, коэффициент вытяжки, относительное обжатие.

Formulas for calculating of the optimal deformation zone shape delta criterion taking into account the hardening model, the friction coefficient and the back-pull stress are proposed. The dependences on the drawing coefficient and the delta criterion, axial stress, the I.L. Perlin safety factor and the V.L. Kolmogorov stress state index at fixed and optimal drawing angle. The hardening model to lesser extent affects on the optimal delta criterion than the drawing and friction coefficients and the back-pull stress. The connection between the delta criterion and the drawing stress, the safety factor and the stress state index is shown for different hardening models and deformation parameters. For the first time, the limiting value of the delta criterion is determined for fixed and optimal drawing angle and different hardening models. The limiting value of the delta criterion is greater in the absence of strain hardening at fixed value of the drawing angle and its optimal value. The safety factor decreases and the drawing coefficient increases with increase in the optimal drawing angle. The limiting value of the optimal drawing angle (with safety factor of 1) is less in the absence of strain hardening. The close values of delta criterion according to the proposed dependencies and formulas of foreign researchers are shown. When calculating the optimal delta criterion, it is also necessary to take into account the back-pull stress and the hardening models. Taking into account the optimal delta criterion contributes to the choice of rational modes of drawing of round solid profile.

Keywords: drawing, wire, rod, working channel of drawing, deformation zone shape criterion, optimal drawing angle, safety factor, stress state indicator, drawing ratio, relative reduction.

Введение

В отечественной теории волочения для исследования напряженно-деформированного состояния круглого сплошного профиля (проволоки, прутка) редко используются комбинированные показатели формы очага деформации. Энергосиловые показатели процесса волочения наиболее часто определяются в зависимости от коэффициентов вытяжки μ и трения f , угла α наклона к оси волочения образующей рабочего конуса волоки [1–3]. В зарубежных публикациях при исследованиях процесса волочения форму очага деформации часто оценивают дельта-критерием [4–7]:

$$\Delta = \frac{\alpha}{r} (1 + \sqrt{1-r})^2, \quad (1)$$

где $r = (d_0^2 - d_k^2)/d_0^2 = (\mu - 1)/\mu$ — относительное обжатие поперечного сечения;

$\mu = (d_0/d_k)^2$ — коэффициент вытяжки; d_0, d_k — диаметр проволоки (прутка) соответственно до и после деформации;

α — угол волочения, рад.

Относительное обжатие в отечественной литературе обычно обозначают δ . Критерий Δ (1), очевидно, не характеризует относительную высоту очага деформации круглого сплошного профиля в коническом канале волоки.

Математические преобразования позволили установить равенство для конического канала очага деформации [8, 9]:

$$\frac{(1 + \sqrt{1-r})^2}{r} = \frac{d_0 + d_k}{d_0 - d_k}. \quad (2)$$

Левая часть отношения (2) входит в критерий Δ (1). Если принять равенство значений α и $tg\alpha$, то $\Delta = d_{cp}/L$ и имеем [10]:

$$\frac{4\alpha}{\ln\mu} = \alpha \frac{d_0 + d_k}{d_0 - d_k} = \frac{d_{cp}}{L} = \Delta \quad \text{или} \quad \frac{\ln\mu}{\alpha} = \frac{4L}{d_{cp}} = \frac{4}{\Delta}, \quad (3)$$

где $d_{cp} = \frac{d_0 + d_k}{2}$; L — длина очага деформации.

Для установления характера связи критерия Δ , коэффициента вытяжки μ и относительного обжатия r получены зависимости:

$$\Delta = \frac{\alpha(\sqrt{\mu} + 1)}{\sqrt{\mu} - 1} = \frac{\alpha(\sqrt{1/(1-r)} + 1)}{\sqrt{1/(1-r)} - 1}, \quad (4)$$

$$\mu = \frac{1}{1-r} = \left(\frac{\Delta + \alpha}{\Delta - \alpha} \right)^2. \quad (5)$$

В работе [5] приведена формула для расчета оптимального значения критерия Δ , при котором минимальное напряжение волочения

$$\Delta_{\text{опт}} = 1,89(f/r)^{1/2}[1 + (1-r)^{1/2}], \quad (6)$$

где r — относительное обжатие, которое используется в формуле (1) при расчете критерия Δ .

В формуле (7) вместо относительного обжатия r введен коэффициент вытяжки μ :

$$\Delta_{\text{опт}} = 1,89 \left(1 + \sqrt{\frac{1}{\mu}} \right) \sqrt{\frac{f\mu}{\mu-1}}. \quad (7)$$

Также известна формула [6] для расчета оптимального значения критерия:

$$\Delta_{\text{опт}} = 4,9 \sqrt{\frac{f}{\ln\mu}}. \quad (8)$$

Формулы (6)–(8) не включают напряжение противонапряжения и параметры кривой упрочнения материала проволоки (прутка). Поэтому представляет интерес сравнение критерия Δ при фиксированном угле волочения α и критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ с учетом модели упрочнения и напряжения противонапряжения.

Цель работы — определить аналитические зависимости для расчета критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$, учитывающие модель упрочнения и напряжение противонапряжения, и оценить характер влияния параметров процесса волочения на значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$.

Принятые модели упрочнения материала проволоки (прутка)

Приняли следующие модели упрочнения:

$$\sigma_T = 340\mu^{1,37}; \quad (9)$$

$$\sigma_T = 340 + 950(\ln\mu)^{0,37}; \quad (10)$$

$$\sigma_T = 340 \text{ МПа}. \quad (11)$$

Модель упрочнения (10) получена для проволочной заготовки из коррозионно-стойкой стали 12X18H10T при термической обработке по общепринятому заводскому режиму при производстве проволоки из коррозионно-стойких сталей: охлаждение в воде после выдержки при 1050 °С [11]. Для выяснения формы кривой упрочнения при равном исходном пределе $\sigma_{T0} = 340$ МПа приняты модели упрочнения (9) и (11). Эмпирическая зависимость (11) отражает отсутствие деформационного упрочнения. На рис. 1 приведены зависимости предела текучести от коэффициента вытяжки

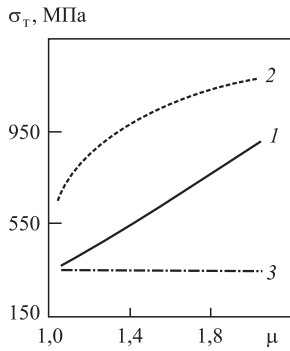


Рис. 1. Зависимости предела текучести σ_T от коэффициента вытяжки μ при модели упрочнения: 1 — (9); 2 — (10); 3 — (11)

μ в интервале его изменения 1,05...2,0. При этом интервале изменения коэффициента μ нижняя и верхняя границы изменения единичного обжатия $r(\delta)$ соответственно равны 0,05 и 0,51.

Кривая 1 отражает почти линейный рост предела текучести σ_T при увеличении от коэффициента вытяжки. Кривая 2 (10) показывает интенсивное упрочнение при малой степени деформации ($\mu < 1,2$). В заданном интервале изменения коэффициента вытяжки предел текучести значительно больше при модели упрочнения (10).

Формулы для расчета оптимальных значений угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ и критерия $\Delta_{\text{опт}}$

В работах [12, 13] предложены при моделях упрочнения (12) и (13) соответствующие формулы (14) и (15) для определения оптимального угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$:

$$\sigma_{\text{ТК}} = \sigma_{\text{Т0}}\mu^k; \tag{12}$$

$$\sigma_{\text{ТК}} = \sigma_{\text{Т0}} + m\varepsilon^n = \sigma_{\text{Т0}} + m(\ln \mu)^n; \tag{13}$$

$$\begin{aligned} \text{tg}\alpha_{\text{опт}}^2 &= \frac{3\sqrt{3}}{2} f \frac{\mu^k - 1}{k(\mu^k + 1)} \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{\text{Т0}}}\right) = \\ &= \frac{f(\mu^k - 1)(1 - \sigma_q/\sigma_{\text{Т0}})}{0,385k(\mu^k + 1)}; \end{aligned} \tag{14}$$

$$\text{tg}^2\alpha_{\text{опт}} = Af(1 - \sigma_q/\sigma_{\text{Т0}})/B, \tag{15}$$

где $A = \sigma_{\text{Т0}} \ln \mu + m(\ln \mu)^{n+1}/(n+1)$;

$B = 2\sqrt{3}\sigma_{\text{Т0}}(2 + m(\ln \mu)^n/\sigma_{\text{Т0}})/9$;

$\sigma_{\text{Т0}}$, $\sigma_{\text{ТК}}$ — предел текучести соответственно на входе и выходе рабочего конуса волокна;

$\varepsilon = \ln \mu$ — степень деформации;

k, m, n — коэффициенты упрочнения при моделях упрочнения (12) и (13);

σ_q — напряжение противонапряжения.

При отсутствии деформационного упрочнения ($k = m = 0$) из формул (14) и (15) следует:

$$\text{tg}\alpha_{\text{опт}}^2 = \frac{3\sqrt{3}}{4} f \ln \mu \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{\text{Т0}}}\right). \tag{16}$$

При модели упрочнения (12) и отсутствии деформационного упрочнения соответственно имеют простые аналитические зависимости (17) и (18) для расчета оптимального значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$:

$$\Delta_{\text{опт}} = (1 - 1/\mu)^{-1} (1 + \sqrt{1/\mu})^2 \sqrt{\frac{f(\mu^k - 1)(1 - \sigma_q/\sigma_{\text{Т0}})}{0,385k(\mu^k + 1)}}; \tag{17}$$

$$\Delta_{\text{опт}} = (1 - 1/\mu)^{-1} (1 + \sqrt{1/\mu})^2 \sqrt{\frac{3\sqrt{3}}{4} f \ln \mu \left(1 - \frac{\sigma_q}{\sigma_{\text{Т0}}}\right)}. \tag{18}$$

Формулы (17) и (18) получены при принятии приближенного равенства $\alpha \approx \text{tg}\alpha$. При модели упрочнения (13) оптимальное значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ рассчитывается по формуле (1), в которой значение угла α определяется зависимостью (15).

Аналитические зависимости для расчета напряженного состояния и запаса прочности материала проволоки (прутка)

Напряжение волочения σ_z рассчитывали по формуле

$$\sigma_z = \sigma_{z1} + \sigma_{zq} + \sigma_{Cd}, \tag{19}$$

где σ_{z1} — прирост осевого напряжения в рабочем конусе;

σ_{zq} — прирост от действия напряжения противонапряжения σ_q ;

σ_{Cd} — прирост напряжения на деформацию сдвига металла.

Составляющие формулы (19) при моделях упрочнения (12) и (13) определяются соответствующими зависимостями [14, 15]:

$$\sigma_{z1} = \frac{\sigma_{\text{Т0}}}{k} (\mu^k - 1)(1 + f/\text{tg}\alpha); \tag{20}$$

$$\sigma_{z1} = \left[\sigma_{\text{Т0}} \ln \mu + \frac{m}{n+1} (\ln \mu)^{n+1} \right] (1 + f/\text{tg}\alpha); \tag{21}$$

$$\sigma_{zq} = \sigma_q \left[1 - \frac{f(\mu^k - 1)}{k \text{tg}\alpha} \right]; \tag{22}$$

$$\sigma_{zq} = \sigma_q \left[1 - \frac{f}{\text{tg}\alpha} \left(\ln \mu + \frac{m(\ln \mu)^{n+1}}{\sigma_{\text{Т0}}(n+1)} \right) \right]; \tag{23}$$

$$\sigma_{Cd} = \frac{2\sigma_{\text{Т0}}\text{tg}\alpha(1 + \mu^k)}{3\sqrt{3}}; \tag{24}$$

$$\sigma_{Cd} = \frac{2\text{tg}\alpha(2\sigma_{\text{Т0}} + m(\ln \mu)^n)}{3\sqrt{3}}. \tag{25}$$

При отсутствии деформационного упрочнения ($k = m = 0$) из формул (20) и (21) следует зависимость:

$$\sigma_{z1} = \sigma_{T0} \ln \mu (1 + f / \operatorname{tg} \alpha),$$

которая отличается от формулы Зибеля только значением предела текучести: в формуле Зибеля используется среднее значение предела текучести σ_T в очаге пластической деформации.

Формулы (22) и (23) для расчета прироста осевого напряжения от действия противонапряжения при отсутствии упрочнения определяют уравнение:

$$\sigma_{zq} = \sigma_q (1 - f \ln \mu / \operatorname{tg} \alpha). \quad (26)$$

Вторая упрощенная формула И.Л. Перлина [2] для расчета напряжения волочения включает выражение (26), но только с приведенным значением угла $\alpha_{\text{пр}}$ волочения [16].

Коэффициент запаса прочности по И.Л. Перлину равен [2]

$$\gamma = \sigma_{\text{ТК}} / \sigma_z. \quad (27)$$

Значение коэффициента запаса прочности $\gamma = 1$ принимается предельным, так как велика вероятность разрушения материала проволоки (прутка). Поэтому авторы работы [2] в зависимости от механических свойств материала рекомендуют осуществлять процесс волочения при коэффициенте запаса $\gamma > 1,4$.

Показатель напряженного состояния определяли по формуле В.Л. Колмогорова [17]:

$$k_\sigma = \sigma / T, \quad (28)$$

где σ — среднее нормальное напряжение;

T — интенсивность касательных напряжений.

При предельном значении показателя $k_\sigma = 0,58$ коэффициент запаса прочности $\gamma = 1$ [2, 18].

Результаты расчетов и их анализ

На рис. 2 для принятых моделей упрочнения приведены результаты расчета оптимального угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ в зависимости от коэффициента вытяжки при коэффициентах трения 0,05 и 0,15, напряжениях противонапряжения $\sigma_q = 0$ и $\sigma_q = 0,25\sigma_{T0} = 85$ МПа.

Данные рис. 2 указывают на близость значений угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ для моделей упрочнения (9) и (11), особенно при $\mu < 1,5$. Эта близость проявляется в зависимости от критерия $\Delta_{\text{опт}}$ (рис. 3, а, б, рис. 4, а, б) от коэффициента вытяжки для этих моделей упрочнения. Для коррозионно-стойкой стали 12Х18Н10Т (10) угол $\alpha_{\text{опт}}$ заметно больше

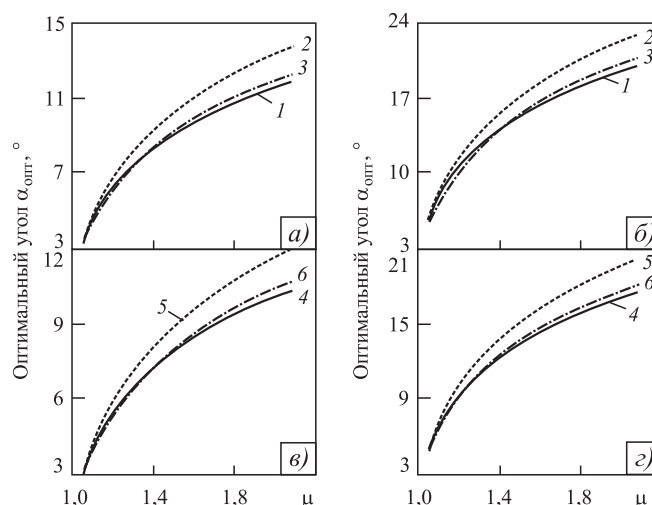


Рис. 2. Значение оптимального угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ в зависимости от коэффициента вытяжки:

а, б — $\sigma_q = 0$; в, г — $\sigma_q = 85$ МПа; а, в — $f = 0,05$; б, г — $f = 0,15$; 1, 4 — модель упрочнения (9); 2, 5 — модель (10); 3, 6 — модель (11)

(кривые 2 и 5). Кривые рис. 2 подтверждают известные положения, что значение оптимального угла $\alpha_{\text{опт}}$ увеличивается с ростом коэффициентов вытяжки и трения и уменьшением напряжения противонапряжения.

На рис. 3 и 4 для принятых моделей упрочнения (9)—(11) приведены зависимости от коэффициента вытяжки для критерия Δ формы очага деформации (а, б), напряжения волочения σ_z (в, г), коэффициента запаса прочности γ (д, е), показателя напряженного состояния k_σ (ж, з) при отсутствии противонапряжения и напряжении противонапряжения $\sigma_q = 85$ МПа. Данные рис. 3 получены при коэффициенте трения 0,05, данные рис. 4 — при $f = 0,15$. Расчеты выполнены при $\alpha = 8^\circ$ (кривые 1—3) и $\alpha_{\text{опт}}$ (кривые 4—6). Значение коэффициента вытяжки варьировали в интервале 1,05...2,1.

В формуле (1) для расчета критерия Δ отсутствует коэффициент трения, напряжение противонапряжения и параметры кривой упрочнения. Поэтому кривые 1—3 при $\alpha = 8^\circ$ лежат вдоль одной кривой на рис. 3, а, б и рис. 4, а, б. Кривые 4—6 при $\alpha_{\text{опт}}$, в отличие от кривых 1—3, дополнительно определяются моделью упрочнения, коэффициентом трения и напряжением противонапряжения. При модели упрочнения (10) больше значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ (кривые 5). При коэффициенте вытяжки $\mu < 1,3$ кривые 4 и 6 для критерия $\Delta_{\text{опт}}$ слились при коэффициенте трения 0,05 (см. рис. 3, а, б) и коэффициенте 0,15 (см. рис. 4, а, б). Наибольшее расстояние между кривыми 1—3 и кривыми 4—6 при малых значениях коэффициента вытяжки

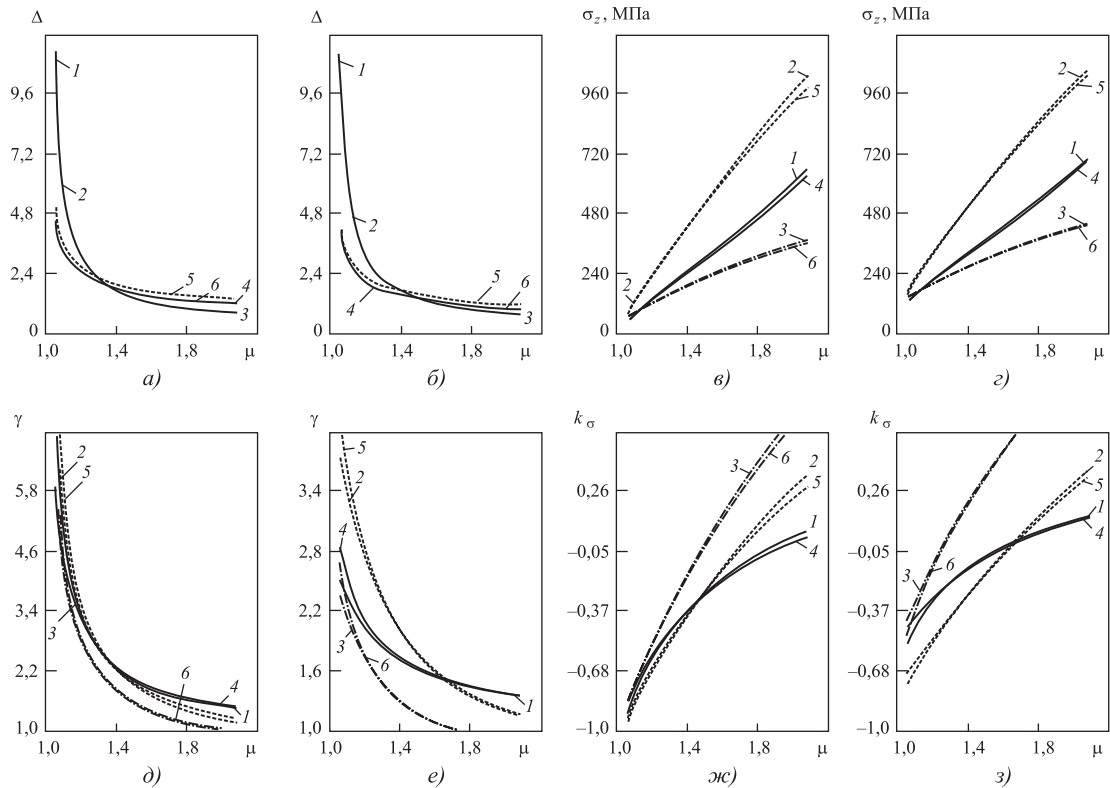


Рис. 3. Показатели деформации в зависимости от коэффициента вытяжки при коэффициенте трения 0,05:
а, в, д, ж — $\sigma_q = 0$; *б, г, е, з* — $\sigma_q = 0,25\sigma_{T0} = 85$ МПа; *1, 2, 3* — $\alpha = 8^\circ$; *4, 5, 6* — α_{opt} ; *1, 4* — модель упрочнения (9); *2, 5* — модель (10); *3, 6* — модель (11)

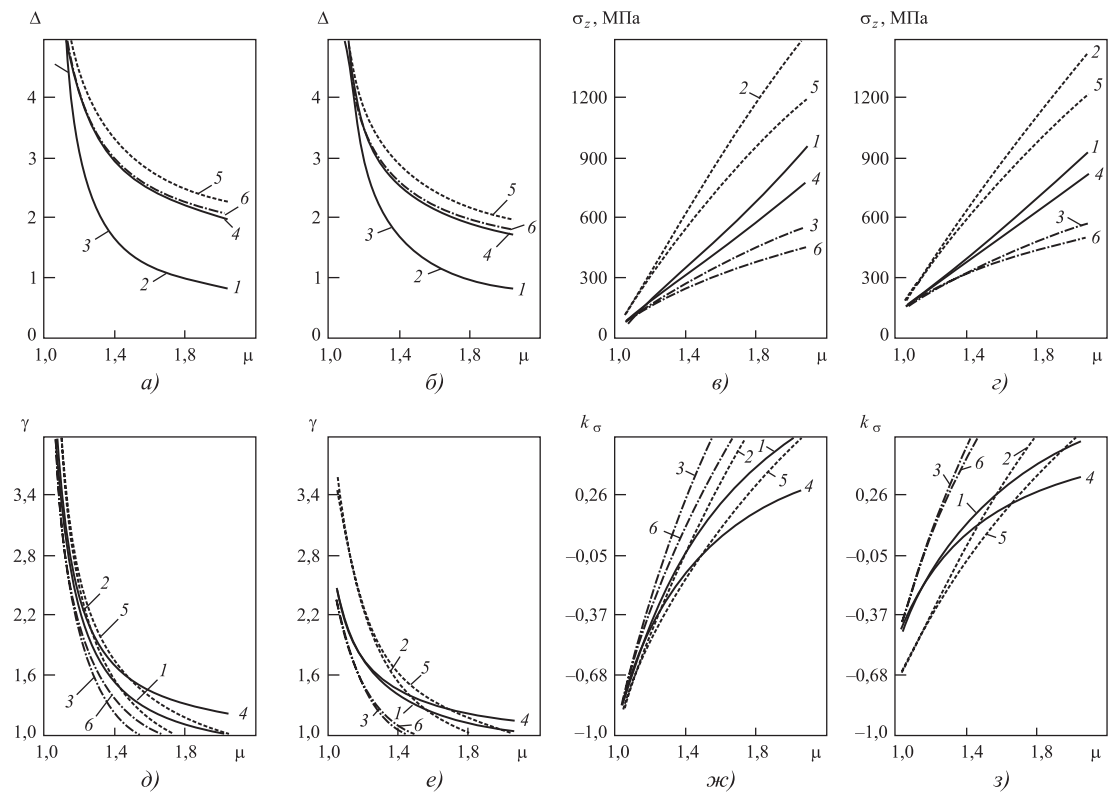


Рис. 4. Показатели деформации в зависимости от коэффициента вытяжки при коэффициенте трения 0,15:
а, в, д, ж — $\sigma_q = 0$; *б, г, е, з* — $\sigma_q = 0,25\sigma_{T0} = 85$ МПа; *1, 2, 3* — $\alpha = 8^\circ$; *4, 5, 6* — α_{opt} ; *1, 4* — модель упрочнения (9); *2, 5* — модель (10); *3, 6* — модель (11)

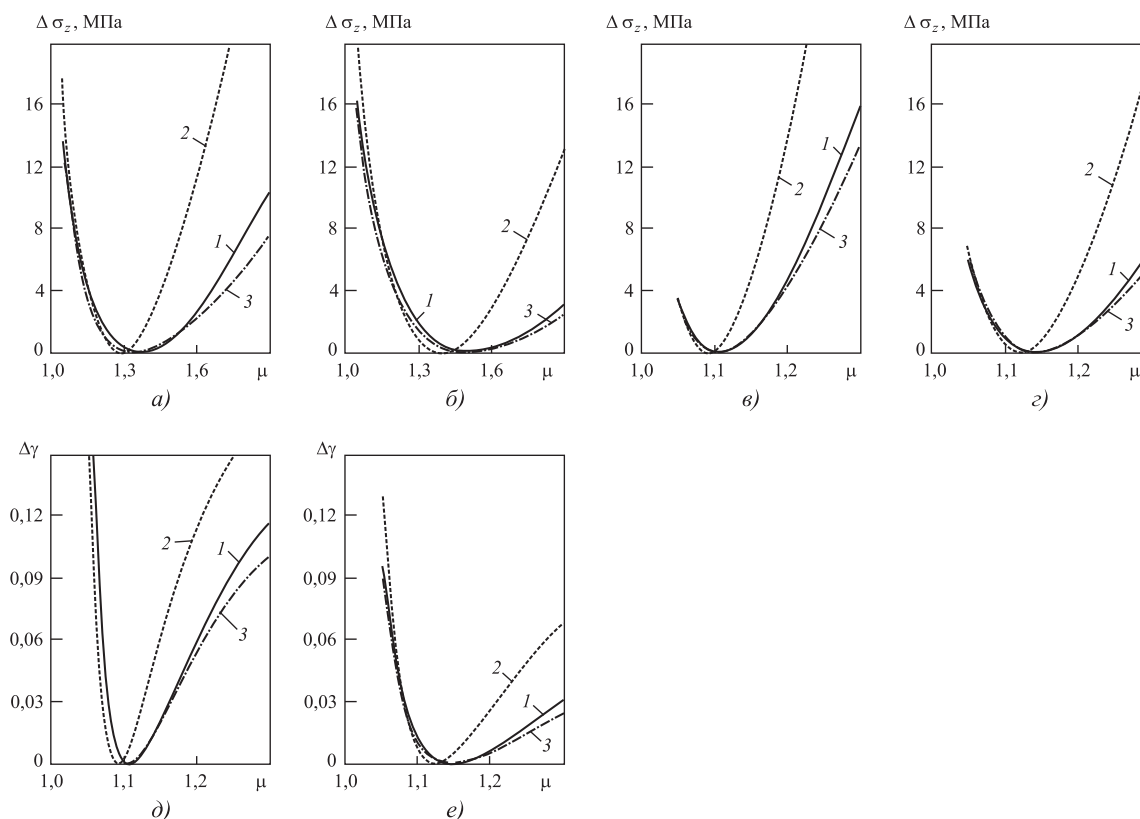


Рис. 5. Разности для напряжения $\Delta\sigma_z$ (31) и коэффициента запаса прочности $\Delta\gamma$ (32) в зависимости от коэффициента вытяжки:
a, б — $f = 0,05$; *в–е* — $f = 0,15$; *a, в, д* — $\sigma_q = 0$; *б, г, е* — $\sigma_q = 85$ МПа; *1* — модель упрочнения (9); *2* — модель (10); *3* — модель (11)

($\mu < 1,15$), так как значение угла $\alpha = 8^\circ$ значительно больше $\alpha_{\text{опт}}$ при коэффициентах трения 0,05 и 0,15 (см. рис. 2). Из сравнения соответствующих данных на рис. 3, *a, б* и рис. 4, *a, б* следует увеличение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при изменении коэффициента трения от 0,05 до 0,15.

Напряжение волочения σ_z значительно больше при модели упрочнения (10), что показывают кривые 2 и 5 соответственно при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$. Кривые для напряжения волочения σ_z при угле $\alpha_{\text{опт}}$ находятся ниже соответствующих кривых при $\alpha = 8^\circ$. При коэффициенте трения 0,05 (см. рис. 3, *в, г*) расстояние между соответствующими линиями при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$ меньше, чем при коэффициенте $f = 0,15$ (см. рис. 4, *в, г*). С увеличением коэффициента вытяжки соответствующие линии при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$ сближаются и пересекаются при определенном значении коэффициента μ . После пересечения эти линии с повышением коэффициента вытяжки снова расходятся, что показано на рис. 5, *a–г*. При коэффициенте трения 0,05 от приложения напряжения противонапряжения увеличивается напряжение волочения σ_z при принятых моделях упрочнения на всем интервале из-

менения коэффициента вытяжки. При $f = 0,15$, $\alpha = 8^\circ$ и $\mu > 1,8$ (см. рис. 4, *в, г*) наблюдается уменьшение напряжения волочения σ_z при моделях упрочнения (9) и (10), что показывают кривые 1 и 2. Это согласуется с результатами расчетов [19, 20], которые предусматривают возможность уменьшения напряжения волочения σ_z при повышенных значениях коэффициентов вытяжки и трения и небольшом угле волочения.

При коэффициенте трения 0,05 ось абсцисс пересекают кривые 3 и 6 (рис. 3, *д, е*) для модели упрочнения (11). От действия противонапряжения точки пересечения кривых 3 и 6 с абсциссой существенно сдвигаются в сторону уменьшения коэффициента вытяжки. При моделях упрочнения (9) и (10) коэффициент запаса прочности $\gamma > 1$ в заданном интервале изменения коэффициента вытяжки (см. рис. 3, *д, е* кривые 1, 2, 4, 5). Необходимо обратить внимание на пересечение линий при моделях упрочнения (9) и (10). При высоких степенях деформации коэффициент γ становится больше при модели (9). Все кривые кроме кривой 4 при модели (9) и угле $\alpha_{\text{опт}}$ пересекают ось абсцисс при коэффициенте трения 0,15 (см. рис. 4, *д, е*).

От действия противонапряжения значение коэффициента γ существенно уменьшилось при малых значениях коэффициента вытяжки ($\mu < 1,15$).

Верхняя горизонтальная линия графиков для показателя напряженного состояния k_σ проведена при ординате 0,58, т.е. при предельном значении показателя k_σ . Поэтому абсциссы точек пересечения, например, кривых 3 и б с верхней линией графика рис. 3, ж, совпадают с абсциссами точек пересечения кривых 3 и б с абсциссой рис. 3, д для коэффициента запаса прочности γ . Здесь необходимо отметить связь между коэффициентом запаса прочности γ и показателем напряженного состояния k_σ [21, 22]:

$$k_\sigma = \frac{3 - 2\gamma}{\sqrt{3}\gamma}; \quad (29)$$

$$\gamma = \frac{3}{\sqrt{3}k_\sigma + 2}. \quad (30)$$

Наличие связи между коэффициентом γ и показателем k_σ показывает, например, расположение кривых на рис. 4, е, з: равны абсциссы соответствующих точек пересечения кривых на рис. 4, е, з. При отсутствии деформационного упрочнения (кривые 3 и б) больше значение показателя k_σ , что не способствует обеспечению повышенных степеней деформации в проходе волочения без разрушения материала проволоки (прутка).

Данные рис. 3 и 4 не позволяют точно оценить координаты точек пересечения кривых при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$. Поэтому определили разности для напряжения волочения σ_z и коэффициента γ запаса прочности:

$$\Delta\sigma_z = \sigma_z - \sigma_z(\alpha_{\text{опт}}); \quad (31)$$

$$\Delta\gamma = \gamma(\alpha_{\text{опт}}) - \gamma, \quad (32)$$

где σ_z, γ — соответственно напряжение волочения и коэффициент запаса прочности при $\alpha = 8^\circ$.

При нулевой разности $\Delta\sigma_z = 0$ и $\Delta\gamma = 0$ определяются абсциссы точек пересечения двух линий для каждой модели упрочнения при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$.

На рис. 5, а—г приведены разности $\Delta\sigma_z$ для напряжения волочения (31), а на рис. 5, д, е — разности $\Delta\gamma$ (32) для коэффициента запаса прочности в зависимости от коэффициента вытяжки при отсутствии и наличии противонапряжения. Разности $\Delta\sigma_z$ для напряжения построены при коэффициентах трения 0,05 и 0,15, разности $\Delta\gamma$ для коэффициента запаса при коэффициенте трения 0,15.

Данные рис. 5 показывают уменьшение абсциссы точки пересечения при увеличении коэффициента трения от 0,05 до 0,15. Противона-

тяжение действует в противоположном направлении, увеличивая абсциссу точки пересечения. При модели упрочнения (10) точка пересечения кривых при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$ соответствует меньшему значению коэффициента вытяжки. Абсциссы точек пересечения при моделях упрочнения (9) и (11) существенно не отличаются.

Данные рис. 3 и 4 не позволяют численно оценить степень различия критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$, особенно при моделях упрочнения (9) и (11). Поэтому при принятых моделях упрочнения (9)—(11), оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$ и напряжении противонапряжения $\sigma_q = 0$ и 85 МПа вычислили значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$ в зависимости от коэффициента трения f (таблица).

При оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$ значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ уменьшается с ростом коэффициента вытяжки и напряжения противонапряжения, повышается с увеличением коэффициента трения и зависит от модели упрочнения (см. таблицу). Значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ больше при модели упрочнения (10), что показывают данные строк № 5—8.

На рис. 6 показана связь критерия Δ с напряжением волочения σ_z (а—г), коэффициентом запаса

Критерий $\Delta_{\text{опт}}$ при $\alpha_{\text{опт}}$ в зависимости от коэффициента трения f при моделях упрочнения (9)—(11)

| № п/п | σ_q , МПа | μ | Значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при f | | | | | | |
|-------|------------------|-------|---|-------|------|-------|------|------|------|
| | | | 0,015 | 0,030 | 0,05 | 0,075 | 0,15 | 0,30 | 0,50 |
| 1 | 0 | 1,15 | 1,52 | 2,15 | 2,77 | 3,27 | 4,65 | 6,54 | 8,36 |
| 2 | 85 | | 1,32 | 1,86 | 2,40 | 2,84 | 4,03 | 5,69 | 7,29 |
| 3 | 0 | 1,35 | 1,03 | 1,46 | 1,88 | 2,21 | 3,13 | 4,36 | 5,51 |
| 4 | 85 | | 0,90 | 1,26 | 1,63 | 1,92 | 2,72 | 3,81 | 4,84 |
| 5 | 0 | 1,15 | 1,66 | 2,34 | 3,02 | 3,57 | 5,06 | 7,11 | 9,07 |
| 6 | 85 | | 1,44 | 2,03 | 2,62 | 3,09 | 4,39 | 6,19 | 7,92 |
| 7 | 0 | 1,35 | 1,15 | 1,62 | 2,08 | 2,46 | 3,46 | 4,87 | 6,05 |
| 8 | 85 | | 1,00 | 1,40 | 1,81 | 2,13 | 3,01 | 4,21 | 5,33 |
| 9 | 0 | 1,15 | 1,53 | 2,15 | 2,78 | 3,28 | 4,66 | 6,55 | 8,37 |
| 10 | 85 | | 1,32 | 1,87 | 2,41 | 2,84 | 4,04 | 5,70 | 4,00 |
| 11 | 0 | 1,35 | 1,04 | 1,47 | 1,89 | 2,23 | 3,15 | 4,39 | 5,55 |
| 12 | 85 | | 0,90 | 1,27 | 1,64 | 1,94 | 2,74 | 3,84 | 4,87 |

Примечание. № 1—4 — модель упрочнения (9); № 5—8 — модель (10); № 9—12 — модель (11).

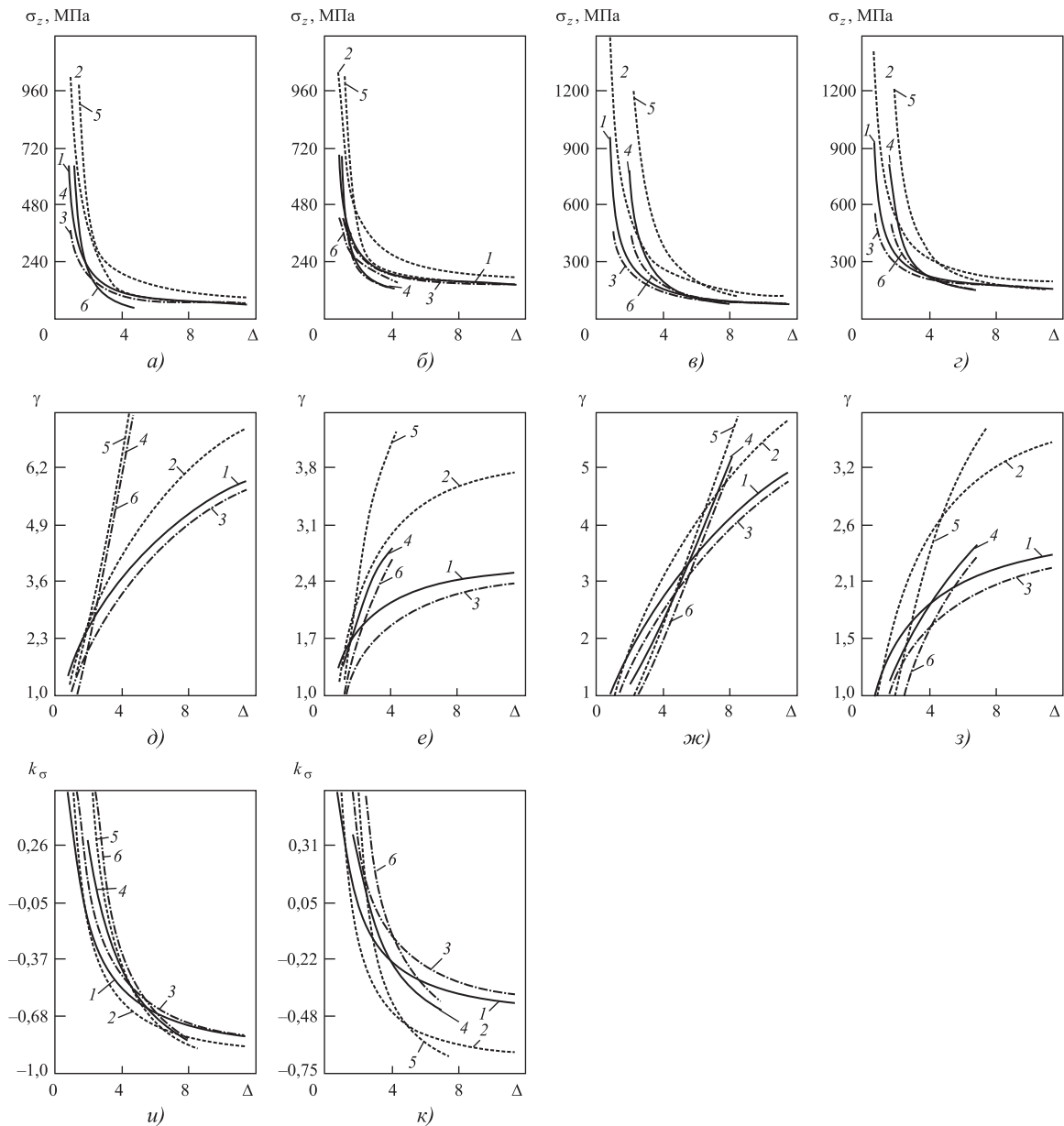


Рис. 6. Характер связи критерия Δ с напряжением волочения σ_z (а–д), коэффициентом запаса прочности γ (д–з) и показателем напряженного состояния k_σ (и, к):

а, б, д, е – $f = 0,05$; в, з, ж...к – $f = 0,15$; а, в, д, ж, и – $\sigma_q = 0$; б, з, е, з, и – $\sigma_q = 85$ МПа; 1, 2, 3 – $\alpha = 8^\circ$; 4, 5, 6 – $\alpha_{\text{опт}}$; 1, 4 – модель упрочнения (9); 2, 5 – модель (10); 3, 6 – модель (11)

са прочности γ (д–з) и показателем напряженного состояния k_σ (и, к) при принятых моделях упрочнения, отсутствии и наличии противонапряжения и коэффициентах трения 0,05 и 0,15. Зависимости построены при варьировании коэффициента вытяжки в интервале 1,05...2,1, как и зависимости на рис. 2–4. Левый конец каждой кривой вычислен при коэффициенте вытяжки 2,1, а правый — при коэффициенте вытяжки 1,05.

Зависимости для напряжения волочения σ_z (а–д) показывают его уменьшение с увеличением критерия Δ . Кривые 2 и 5 при модели упрочнения

(10) показывают более высокие значения напряжения σ_z , что согласуется с результатами расчетов напряжения при коэффициенте трения 0,05 (см. рис. 3, в, з) и коэффициенте 0,15 (см. рис. 4, в, з). Кривые 1–3 при $\alpha = 8^\circ$ имеют более широкий интервал изменения критерия Δ . На рис. 3, а, б и рис. 4, а, б кривые 1–3 для критерия Δ совпали и изменяются при более высоких значениях критерия, чем кривые 4–6 при оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$. Концы кривых 1–3 имеют одинаковые абсциссы — значения критерия Δ как для напряжения σ_z (а–д), так и коэффициента γ (д–з) и по-

казателя k_{σ} (μ , κ). При оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ правый конец кривых 5 для исследуемых показателей (σ_z , γ , k_{σ}) соответствует большему значению критерия Δ . Необходимо отметить пересечение линий при $\alpha = 8^\circ$ и $\alpha_{\text{опт}}$ для каждой модели упрочнения. Это объясняется тем, что оптимальное значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ меньше, больше и равно 8° . Точки пересечения линий при каждой модели имеют разные координаты. Например, кривые 2 и 5 при модели упрочнения (10) для исследуемых показателей пересекаются при большем значении критерия Δ . Причем координаты точек пересечения соответствующих линий также зависят от параметров деформации. Например, при коэффициенте трения 0,15 точки пересечения кривых 2 и 5 находятся правее (при большем значении критерия Δ), чем при коэффициенте трения 0,05. Это следует из сравнения соответствующих зависимостей на рис. 6, а, в при отсутствии противонапряжения и на рис. 6, б, г при напряжении противонапряжения 85 МПа.

Для коэффициента запаса прочности γ при коэффициенте трения 0,05 левые концы кривых 3 и 6 пересекают ось абсцисс (см. рис. 6, д, е). При коэффициенте трения 0,15 (см. рис. 6, ж, з) левые концы кривых пересекают все кривые, кроме кривой 4, для модели (9). Точки пересечения кривых с абсциссой фиксируют предельное значение критерия Δ при разных моделях упрочнения и параметрах деформации. При отсутствии противонапряжения и коэффициенте трения 0,05 (см. рис. 6, д) предельное значение критерия $\Delta = 0,86$ при $\alpha = 8^\circ$ и 1,24 при оптимальной угле $\alpha_{\text{опт}}$. В этом случае предельное значение коэффициента вытяжки равно 1,93 при $\alpha = 8^\circ$ и 1,97 при $\alpha_{\text{опт}} = 11,8^\circ$. При напряжении противонапряжения $\sigma_q = 85$ МПа (см. рис. 6, е) предельное значение $\Delta = 1,11$ при $\alpha = 8^\circ$ и 1,24 при $\alpha_{\text{опт}} = 8,9^\circ$.

При коэффициенте трения 0,15 кривая 1 при $\alpha = 8^\circ$ и модели упрочнения (9) показывает наименьшее предельное значение критерия Δ (см. рис. 6, ж, з). При модели (11) и оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ больше предельное значение критерия Δ (кривая б). Например, при отсутствии противонапряжения (см. рис. 6, ж) кривая 1 фиксирует наименьшее значение критерия 0,83, а кривая б — наибольшее значение 2,40. Разные значения критерия Δ обеспечиваются варьированием коэффициента вытяжки от 1,05 до 2,1, поэтому при определенных значениях μ и соответствующих значениях критерия Δ коэффициент $\gamma = 1$. На рис. 3, д, е и рис. 4, д, е показаны предельные значения коэффициента вытяжки. На рис. 4, д, е кривая 4 показывает отсутствие предельного значения коэффициента вытяжки. В работе [7] отмечено, что при волочении проволоки значение Δ часто находится в области значения 1,5. При этом не указывается материал проволоки, ее механические свойства и параметры деформирования. Вычисленные предельные значения критерия Δ (см. рис. 6, д–к) в зависимости от моделей упрочнения и параметров деформации меньше и больше 1,5, т.е. значение 1,5 критерия Δ не гарантирует надежность процесса волочения проволоки без ее разрушения. Следовательно, критерии Δ при фиксированном угле α и оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ не могут использоваться для прогнозирования обрыва проволоки.

Абсциссы точек пересечения кривых для показателя напряженного состояния k_{σ} (ж, з) с верхней горизонтальной линией, проходящей через ординату 0,58, также определяют предельные значения критерия Δ . При действии противонапряжения (з) больше показатель k_{σ} , чем при его отсутствии (ж).

На рис. 7 показана связь оптимального значения угла $\alpha_{\text{опт}}$ с коэффициентом вытяжки μ (кри-

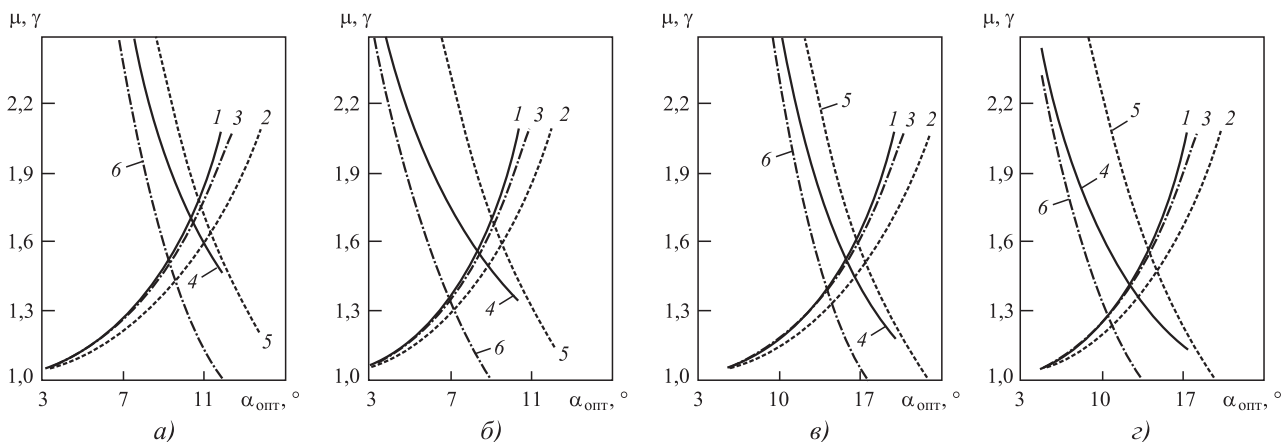


Рис. 7. Связь оптимального угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ с коэффициентом вытяжки μ и коэффициентом запаса прочности γ : а, б — $f = 0,05$; в, з — $f = 0,15$; а, в — $\sigma_q = 0$; в, з — $\sigma_q = 85$ МПа; 1–3 — коэффициент вытяжки μ ; 4–6 — коэффициент запаса γ ; 1, 4 — модель упрочнения (9); 2, 5 — модель (10); 3, 6 — модель (11)

вые 1–3) и коэффициентом запаса прочности γ (кривые 4–6) при принятых моделях упрочнения и коэффициентах трения 0,05 и 0,15. Напряжение противонапряжения $\sigma_q = 0$ и 85 МПа.

При увеличении $\alpha_{\text{опт}}$ повышается коэффициент вытяжки и уменьшается коэффициент запаса γ . При коэффициенте трения 0,05 и модели упрочнения (11) кривая 6 пересекает ось абсцисс, проходящую при коэффициенте $\gamma = 1$ (см. рис. 7, а, б). Кривые 5 и 6 фиксируют предельное значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ на оси абсцисс при коэффициенте трения 0,15 (см. рис. 7, в, г). Из сравнения рис. 7, а и б при коэффициенте трения 0,05, рис. 7, в и г при коэффициенте трения 0,15 следует уменьшение предельного значения угла $\alpha_{\text{опт}}$

от действия противонапряжения. Кривые 1–3 для коэффициента вытяжки от приложения противонапряжения сдвинулись в сторону уменьшения оптимального значения $\alpha_{\text{опт}}$. При фиксированном угле $\alpha_{\text{опт}}$ коэффициент вытяжки меньше при модели (10), что показывает кривая 2. При заданном значении коэффициента вытяжки значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ больше при модели (10). Значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ увеличилось при изменении коэффициента трения от 0,05 до 0,15 при фиксированных значениях μ и γ (в, г). Кривая 4 при модели (9), как на рис. 4, д, е и рис. 6, ж, з, не пересекает ось абсцисс при ординате $\gamma = 1$. Предельное значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ (при $\gamma = 1$) больше при модели упрочнения (10), что показывает кривая 5. Необходимо отметить непрерывное уменьшение коэффициента γ и одно предельное значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ для каждой модели упрочнения. При постоянном коэффициенте вытяжки кривая для коэффициента γ в зависимости от угла α имеет максимум при $\alpha_{\text{опт}}$. При этом обычно эта кривая не пересекает ось абсцисс или пересекает ее при пониженном значении угла α . При повышенных значениях коэффициентов вытяжки и трения кривая дважды пересекает ось абсцисс, фиксируя два предельных значения угла волочения α [23].

На рис. 8, а, б приведены зависимости оптимального значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$ от коэффициента вытяжки, построенные на основе формул (7) и (8) зарубежных исследователей и предложенного уравнения (18), при коэффициентах трения 0,05 (а) и 0,15 (б) и отсутствии противонапряжения. На рис. 8, в дана оценка степени расхождения значений критерия $\Delta_{\text{опт}}$, %, по разным формулам при коэффициенте трения 0,05, т.е. по данным рис. 8, а:

$$\delta_1 = \frac{100(\Delta_{\text{опт}}(18) - \Delta_{\text{опт}}(7))}{\Delta_{\text{опт}}(18)}; \quad (33)$$

$$\delta_2 = \frac{100(\Delta_{\text{опт}}(18) - \Delta_{\text{опт}}(8))}{\Delta_{\text{опт}}(18)}; \quad (34)$$

где $\Delta_{\text{опт}}(7)$, $\Delta_{\text{опт}}(8)$, $\Delta_{\text{опт}}(18)$ — оптимальные значения критерия соответственно по формулам (7), (8) и (18).

Зависимости на рис. 8, г определяют расхождение значений критерия $\Delta_{\text{опт}}$ по предложенным формулам при принятых моделях упрочнения (9)–(11) и коэффициенте трения 0,05:

$$\delta_3 = \frac{100(\Delta_{\text{опт}}(10) - \Delta_{\text{опт}}(9))}{\Delta_{\text{опт}}(10)}; \quad (35)$$

$$\delta_4 = \frac{100(\Delta_{\text{опт}}(10) - \Delta_{\text{опт}}(11))}{\Delta_{\text{опт}}(10)}; \quad (36)$$

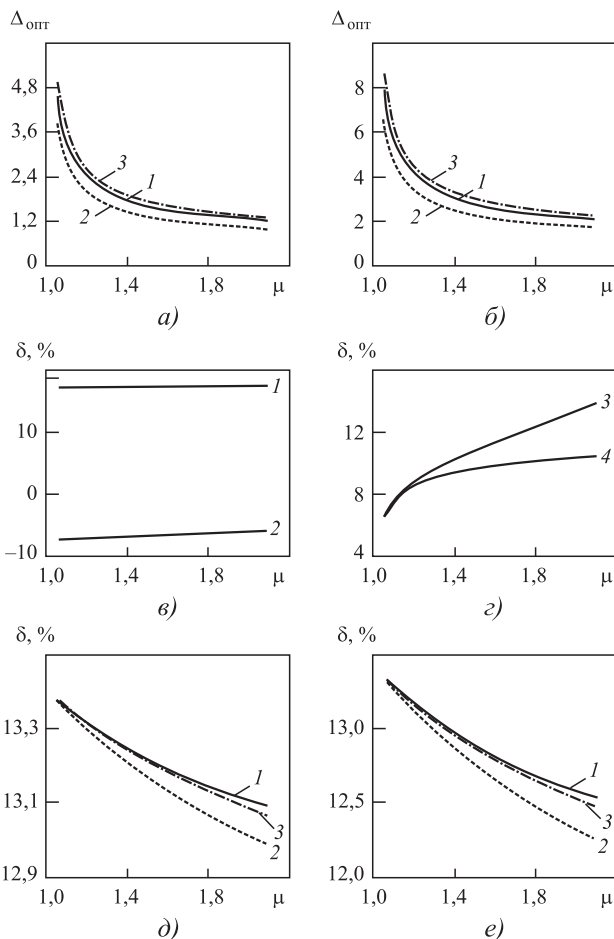


Рис. 8. Оптимальное значение критерия Δ и разница δ значений критерия в зависимости от коэффициента вытяжки:

а, в, г, д — $f = 0,05$; б, е — $f = 0,15$; 1 — расчет по формуле (18); 2 — расчет по формуле (7); 3 — расчет по формуле (8) для а, б; 1 — δ_1 по формуле (33); 2 — δ_2 по формуле (34) для в; 3 — δ_3 по формуле (35); 4 — δ_4 по формуле (36) для г; 1 — модель упрочнения (9); 2 — модель (10); 3 — модель (11) для δ_5 (37) на рис. 8, д, е

где $\Delta_{\text{опт}}(9)$, $\Delta_{\text{опт}}(10)$, $\Delta_{\text{опт}}(11)$ — оптимальное значение критерия при моделях упрочнения соответственно (9), (10), (11).

Поскольку формулы (7) и (8) не включают напряжение противонапряжения σ_q , то при принятых моделях упрочнения степень влияния напряжения противонапряжения σ_q на критерий $\Delta_{\text{опт}}$ оценили с использованием предложенных соответствующих формул

$$\delta_5 = \frac{100(\Delta_{\text{опт}}(\sigma_q = 0) - \Delta_{\text{опт}}(\sigma_q))}{\Delta_{\text{опт}}(\sigma_q = 0)}, \quad (37)$$

где $\Delta_{\text{опт}}(\sigma_q = 0)$, $\Delta_{\text{опт}}(\sigma_q)$ — оптимальные значения критерия соответственно при отсутствии противонапряжения и напряжении противонапряжения $\sigma_q = 85$ МПа при моделях упрочнения (9)—(11). Показатель δ_5 определили при коэффициентах трения 0,05 (д) и 0,15 (е).

Характер расположения кривых 1—3, построенных на основе формул (7), (8) и (18), одинаковый: эти кривые снижаются с увеличением коэффициента вытяжки. При этом значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ увеличилось при применении коэффициента трения от 0,05 (а) до 0,15 (б). При расчете по формуле (7) значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ меньше, чем по предложенной формуле (18), что следует из сравнения расположения кривых 1 и 2 на рис. 8, а, б. Формула (8) определяет кривую 3, которая выше кривых 1 и 2. Значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$ по формулам (7) и (18) различаются в большей степени, чем значения $\Delta_{\text{опт}}$ по формулам (8) и (18), что показывают кривые 1 и 2 на рис. 8, в. Разница δ_1 по формуле (33) несущественно увеличивается с ростом коэффициента вытяжки (кривая 1). Кривая 2, наоборот, указывает на уменьшение показателя δ_2 (34).

Различие значений критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при моделях упрочнения (9)—(11) усиливается с увеличением коэффициента вытяжки (рис. 8, г). Значение δ_3 по формуле (35) больше (кривая 3), чем аналогичное значение δ_4 по формуле (36) особенно при повышенной степени деформации ($\mu > 1,6$). Из сравнения данных рис. 8, в и г следует близкая степень различия значений критерия $\Delta_{\text{опт}}$ при расчете по формулам (7), (8) и (18) для случая отсутствия деформационного упрочнения и расчете по предложенным соответствующим зависимостям при моделях упрочнения (9)—(11).

Степень влияния напряжения противонапряжения на значение $\Delta_{\text{опт}}$ несколько больше при коэффициенте трения 0,05 (д), чем при коэффициенте трения 0,15 (е). При этом показатель δ_5 (37) незначительно зависит от модели упрочнения. Значение δ_5 при напряжении противонапряжения

$\sigma_q = 0,25\sigma_{T0} = 85$ МПа на рис. 8, д, е указывает на необходимость учета напряжения противонапряжения при расчете критерия $\Delta_{\text{опт}}$.

Выводы

Предложены зависимости (4) и (5) для связи параметров, показателей деформации и критерия Δ формы очага деформации круглого сплошного профиля при коническом канале волокни. Для расчета оптимального значения дельта-критерия предложены формулы (17) и (18). Оптимальный дельта-критерий зависит от параметров деформации и модели упрочнения. Построены кривые для оптимального угла волочения $\alpha_{\text{опт}}$ при варьировании коэффициента вытяжки при разных моделях упрочнения и значениях коэффициента трения и напряжения противонапряжения (см. рис. 2). Приведены зависимости от коэффициента вытяжки для критерия Δ , осевого напряжения, коэффициента запаса прочности И.Л. Перлина и показателя напряженного состояния В.Л. Колмогорова при угле волочения $\alpha = 8^\circ$ и оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ (см. рис. 3, 4). Определены оптимальные значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$ в зависимости от коэффициента трения при разных моделях упрочнения и значениях коэффициента вытяжки и напряжения противонапряжения (см. таблицу). Модель упрочнения в меньшей степени влияет на оптимальное значение дельта-критерия, чем коэффициенты вытяжки и трения и напряжение противонапряжения. Определены значения коэффициента вытяжки, при которых пересекаются для каждой модели упрочнения линии при $\alpha = 8^\circ$ и оптимальном угле $\alpha_{\text{опт}}$ (см. рис. 5). Показана связь критерия Δ с напряжением волочения σ_z , коэффициентом запаса прочности γ и показателем напряженного состояния k_σ при разных моделях упрочнения и параметрах деформации. Впервые показано предельное значение дельта-критерия при $\alpha = 8^\circ$, оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$ и разных моделях упрочнения (см. рис. 6, д—к).

При $\alpha = 8^\circ$ и оптимальном угле волочения $\alpha_{\text{опт}}$ предельное значение критерия $\Delta_{\text{опт}}$ больше при отсутствии деформационного упрочнения. Показана связь $\alpha_{\text{опт}}$ с коэффициентом вытяжки и коэффициентом запаса прочности (см. рис. 7). С увеличением $\alpha_{\text{опт}}$ уменьшается коэффициент запаса прочности и повышается коэффициент вытяжки. Предельное значение угла $\alpha_{\text{опт}}$ (при $\gamma = 1$ и $k_\sigma = 0,58$) меньше при отсутствии деформационного упрочнения. Показаны близкие значения $\Delta_{\text{опт}}$ критерия по разным формулам (см. рис. 8) и необходимость учета модели упрочнения и напря-

жения противонапряжения при расчете значения критерия $\Delta_{\text{опт}}$. Учет критерия $\Delta_{\text{опт}}$ способствует выбору рациональных режимов волочения круглого сплошного профиля.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Губкин С.И.** Пластическая деформация металлов. Т. 3. М.: Metallurgizdat, 1960. 306 с.
2. **Перлин И.Л., Ерманок М.З.** Теория волочения. М.: Metallurgiya, 1971. 447 с.
3. **Тарнавский А.Л.** Эффективность волочения с противонапряжением. М.: Metallurgizdat, 1959. 152 с.
4. **Бэкофен В.** Процессы деформации. Пер. с англ. В.С. Берковского, Ф.И. Рузанова. М.: Metallurgiya, 1977. 288 с.
5. **Wright R.N.** Wire technology process engineering and metallurgy. 2011. 320 p.
6. **Hosford W.F., Caddell R.M.** Metal forming. Mechanics and metallurgy. Cambridge University Press, 2007. 312 p.
7. **Wright R.N.** Workability in extrusion and wire drawing, in workability testing techniques / ed. G.E. Dieter, ASM International, Materials Park, Ohio, 1984. 255 p.
8. **Гурьянов Г.Н.** Критерии для оценки формы очага и неоднородности деформации при волочении сплошного круглого профиля // Механическое оборудование металлургических заводов: Междунар. сб. науч. тр. / под ред. Корчунова А.Г. Вып. 2. Магнитогорск: Изд-во Магнитогорск. гос. техн. ун-та им. Г.И. Носова, 2013. С. 86–96.
9. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Оценка параметров волочения круглого сплошного профиля по критериям формы очага пластической деформации // Сталь. 2015. № 6. С. 48–54.
10. **Гурьянов Г.Н.** Показатели напряженного состояния, запаса прочности и эффективности формоизменения в зависимости от критериев формы очага деформации при разных моделях упрочнения проволоки // Заготовительные производства в машиностроении. 2015. № 11. С. 22–35.
11. **Гурьянов Г.Н.** Расчет, анализ напряжений, деформаций и запаса прочности при холодном волочении проволоки. Магнитогорск: ГОУ ВПО "МГТУ", 2008. 358 с.
12. **Гурьянов Г.Н.** Методы определения коэффициента трения при волочении круглого сплошного профиля // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2016. Т. 82. № 8. С. 60–68.
13. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Оценка прироста осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волокна при разных параметрах и моделях упрочнения проволоки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2018. Т. 14. № 9. С. 387–399.
14. **Гурьянов Г.Н., Зуев Б.М.** Расчет осевого напряжения для формоизменения проволоки и преодоления силы трения // Сталь. 2015. № 4. С. 48–54.
15. **Гурьянов Г.Н.** Показатели напряженного состояния и запаса прочности в рабочем конусе и калибрующем пояске волокна в зависимости от параметров деформации и моделей упрочнения материала проволоки // Производство проката. 2016. № 4. С. 26–37.
16. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Сравнительная оценка показателей деформации при расчете с применением действительного угла волочения и приведенного угла И.Л. Перлина при разных моделях упрочнения материала проволоки // Производство проката. 2018. № 11. С. 10–24.
17. **Колмогоров В.Л.** Механика обработки металлов давлением: учебник для вузов. 2-е изд. Екатеринбург: Изд-во УГТУ — УПИ, 2001. 836 с.
18. **Богатов А.А., Мижирицкий О.И., Смирнов С.В.** Ресурс пластичности металлов при обработке металлов давлением. М.: Metallurgiya, 1984. 144 с.
19. **Гурьянов Г.Н.** Приrost осевого напряжения в рабочем конусе и калибрующем пояске волокна от контактного трения при разных параметрах деформации и моделях упрочнения материала проволоки // Сборка в машиностроении, приборостроении. 2016. № 8. С. 32–44.
20. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Условия для волочения круглого сплошного профиля без прироста осевого напряжения от действия противонапряжения // Технологии металлов. 2018. № 9. С. 3–13.
21. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Комбинированные графики для анализа характера связей между параметрами и показателями деформации и выбора оптимального режима волочения проволоки // Производство проката. 2018. № 6. С. 23–34.
22. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Характер взаимосвязи между расчетными показателями деформации при разных моделях упрочнения материала проволоки // Технологии металлов. 2019. № 1. С. 34–46.
23. **Гурьянов Г.Н., Смирнов С.В.** Влияние угла рабочего конуса волокна на осевое напряжение, запас прочности и приrost средней температуры в проходе волочения проволоки // Упрочняющие технологии и покрытия. 2019. Т. 15. № 1. С. 12–20.

От пластического отпечатка при внедрении рабочего инструмента к созданию новых процессов отделочно-упрочняющей обработки

На основе анализа пластического отпечатка рабочего инструмента при упрочнении деталей машин поверхностным пластическим деформированием предложена классификация, позволяющая создавать новые процессы отделочно-упрочняющей обработки. В основу классификации заложены геометрическая форма отпечатка, тип поверхности, протяженность и количество одновременно оставленных отпечатков и др. На основе предложенной классификации разработан ряд новых процессов поверхностного пластического деформирования.

Ключевые слова: классификация, поверхностное пластическое деформирование, отпечаток, след обработки, цилиндрическая деталь.

Classification that allows the creation of new finishing and hardening processes is proposed based on the analysis of the plastic imprint of the working tool during the hardening of machine parts by surface plastic deformation. The classification is based on the geometric shape of the imprint, the type of surface, the length and number of simultaneously left imprints, and more. Number of new processes of surface plastic deformation is developed based on the proposed classification.

Keywords: classification, surface plastic deformation, imprint, machining trace, cylindrical part.

Сущность технологического процесса изготовления деталей машин заключается в получении поверхностей заданных форм и размеров с определенными физико-механическими свойствами [1]. Если процесс резания применяют для получения деталей определенной формы и размеров, то процесс поверхностного пластического деформирования (ППД) используют в основном для обеспечения необходимого качества уже практически готовых изделий. Успешно решить задачу оптимального технологического процесса можно лишь на базе научно обоснованных методик, которые позволили бы найти кинематические схемы обработки данной поверхности и проектировать устройства, реализующие эти схемы.

Понятие о кинематических схемах механической обработки впервые дано в работе Г.И. Грановского [2], в которой на основании комбинирования нескольких простых движений — поступательных и вращательных — представлено более 200 принципиальных кинематических схем резания.

Профессор Е.Г. Коновалов предложил подход к вопросу формообразования поверхностей, учитывая, что поверхность возникает не только в пространстве, но и во времени [3]. Поэтому образующая и направляющая траектории могут

возникать во времени различным образом: прерывисто (кусочно), непрерывно и одновременно (мгновенно).

В работе [4] дана классификация способов упрочняющей обработки поверхностей деталей. Авторы разделяют технологические процессы по скорости деформирования (статические, динамические, комбинированные), по виду трения в контакте инструмента с деталью (трение скольжения, трение качения, трение скольжения с проскальзыванием), по условиям трения в контексте (без смазки, со смазкой), по форме деформирующих тел (шарики, ролики, тела произвольных форм), по связи деформирующих тел с источниками движения (с жесткой связью, с упругой связью, с эластичной связью, по направляющим, несвязанными телами), по способу передачи энергии деформирующим телом (механический, пневматический, гидравлический, электромагнитным полем, взрывной волной, комбинированный).

Ю.Г. Проскуряков разработал классификацию [6] методов упрочняюще-калибрующей и формообразующей обработки металлов. В основе классификации лежат две группы методов обработки. Первая группа характеризуется поверхностной пластической деформацией металла без суще-

ственного изменения формы и размеров обрабатываемых деталей, вторая группа — наличием более глубокой пластической деформации металла, которая может охватить весь объем заготовки и в значительной степени изменить ее форму и размеры.

Л.Г. Одинцов в своей работе [7] начинает классификацию технологических процессов с рассмотрения статических и ударных методов ППД. К статическим относятся методы накатывания, выглаживания и метод однократного обжатия обрабатываемой поверхности без перемещения очагов воздействия. При ударных методах инструмент, рабочие тела или технологическая среда многократно воздействуют на всю обрабатываемую поверхность или на ее часть, при этом сила воздействия в каждом цикле изменяется от нуля до некоторого максимума.

Известны и другие работы [5, 8, 9], внесшие значительный вклад в теорию формообразования поверхностей, однако они далеко не исчерпали всех проблем. Обзор методов ППД и их классификаций позволяет утверждать, что существующие классификации дают представление об известных процессах, типах рабочего инструмента, о видах используемой энергии и др. Но в известных классификациях отсутствует ключ к разработке новых схем технологических процессов ППД, отсутствует алгоритм построения нового процесса упрочняющей обработки.

Необходима научная методика, которая позволяла бы создавать кинематические схемы обработки не путем эмпирического комбинирования различных движений заготовки и инструмента, а исходя из формы заданной поверхности, чтобы возможные схемы обработки были логическим следствием, функцией формы поверхности, а не наоборот [1].

Цель работы — рассмотреть классификацию, которая позволит создавать новые процессы ППД.

Для создания новых процессов ППД необходимо рассмотреть: форму и кинематику рабочего инструмента, вид трения в контакте инструмента с деталью, связь деформирующих тел с источниками движения, способ передачи энергии деформирующим телам, скорость деформирования.

Если в основе классификации поставить задачу не в группировке известных способов упрочнения, видов рабочего инструмента, скорости деформирования, используемой энергии нагружения и других технологических параметров, а задачу по созданию классификации, которая позволит разрабатывать новые технологические схемы обработки, то нужно предложить основной

параметр, с помощью которого эту задачу можно осуществить.

Основная задача первых классификаций механических способов обработки, появившихся около 70 лет назад, заключалась в разработке новых способов формообразования разного вида поверхностей.

При отделочно-упрочняющей обработке ППД необходимо тонким пластическим деформированием обработать уже сформированную поверхность детали. Реально этот процесс осуществляется путем тиражирования по поверхности детали пластических отпечатков. После того как обрабатываемая поверхность детали полностью покрывается пластическими отпечатками, можно считать, что процесс ППД полностью завершен. От количества отпечатков, их формы, условий получения зависит не только состояние поверхностного слоя, но и производительность процесса упрочнения. Таким образом, можно считать, что пластический след от внедрения деформирующего инструмента является ключом для разработки классификации, способствующей созданию новых процессов тонкого деформирования.

В табл. 1 представлено шесть групп, которые являются основой классификации по следу пластического отпечатка.

Первая подгруппа характеризует геометрическую форму отпечатка, вторая — тип поверхности пластического отпечатка, третья — протяженность отпечатка, четвертая — количество одновременно оставленных отпечатков, пятая — скорость деформирования поверхности и шестая — способ деформирования поверхностного слоя. Комбинация представленных в табл. 1 групп и подгрупп позволяет создать около 2000 схем обработки деталей ППД. Даже если некоторые схемы имеют пока чисто теоретическое значение, все же можно предложить несколько сотен реальных схем обработки.

Рассмотрим, каким образом можно реализовать пластические отпечатки, представленные в табл. 1. Отпечатки следа в виде круга и эллипса реализуются при отделочно-упрочняющей обработке обкаткой поверхностей шариком или роликом (табл. 2). Отпечаток в виде полосы формируется при обкатке цилиндрической заготовки плоскими плитами или при обкатке деталей цилиндрическими валками. Отпечаток в виде кольца образуется при деформировании заготовки через матрицу, которая имеет калибрующий цилиндрический участок. При дорновании отверстия участок контакта тоже представляет собой кольцо.

Тип поверхности отпечатка следа тоже влияет на вид технологического процесса обработки.

Таблица 1

Классификация отпечатков при поверхностном пластическом деформировании

| 1. Геометрическая форма отпечатка | | | | | |
|---|----------|-------------|-----------------|---------------|---|
| Круг | Эллипс | Полоса | Кольцо | Сложная форма | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | |
| | | | | | |
| 2. Тип поверхности отпечатка | | | | | |
| Плоская | Вогнутая | Выпуклая | Сложная | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| | | | | | |
| 3. Протяженность отпечатка | | | | | |
| Непрерывный | | | Прерывистый | | |
| 1 | | | 2 | | |
| | | | | | |
| 4. Количество отпечатков при мгновенном воздействии инструмента | | | | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 6 | n |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
| | | | | | |
| 5. Скорость нагружения рабочего инструмента | | | | | |
| Статическое | | | Динамическое | | |
| 1 | | | 2 | | |
| | | | | | |
| 6. Способ деформирования поверхностного слоя | | | | | |
| Вдавливанием | Качением | Скольжением | Комбинированное | | |
| 1 | 2 | 3 | 4 | | |
| | | | | | |

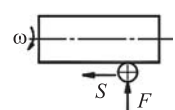
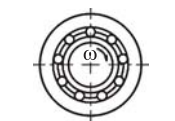
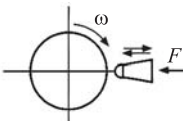
Так, плоский отпечаток образуется при поперечной обкатке цилиндрической заготовки плоскими плитами. Такой же отпечаток может быть получен при обкатке плоской поверхности детали роликом с цилиндрическим профилем контакта. Вогнутая поверхность следа может быть получена на выпуклой поверхности детали при обкатке инструментом с вогнутой рабочей поверхностью.

Таблица 2

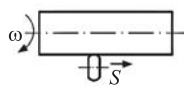
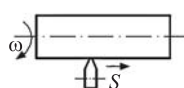
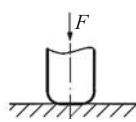
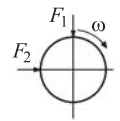
Связь пластических отпечатков с реальными процессами деформирования

| 1. Геометрическая форма отпечатка | | |
|--|---------------------------------|--|
| Вид поверхности отпечатка | Схема технологического процесса | Вид обработки |
| Круг | | Внедрение шара в плоскую поверхность |
| Эллипс | | Внедрение ролика в плоскую поверхность; внедрение шара в криволинейную поверхность |
| Полоса | | Обкатка цилиндрической поверхности плоскими плитами |
| Кольцо | | Взаимодействие дорна с отверстием заготовки |
| Сложная форма | | Взаимодействие матрицы с цилиндрической заготовкой |
| Сложная форма | | Обкатка роликами |
| 2. Тип поверхности отпечатка следа обработки | | |
| Тип поверхности отпечатка | Схема технологического процесса | Вид обработки |
| Плоская | | Поперечная обкатка плоскими плитами |
| Вогнутая | | Обкатка на цилиндрических валках |
| Выпуклая | | Обкатка выпуклых поверхностей |
| Сложная | | Обкатка сложных поверхностей |

Продолжение табл. 2

| 3. Протяженность следа обработки | | |
|--|---|--|
| Вид следа | Схема обработки | Вид обработки |
| Сплошной  |  | Обкатка сплошного цилиндра гладкими плитами |
| Прерывистый  |  | Обкатка ступенчатого вала гладкими плитами |
| 4. Количество отпечатков при мгновенном воздействии инструмента | | |
| Количество отпечатков | Схема нагружения | Вид обработки |
| 1 |  | ППД – рабочим инструментом |
| 2 |  | Обкатка плоскими плитами; обкатка двумя шариками или роликами |
| 3 |  | Обкатка трехроликовым устройством |
| 4 |  | Обкатка на 4-валковой машине |
| n |  | Многошариковые или многороликовые обкатники; дробеударная обработка; дробеструйная обработка; виброударная обработка |
| 5. Скорость нагружения | | |
| Вид скорости нагружения | Схема обработки | Вид обработки |
| Статическая |  | Обкатка шариком, роликом, алмазом, дорнованием |
| Динамическая |  | Виброударное упрочнение, упрочняющая чеканка, центробежная обработка |

Окончание табл. 2

| 6. Способ деформирования поверхностного слоя | | |
|--|---|--|
| Способ деформирования | Схема обработки | Вид обработки |
| Качением |  | Обкатка шариком; обкатка роликом |
| Скольжением |  | Алмазное выглаживание |
| Однократное обжатие |  | Местное пластическое деформирование |
| Комбинированное |  | Обкатывание шариком с проскальзыванием |

Протяженность следа обработки может быть непрерывной (сплошной для обработки конкретной поверхности детали) и прерывистой, например при обкатке ступенчатых деталей.

Большие конструктивные возможности для создания новых конструкций рабочих приспособлений представляет классификация следов по количеству отпечатков при мгновенном воздействии рабочего инструмента на деталь. Силовое воздействие на поверхность детали можно реализовать как одним локальным инструментом, так и при большом их количестве, например обработка дробью или песком (см. табл. 2).

Скорость нагружения рабочего инструмента также активно влияет на конструкцию оборудования для ППД и способ деформирования.

Используя представленную классификацию отделочно-упрочняющей обработки, в основе которой находится след от пластического отпечатка рабочего инструмента, в Иркутском национальном исследовательском техническом университете разработан и запатентован ряд способов и устройств для ППД. Так, например, используя три отпечатка эллипсной формы и статический способ воздействия на обрабатываемую поверхность за счет использования центробежных сил, разработано несколько конструкций центробежных обкатчиков [10–12]. Два плоских непрерывных следа прямоугольной формы реализованы в устрой-

стве для непрерывной обкатки цилиндрических деталей гладкими плитами [13]. Кольцевой след обработки использован для отделочно-упрочняющей обработки длинномерных деталей охватывающим деформированием [14].

Заключение

Предложена новая классификация на основе пластического отпечатка и следа от внедрения рабочего инструмента при поверхностном пластическом деформировании. Анализируя формы пластических отпечатков, тип поверхности и протяженность отпечатков, а также способы нагружения и деформирования, можно создавать новые технологические процессы отделочно-упрочняющей обработки деталей машин.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коновалов Е.Г., Чистосердов П.С., Фломенбит А.И. Ротационная обработка поверхностей с автоматической подачей. Минск: Высшая школа, 1976. 190 с.
2. Грановский Г.И. Кинематика резания. М.: МАШГИЗ, 1947. 112 с.
3. Коновалов Е.Г. Основы новых способов металлообработки. Мн.: Изд-во АН БССР, 1961. 257 с.
4. Рыковский Б.П., Смирнов В.А., Щетинин Г.М. Местное упрочнение деталей поверхностным наклепом. М.: Машиностроение, 1985, 151 с.
5. Сулов А.Г., Гуров Р.В., Тишевых Е.С. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластиче-

ским деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 9. С. 20–22.

6. Проскураков Ю.Г. Технология упрочняюще-калнбрующей обработки металлов. М.: Машиностроение, 1971. 207 с.

7. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: справочник. М.: Машиностроение, 1987. 327 с.

8. Бабичев А.П., Бабичев И.А. Основы вибрационной технологии. Ростов н/Д.: Изд-во ДГТУ, 1999. 620 с.

9. Копылов Ю.Р. Динамика процессов виброударного упрочнения. Воронеж: Научная книга, 2011. 568 с.


10. Пат. 2090343 РФ, МКИ³ В 24 В 39/04. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, Д.А. Журавлев, С.А. Кургузов. № 9610584/31-27; заявл. 28.03.96; опублик. 20.09.97, Бюл. № 26.

11. А. с. 1719191 СССР, МКИ³ В 24 В39/04. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей / С.А. Зайдес, А.К. Скороходов, С.А. Кургузов. № 4806904/27; заявл. 27.03.90; опублик. 15.03.92, Бюл. № 10.

12. Пат. на полезную модель. № 142 561, МКИ³ В 24 В 39/04. Устройство для отделочно-упрочняющей обработки валов центробежного типа / С.А. Зайдес, А.В. Горбунов. № 2013155124/02; заявл. 11.12.2013; опублик. 27.06.2014, Бюл. № 18.

13. Пат. 2600302 РФ, МПК-В21Н 1/18. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами / С.А. Зайдес, Фам Дак Фьонг. Опублик. 20.10.2016, Бюл. № 29.

14. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. 309 с.



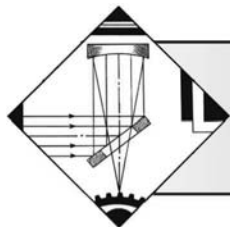
ООО "Издательство "Инновационное машиностроение"
продолжает подписку на журнал

"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

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

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

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



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.9.048

В.И. Иванов

(Федеральный научный агроинженерный центр "ВИМ", г. Москва)

E-mail: tehninvest-vip@mail.ru

О путях повышения эффективности и универсальности электроискрового легирования

Универсальный и эффективный метод электроискрового легирования (ЭИЛ) обладает значительными резервами, которые не используются. Поставлена цель обобщения результатов исследований, которые направлены на повышение качественного уровня использования метода ЭИЛ за счет достижения более высокой эффективности его применения и расширения области эффективного использования. Наряду с применением известных технологических приемов обработки методом ЭИЛ предложено использовать новые или усовершенствованные технические решения, разработанные и апробированные на практике.

Ключевые слова: электроискровое легирование, покрытие, поверхностный слой, рельеф, толщина, сплошность, свойства, эффективность, универсальность.

The universal and effective method of electrospark alloying (ESA) has significant reserves which are not used. The goal is to summarize the results of researches which are aimed at improving the quality level of the use of the ESA method due to achievement higher efficiency of its application and expansion of the area of effective use. Along with the use of known technological methods of processing by the ESA method, it is proposed to use new or improved technical solutions developed and tested in practice.

Keywords: electrospark alloying, coating, surface layer, relief, thickness, continuity, properties, efficiency, versatility.

Любой метод обработки материалов направлен на достижение конкретного эффекта, т.е. придание заготовке (детали) новых требуемых геометрических и размерных параметров и свойств, соответствующих условиям дальнейшего использования. Эффективность применения метода определяется успешностью достижения требуемого результата, а также материальными, энергетическими и трудовыми затратами, связанными с выполнением операций обработки.

Характеристикой электроискрового легирования (ЭИЛ) является возможность изменения текстуры обрабатываемых поверхностей, состава, структуры и свойств поверхностных слоев токопроводящих материалов путем нанесения на них покрытий разной толщины. Эти функции определяют области практического использования метода ЭИЛ: создание на рабочих поверхностях различных изделий функциональных покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами (износо- и жаростойкость, коррозионная стой-

кость и др.), упрочнение поверхностных слоев изделий для обеспечения их работоспособности в конкретных условиях эксплуатации, а также увеличения ресурса. С другой стороны, возможность нанесения покрытий разной толщины определяет не менее важную область применения ЭИЛ — восстановление размеров изделий, утраченных в процессе их эксплуатации или "прослабления" размеров при изготовлении.

Несмотря на имеющийся опыт применения ЭИЛ, накопленный с 1940—1950 гг., в настоящее время эффективность его использования часто оказывается недостаточной. Причины — резкое сокращение производства и специалистов, владеющих технологическими приемами ЭИЛ, отсутствие регламентирующей технической документации и системы подготовки кадров для его практического применения и развития.

Вместе с тем этот метод, благодаря своим известным достоинствам, востребован как в машиностроении для упрочнения инструментов и штампов, ис-

пользуемых при изготовлении деталей и нанесения на ответственные детали покрытий с требуемыми свойствами, так и в ремонтном производстве для восстановления размеров изношенных деталей. Целесообразно расширение его применения в энергетике, добывающей и перерабатывающей промышленности, на транспорте и в других отраслях производства для увеличения ресурса или восстановления работоспособности широкого ряда изделий из металлических материалов.

Значительные резервы использования ЭИЛ кроются в решении проблемы увеличения толщины наносимых покрытий. Кроме того, мало изучена и не охвачена применением большая область — детали из материалов, полученных порошковой металлургией, объем которых в машиностроении значителен и продолжает увеличиваться.

Цель работы — обобщение результатов исследований, направленных на повышение качественного уровня использования метода ЭИЛ, реализуемого за счет достижения более высокой эффективности его применения и расширения области эффективного использования. При этом, наряду с применением известных технологиче-

ских приемов обработки методом ЭИЛ, предлагается использовать также новые или усовершенствованные технические решения, разработанные и апробированные автором на практике. В основе данной работы лежит использование теоретических и экспериментальных исследований, выполненных автором лично или в содружестве с коллегами Института химии ДВО РАН (г. Владивосток), Института материаловедения ХНЦ ДВО РАН (г. Хабаровск), Института механики и энергетики МГУ им. Н.П. Огарева (г. Саранск), Московского института стали и сплавов и Всероссийского института авиационных материалов (г. Москва), Белорусского государственного агротехнического университета (г. Минск), Института прикладной физики АН Молдовы (г. Кишинев), которым он выражает благодарность за сотрудничество.

Результаты исследований в обобщенном виде представлены в табл. 1.

Учитывая, что основные элементы рассматриваемой темы автором были ранее опубликованы, кратко охарактеризуем предлагаемые пути достижения эффекта.

Таблица 1

Пути и особенности повышения качественного уровня использования метода ЭИЛ

| Пути достижения эффекта | Особенности достижения эффекта, результат |
|--|--|
| <i>Эффективность</i> | |
| Создание рационального рельефа рабочей поверхности | Высоконагруженная поверхность: замена рельефа рабочей поверхности вместо совокупности протяженных выступов на выступы ограниченной длины, например в виде шаровых сегментов. Увеличение износостойкости |
| | Поверхность трения скольжения: наличие лунок на рабочей поверхности с обеспечением достаточного уровня опорной поверхности. Увеличение износостойкости |
| Создание рациональных свойств поверхностного слоя | Прочностные свойства: обеспечение требуемого соотношения толщины покрытия и его свойств в соответствии с силовым нагружением. Увеличение износостойкости |
| | Теплофизические свойства: обеспечение существенного различия по теплопроводности (не менее 1,5-кратного) материалов покрытия и сопряженной детали (заготовки). Увеличение износостойкости |
| Оптимизация параметров ЭИЛ | Установление технологических параметров нанесения покрытия, наиболее соответствующих его функциональному назначению, включая математическое планирование экспериментов |
| Улучшение функциональных свойств поверхностного слоя | Повышение прочностных свойств покрытий: создание наноразмерных структур. Увеличение износостойкости |
| | Электродные материалы функционального назначения: улучшение условий эксплуатации изделий с покрытиями, препятствующими действию механического, химического и теплового процессов разрушения. Увеличение износостойкости |
| | Совмещение методов обработки: последовательная обработка поверхности методом ЭИЛ в сочетании с разными видами механической, электрофизической, электрохимической обработки и другими видами обработки. Увеличение толщины измененных поверхностных слоев и улучшение их эксплуатационных свойств |

| Пути достижения эффекта | Особенности достижения эффекта, результат |
|--|---|
| Создание нового оборудования | Энергетические параметры: обеспечение энергетической стабильности процесса ЭИЛ, определяемой совокупностью работы генератора технологических импульсов и электрода-инструмента. Повышение стабильности структуры и свойств покрытий |
| | Механизация и автоматизация: исключение человеческого фактора при нанесении покрытий. Повышение стабильности процесса нанесения покрытий и их свойств |
| <i>Универсальность</i> | |
| Увеличение толщины покрытий | Применение технологического приема получения толстослойных и многослойных покрытий повышенной сплошности. Многократное увеличение толщины нанесенного слоя |
| Расширение круга обрабатываемых материалов | Нанесение функциональных покрытий на несплошные материалы |

Создание рационального рельефа рабочей поверхности. Применительно к силовому нагружению (до пластического состояния сопряженного материала) фронтальной по отношению к направлению течения поверхности выступов рассмотрены схемы деформирования (рис. 1) в условиях давления и сдвига заготовки 2 выступами 1 двух типов: протяженными в виде клина (рис. 1, а),

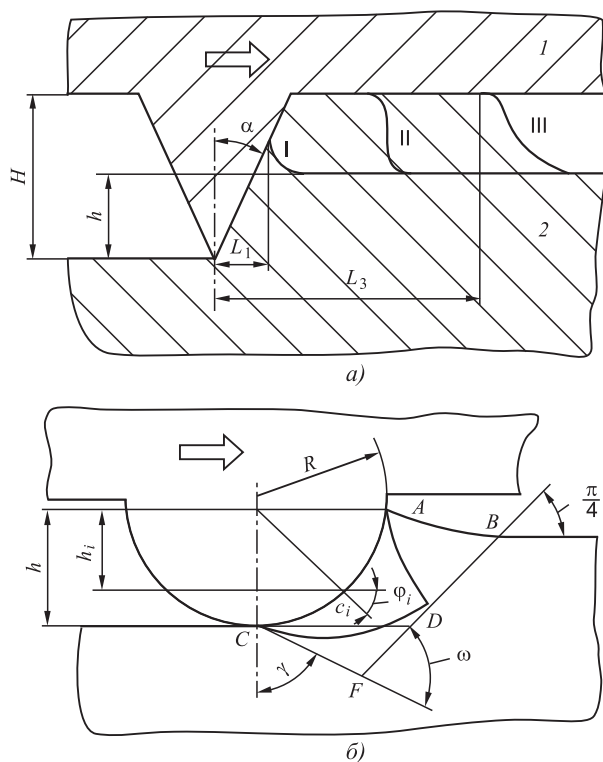


Рис. 1. Деформирование заготовки выступами двух типов: а — протяженными клиновидной формы; б — ограниченной длины формы шарового сегмента; 1 — инструмент; 2 — пластичная заготовка

ориентированными нормально к течению обрабатываемого материала, т.е. параллельно режущей кромке, и ограниченной длины формы шарового сегмента (рис. 1, б). Установлено, что при некотором ходе L инструмента относительно обрабатываемой заготовки в процессах обработки давлением, резанием, в том числе в разделительных процессах, имеет место запирание обрабатываемого материала в зоне перед единичным протяженным выступом. При дальнейшем увеличении хода площадь зоны запирания (стадии деформирования I, II, III — рис. 1, а) растет, усиливается нагрузка на единичный выступ, что при достижении критического значения приводит к разрушению выступа.

В аналогичных условиях работы выступа ограниченной длины (например, шаровой сегмент на рис. 1, б) материал заготовки растекается в боковые стороны от него и не создает застойной зоны, как в первом случае. Таким образом, при одинаковых условиях силового нагружения предпочтительны выступы ограниченной длины. Это подтверждается полученными зависимостями нагрузки на выступ от условий нагружения.

Применительно к выступам в форме шаровых сегментов теоретически определены нижние границы допустимых значений относительной высоты h/R (h, R — высота и радиус выступа) выступов в зависимости от нагрузки Q/k_3 (k_3 — пластическая постоянная материала заготовки) и коэффициента трения μ (рис. 2). Также установлена взаимосвязь радиуса поперечного сечения шарового сегмента ρ , "утопленного" в материал заготовки, и расстояния между выступами R/S с коэффициентом сплошности контакта C и радиусом выступа R (рис. 3), позволяющая определить требуемое значение R для конкретных условий работы.

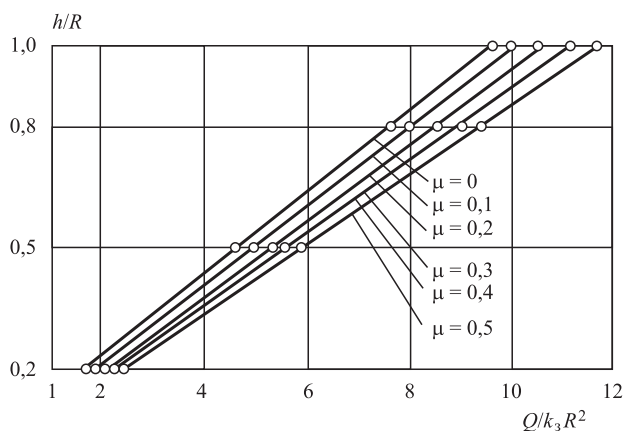


Рис. 2. Нижние границы допустимых значений относительной высоты выступов в зависимости от нагрузки и коэффициента трения

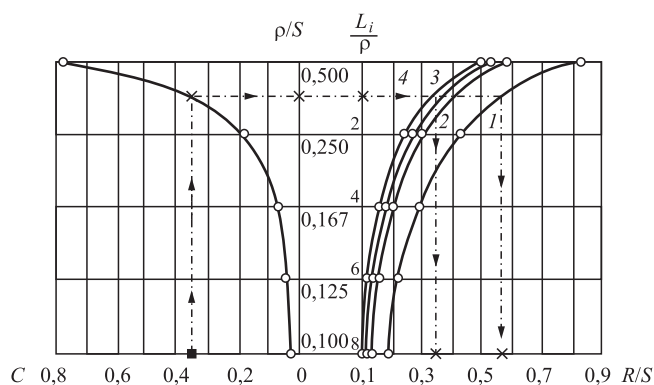


Рис. 3. Взаимосвязь радиуса поперечного сечения шарового сегмента ρ , расстояния между выступами S с коэффициентом сплошности контакта C и радиусом выступа R при относительной глубине внедрения шарового сегмента в материал заготовки l/R :
 1 — 0,2; 2 — 0,5; 3 — 0,8; 4 — 1,0

Приведенные известные соотношения и выведенные в работе [1] зависимости позволяют обоснованно выбрать рельеф рабочей поверхности инструмента и определить его рациональные параметры, а также прочностную характеристику инструментального материала в условиях высокого силового нагружения поверхности.

Рассмотрен также вопрос создания рационального рельефа поверхности трения скольжения. В условиях трения скольжения при наличии смазки шероховатости с масляными карманами лучше удерживают ее на поверхностях пары трения как при скольжении (качении, качении со скольжением), так и в состоянии покоя, по сравнению с профилем, имеющим регулярную шероховатость, так как при этом создаются сквозные каналы для протекания смазки. Установленный критерий несущей способности шероховатой по-

верхности, который применительно к ЭИЛ имеет следующий вид:

$$\Omega = \frac{\bar{R}_{м.к}(Y)}{3} \left\{ \exp \left[-b \left(\frac{Y}{R_{\max}^{\text{исх}}} \right)^v \right] \right\}^2, \quad (1)$$

где Ω — условная толщина слоя смазки на поверхности трения; $R_{м.к}$ — средняя высота масляных карманов; Y — реальное распределение; b и v — параметры закона распределения, определяются с использованием вероятностной бумаги закона Вейбулла; $R_{\max}^{\text{исх}}$ — исходная максимальная высота микронеровностей исследуемой поверхности.

Выполнен анализ основных факторов, определяющих работоспособность материала в узле трения скольжения в условиях ограниченной смазки или ее отсутствия, когда в контакте находятся поверхности под некоторой нагрузкой, намечены некоторые пути повышения их несущей способности и износостойкости.

Результатом создания рационального рельефа поверхности является повышение ее износостойкости.

Создание рациональных свойств поверхностного слоя. Оно также направлено на повышение износостойкости поверхности. Рассмотрены прочностные и теплофизические свойства поверхностного слоя.

Для определения рациональных прочностных свойств поверхностного слоя выполнен согласно расчетным схемам рис. 4 анализ механики разрушения покрытия применительно к предельным условиям силового нагружения, к высоконагруженным поверхностям, в частности, рабочим частям разделительных штампов.

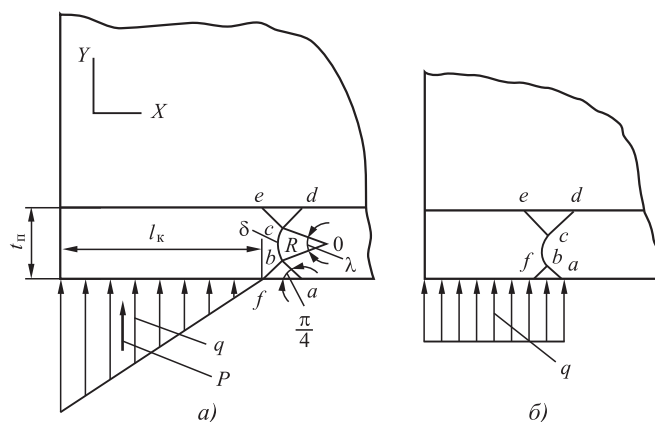


Рис. 4. Расчетные схемы силового нагружения высоконагруженной поверхности:

a — нагружение покрытия толщиной t_n на длине участка контакта инструмента и заготовки; b — нагружение в прикомочной зоне

Получена зависимость предельной нагрузки P , воспринимаемой покрытием, от его толщины:

$$\frac{P}{2k_{\text{п}}} = \frac{0,28t_{\text{п}}S - 0,13t_{\text{п}}^2 - 0,03S^2}{0,54S - 0,15t_{\text{п}}}, \quad (2)$$

где $k_{\text{п}}$ — пластическая постоянная материала покрытия; S — толщина листовой заготовки; $t_{\text{п}}$ — толщина покрытия.

Используя эту зависимость, можно с учетом технологических условий (сила разделения, толщина заготовки) и механических свойств материала покрытия определить минимально допустимую толщину.

Помимо силового воздействия, другим разрушительным и инициирующим износ рабочих поверхностей фактором является тепловое нагружение. В наиболее значительной степени оно отрицательно сказывается на работе поверхностей инструментов для обработки металлов и сплавов резанием и давлением (высоконагруженные), поверхностей контакта с расплавленным металлом литейной оснастки (теплонагруженные), рабочих поверхностей деталей и инструментов, контактирующих с неметаллическими материалами, а также с потоками газов, в том числе при высокой температуре.

Кроме того, ужесточение теплового режима работы контактирующих металлических материалов интенсифицирует адгезионные процессы, также способствующие разрушению рабочих поверхностей. Поэтому, решая задачу улучшения теплового режима поверхности, т.е. противодействуя высоким локальным температурам, создаются условия для снижения интенсивности адгезионных процессов на поверхности контакта.

Установлено, что для предотвращения схватывания при условии постоянства уровня силового нагружения необходимо уменьшить тепловое воздействие на контактирующую пару материалов путем быстрого отвода теплоты в заготовку или ее рассеяния от очага возникновения по поверхности контакта. Эта задача решается применением материала инструмента или его поверхностного слоя со свойствами, значительно отличающимися по теплопроводности от материала заготовки, т.е. должно выполняться следующее условие:

$$\lambda_3/b \leq \lambda_{\text{и}} \geq b\lambda_3, \quad (3)$$

где $\lambda_{\text{и}}$ и λ_3 — коэффициенты теплопроводности соответственно материалов инструмента (покрытия) и заготовки.

Это подтверждается результатами экспериментальных исследований износостойкости образцов

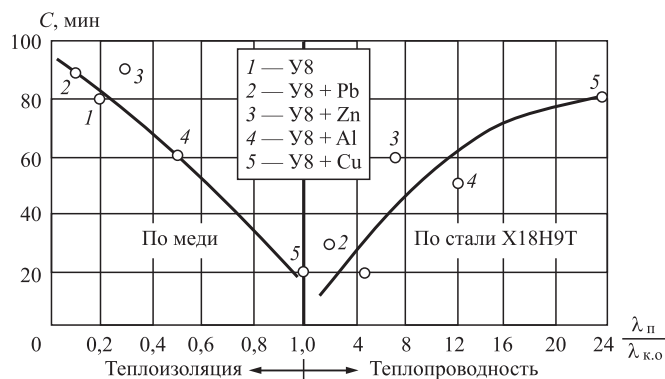


Рис. 5. Влияние соотношения теплопроводности материалов покрытия и контрольного образца на износостойкость покрытия

с покрытиями (рис. 5), согласно которым она увеличивается с повышением различия по теплопроводности материалов покрытия и контрольного образца.

Оптимизация параметров ЭИЛ. Показана роль математического планирования экспериментов в эффективности определения технологических параметров нанесения покрытия, наиболее соответствующих его функциональному назначению. В качестве параметров оптимизации процесса ЭИЛ приняты энергия импульсов E , Дж, частота их следования $f_{\text{имп}}$, Гц, и удельное время обработки $t_{\text{уд}}$, с/см², по условному значению τ . На основе экспериментальных данных построена математическая модель оптимизации технологических параметров применительно к микротвердости белого слоя покрытия, нанесенного на малоуглеродистую сталь твердого сплава ВК8. Такой подход целесообразен, в первую очередь, при обработке ЭИЛ ответственных, ресурсопределяющих деталей, а также при обработке деталей, инструментов больших серий, особенно при механизации и автоматизации этого процесса.

Улучшение функциональных свойств поверхностного слоя. Согласно поставленной цели, рассмотрены результаты исследований, направленных на улучшение прочностных свойств поверхностных слоев путем формирования наноструктур, создания и применения новых электродных материалов для решения конкретных технических задач, а также совмещением разных методов обработки.

Рассмотрим эти пути по отдельности.

1. Улучшение прочностных свойств путем наноструктурирования. Одно из направлений модифицирующей обработки — создание на металлической поверхности ультрамелкозернистых (УМЗ) структур (величина зерна до 1000 нм), а также консолидированных нанокристаллических (НК)

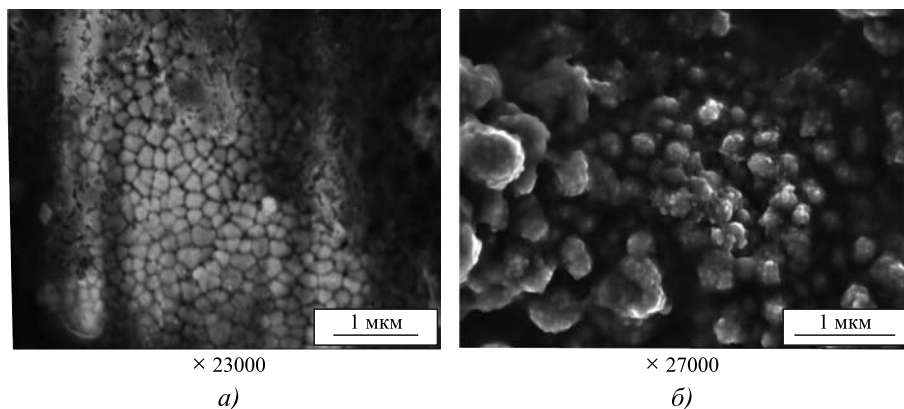


Рис. 6. Фотографии блочной структуры поверхности ЭИ-покрытий на стали 45, нанесенных на установке "БИГ-4" электродами ВК8 (а) и СТИМ-ЗБОУ_н (б):
a — режим 2 (1-0,2) — $E = 0,045$ Дж; частота импульсов $f_{имп} = 600$ Гц; условная удельная длительность обработки 2τ ; *б* — режим 7 (2-0,4) — $E = 0,09$ Дж; $f_{имп} = 600$ Гц; 2τ

Таблица 2

Эффективность совмещения методов обработки

| Методы обработки | Эффективность |
|---|--|
| ЭИЛ + МО | Увеличение опорной поверхности (обработка резанием, шлифованием); увеличение микротвердости, опорной поверхности, сопротивления усталости (обработка ППД) |
| ЭИЛ + ЛО | Повышение в 3–6 раз толщины белых и термодиффузионных слоев, увеличение их сплошности на 12...30 % |
| ЭИЛ + МПО | Повышение до 10 раз толщины белых и термодиффузионных слоев, увеличение их сплошности и снижение дефектности |
| ЭИЛ + ЭДН | Легирование наплавленного слоя и увеличение его твердости и износостойкости; увеличение толщины слоя |
| ЭИЛ + ХТО | Увеличение износо- и коррозионной стойкости |
| ЭИЛ + ХГДН | Повышение адгезионной прочности ХГДН-покрытий; обеспечение высокой несущей способности поверхности; увеличение износостойкости и фреттинг-коррозионной стойкости |
| ЭИЛ + УЗО | Измельчение блочной структуры поверхностного слоя, повышение его микротвердости и износостойкости |
| ЭИЛ + металло-полимеры | Увеличение адгезионной прочности соединения МП с подложкой и несущей способности восстановленных поверхностей |
| Примечание. МО — механическая обработка; ЛО — лазерная обработка; МПО — микроплазменная обработка; ЭДН — электродуговая наплавка; ХТО — химико-термическая обработка; ХГДН — холодное газодинамическое напыление; УЗО — ультразвуковая обработка. | |

материалов (величина зерна до 100 нм) нанесением разнообразными методами пленок и покрытий из металлов, сплавов и металлоподобных соединений или интенсивной пластической деформацией, или контролируемой кристаллизацией из аморф-

покрытия. Для получения защитного теплоустойчивого покрытия на железоуглеродистых сплавах, в частности, для увеличения ресурса литейных форм из чугуна, используемых при производстве медных и никелевых отливок, методом ЭИЛ

ного состояния. Это направлено обосновано тем, что механические свойства компактных материалов в значительной степени связаны с размером зерен и состоянием межзеренных границ, составляющих структуру этих материалов. Данная взаимосвязь особенно ярко выражена у нанокристаллических материалов.

Выполнили анализ основных параметров, присущих методу ЭИЛ, управление которыми может обеспечить формирование НК и УМЗ поверхностных слоев на металлических материалах. Проведенные экспериментальные исследования по нанесению НК- и УМЗ-покрытий на сталь 45 и серый чугун СЧ18 показали значительное влияние режимов обработки на зернистость поверхностного слоя образцов (рис. 6).

Изменением электрических параметров ЭИЛ получена возможность управления размерами блоков кристаллической структуры поверхностного слоя покрытий твердым сплавом ВК8 на стали 45 от 700 до 40 нм, при этом доля нанокристаллических блоков (<100 нм) в общем объеме составляла от 5 до 50 % [1].

2. Создание и применение новых электродных материалов способствует улучшению условий эксплуатации изделий с покрытиями, препятствующими действию механического, химического и теплового процессов разрушения, увеличению износостойкости. Учитывается, что материал электрода должен отвечать двум требованиям: функциональному назначению обрабатываемой поверхности и эффективности формирования

наносили покрытия новыми электродными материалами из твердых растворов, содержащих силицидные фазы $(Mo, W)_3Si_3$ и $(Mo, W)Si_2$ [2].

3. На основе известных и собственных экспериментальных исследований установлено, что совмещение ЭИЛ с другими методами обработки обеспечивает получение поверхностных слоев изделий с новыми, улучшенными качественными и прочностными характеристиками, что способствует расширению эффективного применения ЭИЛ. Как видно из табл. 2, комбинации различных методов обработки металлических поверхностей с ЭИЛ позволяют решать более широкий круг практических задач.

Создание нового оборудования. При ЭИЛ непосредственными и основными исполнителями обработки являются генератор искровых импульсов и электрод-инструменты. От их комплексной работы зависят энергетические параметры процесса ЭИЛ и результаты обработки. Их совершенствование позволяет улучшить технические параметры создаваемого оборудования, влияя на эффективность процесса ЭИЛ и формируемых покрытий. Выполненные исследования дополняют сведения о влиянии генератора технологических импульсов на стабильность процесса ЭИЛ. Экспериментально установлено, что повышение

стабильности искровых импульсов по энергии и длительности — один из путей, способствующих росту эффективности процесса ЭИЛ, и в первую очередь за счет повышения стабильности свойств формируемого покрытия. Также обеспечение стабильности процесса и качества обработки, повышение ее производительности достигаются механизацией и автоматизацией процесса обработки.

Увеличение толщины покрытий. Решение данной проблемы значительно расширяет область применения метода ЭИЛ, повышает его универсальность. Известный факт наличия предела прироста массы катода и толщины покрытия, ограничивающего практическое использование ЭИЛ, объективно считается одним из существенных недостатков данного метода. Также недостаток метода — низкая контактная сплошность поверхности покрытия.

Комплексом экспериментальных исследований формирования методом ЭИЛ покрытий получено значительное увеличение их толщины при повышенной сплошности. Это достигнуто многоциклозой обработкой методом ЭИЛ модельного образца при чередовании операций нанесения основного металла и оплавления (осадки) нанесенного покрытия электродом из эрозионно-стойкого токопроводящего материала [3, 4]. На рис. 7 представлены фотографии покрытий из Т15К6,

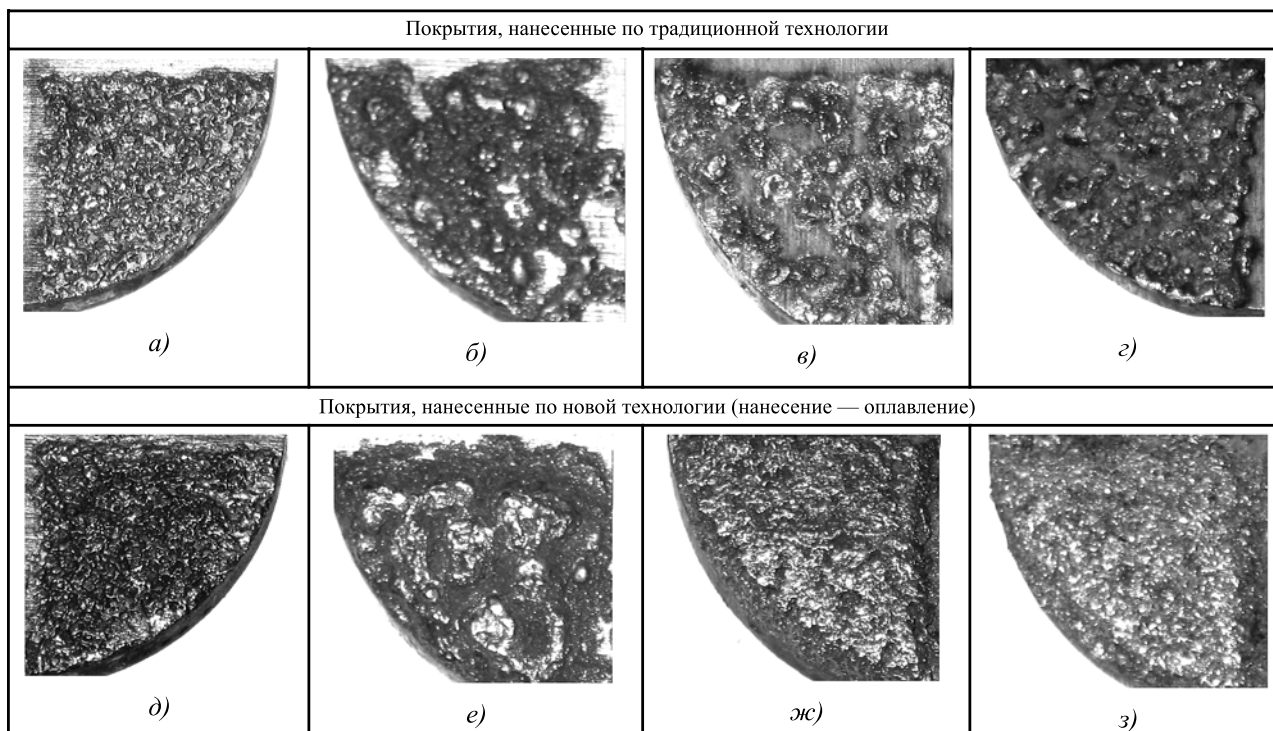


Рис. 7. Покрyтия, полученные методом ЭИЛ по традиционной и новой технологиям:

a — Т15К6, $h = 0,43$ мм; *б* — ШХ15, $h = 2,05$ мм; *в* — Х20Н80, $h = 1,61$ мм; *г* — БрКМц3-1, $h = 1,88$ мм; *д* — Т15К6 + графит, $h = 0,84$ мм; *е* — ШХ15 + медь, $h = 4,30$ мм; *ж* — Х20Н80 + медь, $h = 3,87$ мм; *з* — БрКМц3-1 + медь, $h = 3,06$ мм

ШХ15, Х20Н80 и БрКМц3-1 на стальных образцах, полученных как по обычной, так и по новой технологии, с оплавлением. Видно значительное увеличение толщины покрытий, при этом достигнутые результаты не предельны — дальнейшее увеличение числа циклов ведет к продолжению его наращивания.

Расширение круга обрабатываемых материалов.

Нанесение функциональных покрытий на несплошные материалы также значительно повышает универсальность метода ЭИЛ. Наряду с металлургией, прокатным производством, производящими сплошные металлы и сплавы, с середины прошлого века особо интенсивно развивается порошковая металлургия, объектами производства которой являются детали различных конструкций и назначения, полученные методом прессования и спекания. При этом количество отходов минимально — до 3...5 % от массы детали или они отсутствуют. Отличительной чертой деталей, полученных порошковой металлургией, является их пористость, составляющая от 2...3 до 40 % от объема материала детали. Наличие пористости существенно влияет на формирование упрочняющего или восстанавливающего покрытия при ЭИЛ. Это изменение выражено в разрушении пористого поверхностного слоя под воздействием искровых разрядов, препятствующего формированию качественного покрытия.

В качестве базового технологического приема при нанесении ЭИ-покрытий на несплошные материалы используется техническое решение по нанесению толстослойных покрытий повышенной сплошности (ТСП) [3, 4].

В работе [5] сформулированы основные принципы нанесения ЭИ покрытий на пористые металлические материалы и поверхности:

1. Эффективность процесса нанесения ЭИ-покрытий в основном зависит от теплофизических свойств несплошного материала и его пористости, при этом материалы катода с пониженной температурой плавления и эрозионной стойкостью, а также увеличенной пористостью или дефектностью обладают ухудшенной способностью для формирования на них ЭИ-покрытий.

2. Незначительная равномерная пористость (до 2...3 %) материала катода не оказывает заметного влияния на процесс формирования ЭИ-покрытия, и ЭИЛ таких материалов выполняется традиционным способом с использованием приемов обработки сплошных металлических материалов.

3. С увеличением пористости (дефектности) материалов или поверхностных слоев ЭИЛ проводится в несколько этапов:

1) подготовка поверхности с увеличением ее эрозионной стойкости за счет повышения контактной сплошности;

2) формирование покрытия требуемой толщины с использованием приемов нанесения ТСП;

3) придание поверхностному слою требуемых эксплуатационных свойств, т.е. обеспечение соответствия функциональному назначению.

Более подробные рекомендации по нанесению методом ЭИЛ покрытий на несплошные (пористые) токопроводящие материалы изложены в работе [5].

Рассматриваемая тема повышения эффективности и универсальности метода ЭИЛ актуальна и представляет собой комплексную проблему, требующую дальнейших углубленных исследований и новых конструкторских и технологических разработок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Иванов В.И., Коневцов Л.А., Гордиенко П.С.** О влиянии энергетических параметров искровых разрядов на дисперсность структуры поверхностного слоя металлического материала // Труды Кольского научного центра. Химия и материаловедение. Вып. 2. III Всероссийская научная конференция с международным участием, посвященная 60-летию ИХТРЭМС ФИЦ КНЦ РАН "Исследования и разработки в области химии и технологии функциональных материалов". Ч. 2. 2018. С. 636—641.
2. **Электроискровое** легирование поверхности на углеродистых сталях и чугунах с помощью электродов из силицидов молибдена и вольфрама / Б.А. Гнесин, В.Я. Поддубняк, Ф.Х. Бурумкулов и др. // *Материаловедение*. 2007. № 7. С. 41—54.
3. **Евразийский патент № 017066.** Электроискровый способ нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности / В.И. Иванов, Ф.Х. Бурумкулов, В.А. Денисов. Оpubл. 28.09.2012, Бюллетень ЕАПВ "Изобретения (евразийские заявки и патенты)" № 9.
4. **Иванов В.И., Бурумкулов Ф.Х.** Об электроискровом способе нанесения толстослойных покрытий повышенной сплошности // *Электронная обработка материалов*. 2014. Т. 50. № 5. С. 7—10.
5. **Иванов В.И.** Нанесение электроискровых покрытий на детали порошковой металлургии: технологические основы // *Энергоэффективные и ресурсосберегающие технологии и системы: межвузов. сб. науч. тр.* Саранск: Изд-во Мордов. ун-та, 2017. 772 с. С. 451—456.

В.А. Ким, А.А. Афанасьева, Аунг Нгву Тэйн
(Комсомольский-на-Амуре государственный университет)
E-mail: kmtnm@knastu.ru

Морфология поверхностей, сформированных импульсной лазерной обработкой сталей и сплавов

Процессы взаимодействия лазерного излучения с металлами протекают в условиях, сильно отличающихся от равновесных, на фоне высоких температур и их градиентов, скоростей нагрева и охлаждения. Структурные превращения охватывают временной интервал значительно больше периода воздействия лазерного импульса и отражаются на рельефе обработанной поверхности. Различная морфология поверхностного слоя, полученная при этом, носит индивидуальный характер в зависимости от состава и структуры исходного материала. Состояние и рельеф поверхности, сформированной лазерной обработкой, можно анализировать по РЭМ-изображениям. Для анализа РЭМ-изображений поверхностей были предложены количественные показатели, рассчитываемые по контрастной маске, которые были получены с помощью алгоритма цветовой сегментации. Эти показатели характеризуют степень яркости и относительную площадь светлых и темных объектов. Они позволили объединить поверхностные микроструктурные объекты в пять упорядоченных групп и ранжировать их по коэффициенту отражения.

Ключевые слова: лазерное излучение, микроструктура, РЭМ-изображения, алгоритм цветовой сегментации, контрастная маска, упорядоченность, коэффициент отражения.

Laser radiation interaction processes with metals occur in the conditions very different from equilibrium, against high temperatures and their gradients, heating rate and cooling rate. Structural transformations cover the time interval much more the period of laser pulse action and in relief of the processed surface are reflected. Various morphology of surface layer received thus has individual character depending on structure and structure of initial material. The state and relief of the surface formed by laser processing can be analyzed according to SEM micrographes of surface. The quantitative indices counted on contrast mask which are received by color segmentation algorithm are offered for the analysis of SEM micrographes of surface. These indicators characterize degree of brightness and the relative area of light and dark objects. They allowed to unite superficial microstructural objects in five ordered groups and to range them on reflection coefficient.

Keywords: laser radiation, microstructure, SEM micrographes, color segmentation algorithm, contrast mask, orderliness, reflection coefficient.

Введение

Структурные превращения при лазерной обработке материалов протекают в неравновесных условиях на фоне высоких температур и их градиентов, а также скоростей нагрева и охлаждения. Неравновесные условия развития структур возникают в результате того, что образующиеся каналы отвода теплоты и массопереноса не в состоянии компенсировать поглощаемую обрабатываемым материалом энергию лазерного излучения. В результате в материале формируются особые пространственные динамические диссипативные структуры, на создание которых требуются определенные энергетические затраты, а их функционирование связано с образованием особых высокоэффективных каналов рассеивания энергии. Образующаяся при этом структура материала отличается развитостью внутренних границ раздела, высокой степенью самоорганизации и упо-

рядоченностью, охватывающей все структурные масштабные уровни.

При лазерной обработке самые верхние поверхностные слои, как правило, подвергаются плавлению, а их кристаллизация происходит в условиях высокоскоростного охлаждения. Возникающие при кристаллизации структуры продолжают развиваться в процессе остывания, образуя специфическую морфологию поверхностей [1–5]. Структуры, сформированные в режиме жидкофазной закалки, отличаются более высокой неравновесностью, степень которых принимает большие значения при лазерной обработке материалов, подверженных полиморфным превращениям. Неравновесные структуры характеризуются высоким содержанием свободной энергии и обладают набором уникальных физико-механических и функциональных свойств. Поэтому лазерная обработка широко используется не только для упрочнения и модифицирования, а также

Таблица 1

Химический состав исследуемых материалов*, %

| Материал | C | Si | Mn | W | Mo | Cr | Ni | Co | S | P |
|--------------|-------|------|------|-----|------|-------|------|------|-------|-------|
| P6M5K5 | 0,86 | 0,5 | 0,5 | 6,2 | 4,9 | 4,2 | 0,4 | 5,1 | 0,03 | 0,025 |
| АРМКО-железо | 0,004 | 0,05 | 0,04 | — | 0,01 | 0,038 | 0,06 | — | 0,005 | 0,005 |
| 12X18H10T | 0,12 | 0,8 | 2,0 | — | — | 18,2 | 10,9 | — | 0,002 | 0,005 |
| ВЧ35 | 3,42 | 2,02 | 0,34 | — | — | — | 0,67 | 0,04 | 0,02 | 0,05 |

* Остальное Fe.

как способ подготовки поверхностей для последующего нанесения на них различных функциональных покрытий.

Создание необходимой микрогеометрии поверхности лазерной обработкой представляет собой самостоятельную научно-практическую задачу. Известно, что повышенные триботехнические и эксплуатационные характеристики деталей машин и изделий обеспечиваются не только структурным состоянием поверхностных слоев, но и за счет микронеровностей определенного рельефа. Фактические контактные нагрузки, адсорбционные и маслоудерживающие свойства поверхностей трения главным образом определяются геометрическими характеристиками микрорельефа. Реакции отторжения организмом металлических имплантатов в значительной степени зависят от микрогеометрии их поверхностей, при этом существует оптимальный микрорельеф, на котором легче приживается живой биоматериал [6, 7].

В статье приведены результаты исследований морфологии поверхностей из сталей и чугунов после импульсной лазерной обработки, выполненные с использованием количественных показателей, определяемых методами компьютерной обработки изображений.

Методика исследования

Исследовали образцы из АРМКО-железа, быстрорежущей стали P6M5K5, коррозионно-стойкой стали 12X18H10T и высокопрочного чугуна с шаровидным графитом ВЧ35. Выбранные материалы охватывают широкий диапазон варьирования механических, теплофизических и химических свойств, а также значений температур фазово-структурных превращений, которые в совокупности обеспечивали различные условия взаимодействия материала с лазерным излучением, развития индивидуальных структур и морфо-

логии поверхностей. Химический состав исследуемых материалов приведен в табл. 1.

Лазерную обработку проводили технологическим импульсным лазером LRS-300 с длиной волны $\lambda = 1,06$ мкм. Обработанная поверхность представляла собой дорожку, состоящую из пятен лазерного воздействия круглой формы диаметром d с коэффициентом перекрытия $k_{\text{п}} = 0,75$. Плотность энергии W и плотность мощности B лазерного воздействия рассчитывали по формулам:

$$W = \frac{4E}{\pi d^2}; B = \frac{W}{\tau},$$

где E — энергия единичного импульса;
 d — диаметр пятна лазерного воздействия;
 τ — длительность единичного импульса.

Режимы лазерной обработки приведены в табл. 2. Все выбранные режимы обеспечивали оплавление поверхностного слоя на разную глубину. Уровень возникающих температур, скоростей нагрева и охлаждения создавал различные условия кристаллизации и последующих структурных превращений, которые отражались на морфологии поверхностного слоя.

Строение поверхностного слоя после лазерной обработки исследовали с помощью сканирующей

Таблица 2

Режимы импульсной лазерной обработки

| Режим | U , В | τ , мс | E , Дж | d , мм | W , Дж/см ² | B , Вт/см ² |
|-------|---------|-------------|----------|----------|--------------------------|--------------------------|
| 1 | 450 | 1,0 | 6,3 | 2,0 | 200,6 | $2,01 \cdot 10^5$ |
| 2 | 300 | 2,5 | 16,0 | 1,4 | 1039,9 | $4,16 \cdot 10^5$ |
| 3 | 450 | 0,75 | 4,4 | 2,0 | 140,1 | $1,86 \cdot 10^5$ |
| 4 | 450 | 1,0 | 6,3 | 2,0 | 200,6 | $2,01 \cdot 10^5$ |

Примечание. U — напряжение накачки квантрона.

щего электронного микроскопа HITACHI S3400. Методика количественного анализа структур, полученных оптической микроскопией, в полной мере не применима к изображениям поверхностей, снятых с помощью растровых электронных микроскопов. Особенность таких изображений состоит в том, что они представляются в серых тонах, при этом светлые оттенки связаны с более активным диффузным отражением, а темные — с поглощением падающего потока электронов [8].

Для количественного анализа состояния поверхностного слоя после лазерной обработки использовали программу обработки изображений микроструктур Image.Pro.Plus.5.1 [9]. Для этого с изображения поверхности снимали контрастную маску, а само изображение, используя алгоритм цветовой сегментации, представляли в виде диаграммы яркости [10]. Далее проводили подсчет площадей темных и светлых объектов, определяли диапазон изменения и математическое ожидание яркости. Отношение математического ожидания к диапазону рассеяния по диаграмме яркости является показателем относительной яркости.

Результаты исследования и их обсуждение

Лазерная обработка поверхностей сопровождается изменением ее рельефа. Наиболее сильные изменения имеют место при оплавлении поверхностного слоя. На рис. 1–3 представлены изображения поверхностей образцов из исследуемых металлических материалов, обработанных лазерным излучением с различной удельной энергией. Между микрогеометрией поверхности и ее структурной организацией существует тесная взаимосвязь, поэтому развитие поверхностного рельефа необходимо рассматривать как единый процесс структурообразования.

Структурные превращения при лазерной обработке в оплавленном слое определяются характером кристаллизации, который зависит от температурного фона, теплофизических свойств материала и активности энергетических и массовых потоков.

Рассмотрим возможные варианты структурных превращений при высокоскоростной кристаллизации металлического расплава при разных температурах перегрева. При температуре кипения в ванне расплава создаются турбулентные вихре-

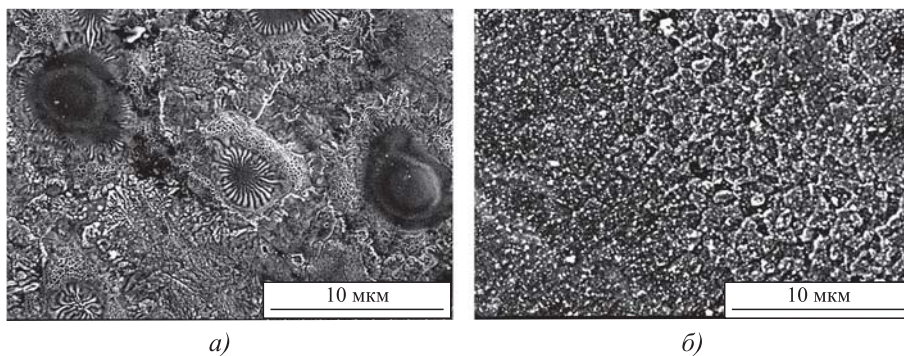


Рис. 1. Поверхности АРМКО-железа (а) и быстрорежущей стали Р6М6К5 (б) на пятне лазерного воздействия, сформированные из оплавленного слоя с турбулентными массовыми потоками

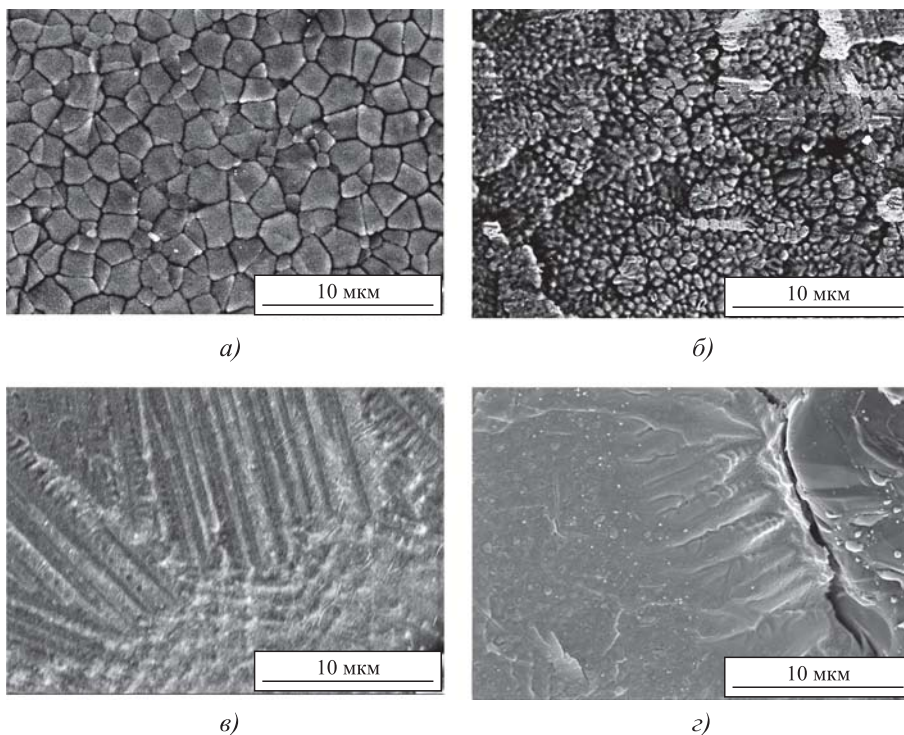


Рис. 2. Дендриты первого порядка, ориентированные по направлению теплового потока:

а — коррозионно-стойкая сталь; б — быстрорежущая сталь; в — высокопрочный чугун; г — высокопрочный чугун вблизи частицы шаровидного графита

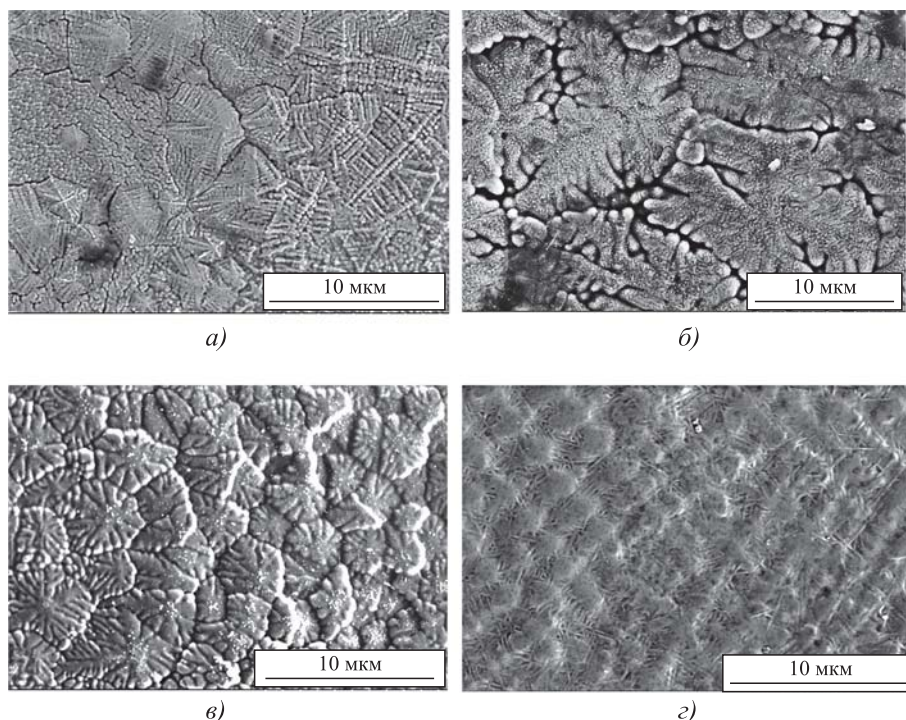


Рис. 3. Дендриты второго порядка:

a — АРМКО-железо; *б* — коррозионно-стойкая сталь; *в* — быстрорежущая сталь; *г* — высокопрочный чугун

вые потоки. С понижением температуры турбулентность массовых потоков переходит в ламинарный режим, а затем в жидкофазный диффузионный массоперенос.

Структура твердого тела, полученная кристаллизацией, определяется активностью образования центров кристаллизации и скоростью роста кристаллов. В зависимости от температуры перегрева скорость образования центров кристаллизации и скорость роста кристаллов носят экстремальный характер, а их диапазоны распределения и моды смещены по температурной шкале [2]. С повышением температуры перегрева температурное смещение максимумов возрастает. Следовательно, при кристаллизации оплавленного слоя, находящегося при температуре кипения, влияние фактора скорости образования центров кристаллизации на структурообразование превалирует над фактором роста кристаллов. Турбулентные массовые потоки в жидкофазной системе вносят хаос в характер объемного распределения образующихся центров кристаллизации. Неоднородное распределение температуры на пятне лазерного воздействия приводит к выбросам расплавленного и кипящего металла в микролокальных зонах, которые отражаются на характере поверхностного рельефа.

Типичная морфология поверхности, сформированная из расплава, охваченного турбулентными массовыми потоками и неоднородным распределением температуры, показана на рис. 1. АРМКО-железо обладает более высокой жидкотекучестью по сравнению с расплавленной быстрорежущей сталью, поэтому на ее поверхности видны следы каплеобразования и их выброса при кипении. На отдельных участках присутствуют мелкие столбчатые дендриты, подтверждающие высокую скорость образования центров кристаллизации.

На поверхности образца из Р6М5К5 также присутствуют мелкие столбчатые дендриты, объединенные в колонии в виде замкнутых цепочек неправильной формы. Форма замкнутых цепочек наследственно копирует турбулентность массовых потоков в кипящем расплаве. В целом для поверхностей, сформированных

из расплава с активными турбулентными потоками, характерно наличие упорядоченности на наномасштабном уровне и их нарушение на микроуровне.

При температуре расплава ниже точки кипения в жидкофазной среде могут возникать ламинарные массовые потоки, ориентированные по направлению градиентов температур. Процесс кристаллизации в этом случае реализуется при высоких температурах перегрева со всеми вытекающими из этого последствиями. В результате образуются дендриты первого порядка. Ориентация таких дендритов определяется главным образом направлением градиентов температур. При этом первичные зародыши кристаллов образуются в низкотемпературной области, а сам кристалл растет в направлении, противоположном градиенту температуры. В центральной области пятна лазерного воздействия дендриты первого порядка ориентированы перпендикулярно к поверхности. При этом сами дендриты представляют собой плотно упакованные столбчатые кристаллы, а их вершины образуют узор, подобный брусчатке (рис. 2, *a*, *б*). Соотношение скоростей образования центров кристаллизации и роста кристаллов определяет диаметральные размеры дендритов.

На периферии пятна лазерного воздействия градиенты температур имеют радиальное направ-

ление. В этом же направлении ориентируются образующиеся дендриты. На рис. 2, в показан участок, состоящий из таких дендритов, оси которых располагаются на поверхности.

Наличие микролокальных тепловых стоков может активно влиять на ориентацию дендритов. На рис. 2, г показана поверхность ковкого чугуна после импульсной лазерной обработки, в структуре которого присутствует шаровидный графит. В расплавленной матрице они играют роль тепловых стоков, и вокруг них формируются колонии из дендритов, ориентированных перпендикулярно к поверхности шаровидного графита.

В поверхностных зонах с более низкой температурой перегрева могут развиваться дендриты второго и более высоких порядков. Образование таких дендритов происходит, когда фактор скорости роста кристаллов превалирует над фактором скорости образования центров кристаллизации. На рис. 3 приведены различные виды дендритов высоких порядков. Ориентация основного осевого дендрита определяется направлением градиента температуры или теплового потока. Для АРМКО-железа (рис. 3, а) отростки дендритов второго порядка имеют диаметральные размеры, близкие к основному осевому дендриту. Это означает, что рост дендритов второго порядка начинается сразу после образования дендрита первого порядка, который сам становится активным тепловым стоком. Такая закономерность сохраняется при развитии дендритов более высоких порядков.

Дендриты высоких порядков, образующиеся в структуре коррозионно-стойкой стали, показаны на рис. 3, б. Низкий температурный интервал между ликвидусом и солидусом приводит к высокой скорости роста кристаллов, поэтому образующиеся дендриты высоких порядков в поперечном сечении образуют фигуры листообразной формы.

Образование дендритов высоких порядков при лазерной обработке быстрорежущей стали отличается тем, что их развитие ограничивается отростками дендритов второго порядка, которые начинают образовываться после того, как осевой дендрит достигнет определенного сечения. Относительно высокая скорость образования центров кристаллизации обеспечивается присутствием в жидкофазной матрице тугоплавких карбидов вольфрама и других металлов, поэтому дендриты имеют небольшие сечения (рис. 3, в).

Дендриты высоких порядков в структуре ковкого чугуна имеют сечения значительно меньшие по сравнению с осевым фрагментом (рис. 3, г). Это означает, что осевой фрагмент становится активным тепловым стоком только после достижения определенного размера и только когда образующиеся тепловые потоки инициируют развитие дендритов второго и более высоких порядков.

После кристаллизации процесс структурообразования продолжается, но уже реализуется в твердофазной среде. Наиболее выражено эти процессы проявляются, если материал подвержен полиморфным превращениям или рекристаллизации. Высокие внутренние напряжения, возникающие при кристаллизации, релаксируются через пластическую деформацию. В результате на поверхности образуется регулярный рельеф в виде волнистых складок и пересечений двойниковых границ. Такие образования наглядно представлены на рис. 4.

Важным элементом структурной организации поверхностного слоя являются межзеренные границы, которые, с одной стороны, барьеры для скользящих дислокаций, а с другой — каналы активной диффузионной проводимости. На границах чаще всего образуются концентраторы напряжений, вокруг которых аккумулируется внутренняя энергия и высока вероятность образования адгезионных связей при контактном взаимодействии и осаждении на них износостойких и функциональных покрытий.

Рельеф поверхностного слоя формируется таким образом, что центральная часть кристаллита становится более выпуклой по сравнению с ее периферией. Границы кристаллитов принимают более темный оттенок не только из-за особенностей их геометрического строения, но и в результате менее активной эмиссии вторичных электронов.

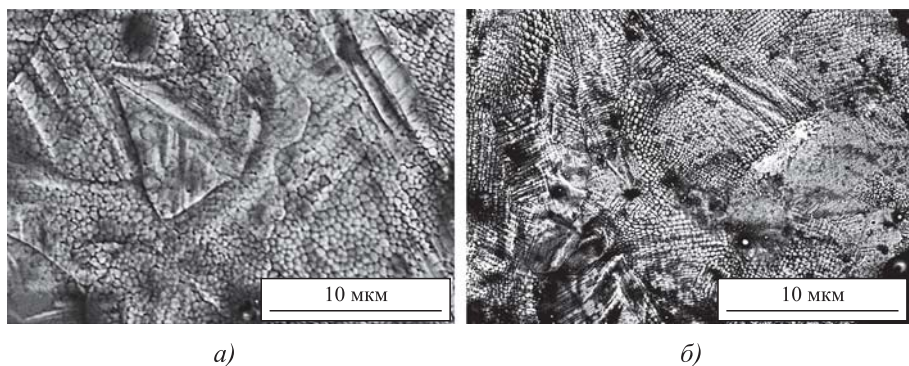


Рис. 4. Поверхность после лазерной обработки и твердофазных структурных превращений:

а — АРМКО-железо; б — быстрорежущая сталь

Таблица 3

Количественные показатели изображений поверхностей после лазерной обработки

| Тип структуры | Относительная площадь темных объектов | Относительная яркость |
|--|---------------------------------------|-----------------------|
| Структура после кристаллизации турбулентного слоя | 0,691...0,825 | 0,624...0,989 |
| Дендриты первого порядка в поперечном сечении | 0,632...0,659 | 0,150...0,944 |
| Дендриты первого порядка в продольном сечении | 0,562...0,774 | 0,909...1,031 |
| Дендриты высоких порядков в поперечном сечении | 0,547...0,614 | 0,547...0,657 |
| Дендриты первого порядка в поперечном сечении после твердофазных структурных превращений | 0,522...0,431 | 0,485...0,626 |

Исходя из этого, в качестве комплексных количественных показателей морфологии поверхности можно использовать относительную площадь темных участков на изображении, полученном на растровом электроном микроскопе, и отношение медианы к диапазону рассеяния, определяемые по диаграмме распределения яркости. Значения указанных показателей приведены в табл. 3.

На основании представленных в табл. 3 значений можно сделать заключение, что чем выше относительная площадь темных объектов в структурной организации поверхностного слоя, тем активнее каналы диффузионной проводимости и выше адгезионное сцепление покрытия, наносимое на эту поверхность [6, 11]. Наиболее благоприятной структурой в этом отношении являются дендриты первого порядка независимо от их ориентации. При нанесении поверхностных покрытий методом КИБ первичные островки осаждаемых карбидов и нитридов металлов образуются на границах зерен и в зонах с повышенной величиной химического потенциала.

Заключение

Рельеф поверхностей, обработанных лазерным излучением, несет важную информацию о ее структурной организации. В зависимости от энергии лазерного воздействия и теплофизических свойств обрабатываемого материала различают пять морфологических типов поверхностей:

— рельеф, сформированный при кристаллизации жидкофазного материала с турбулентными массовыми потоками;

— рельеф, состоящий из дендритов первого порядка, ориентированных перпендикулярно к поверхности;

— рельеф, состоящий из дендритов первого порядка, ориентированных вдоль поверхности;

— рельеф, состоящий из дендритов высоких порядков разной ориентации;

— рельеф, сформированный в результате твердофазных структурных превращений.

Каждый морфологический тип можно количественно оценить набором показателей, определяемых обработкой РЭМ-изображений с помощью специальной компьютерной программы. Предлагаемые показатели позволяют прогнозировать потенциальные свойства поверхностей при нанесении на них защитных и функциональных покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Прохоров А.М., Конов В.И., Урсу И., Михэилеску И.Н. Взаимодействие лазерного излучения с металлами. М.: Наука, 1988. 538 с.
2. Григорьянц А.Г., Сафонов А.Н. Лазерная техника и технология. В 7-ми кн. Кн. 3. Методы поверхностной лазерной обработки. М.: Высш. школа, 1987. 191 с.
3. Иванова В.С., Баланкин А.С., Бунин И.Ж., Оксогоев А.А. Синергетика и фракталы в материаловедении. М.: Наука, 1994. 383 с.
4. Ким В.А., Башков О.В., Гадоев Г.А. Морфология поверхностных структур при импульсной лазерной обработке сталей и чугунов // Ученые записки КнАГТУ. 2017. № II (30). С. 67–74.
5. Балахонов Р.Р., Болеста А.В., Бондарь М.П. и др. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / отв. ред. В.Е. Панин. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.
6. Быковский Ю.А., Неволин В.Н., Фоминский В.Ю. Ионная и лазерная имплантация металлических материалов. М.: Энергоатомиздат, 1991. 240 с.
7. Чихос Ч. Системный анализ в трибонике: пер. с англ. М.: Мир, 1982. 352 с.
8. Криштал М.М., Ясников И.С. и др. Мир физики и техники. Сканирующая электронная микроскопия и рентгеноспектральный анализ в примерах практического применения. М.: Техносфера, 2009. 208 с.
9. Ким В.А., Белова И.В., Золоторева С.В. Количественные показатели структурной организации поликристаллических материалов // Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2014. Т.80. № 4. С. 43–46.
10. Ким В.А., Башков О.В., Попкова А.А. Цветовая сегментация изображения микроструктуры как элемент компьютерной металлографии // Ученые записки КнАГТУ. 2015. № III (23). С. 46–53.
11. Мерер Х. Диффузия в твердых телах. Долгопрудный: Интеллект, 2011. 536 с.

А.И. Ковтунов, И.С. Нестеренко, Т.В. Семистенова
(Тольяттинский государственный университет)
E-mail: tatyana_717@mail.ru

Двухстадийное алитирование стали: газопламенное напыление с диффузионным отжигом

Проведены исследования процессов двухстадийного алитирования углеродистых и высоколегированных хромоникелевых сталей, включающих газопламенное напыление с диффузионным отжигом при температурах выше температуры плавления алюминия. Установлено влияние режимов диффузионного отжига сталей с напыленным алюминиевым слоем на толщину, химический и фазовый составы алитированного слоя. Определена кинетика роста переходного интерметаллидного слоя сталь—алюминий в зависимости от температурно-временных параметров отжига.

Ключевые слова: алитирование, алюминий, углеродистая сталь, высоколегированная сталь, газопламенное напыление, покрытие, диффузионный отжиг, интерметаллидный слой.

The studies in the areas of the two-stage aluminizing processes of carbon and high-alloyed chromium-nickel steels, which includes flame spraying with diffusion annealing at temperatures above the aluminum melting point are carried out. The effect of the diffusion annealing modes of deposited aluminium layer steels on the thickness, chemical and phase compositions of the aluminized layer is established. The growth kinetics of the steel—aluminum transition intermetallic layer depending on the time-temperature parameters of the annealing is determined.

Keywords: aluminizing, aluminum, carbon steel, high-alloyed steel, flame spraying, coating, diffusion annealing, intermetallic layer.

Введение

Для повышения жаростойкости, коррозионной и эрозионной стойкости поверхностей стальных деталей машин, работающих в экстремальных условиях, в последние годы широко применяется алитирование [1, 2]. Высокие показатели эксплуатационных свойств обеспечиваются формированием на поверхности стали слоя алюминидов железа с уникальным сочетанием механических и эксплуатационных свойств. Наиболее широко в промышленности применяют три способа: алитирование в ваннах с жидким алюминием, металлизация поверхности деталей с последующим диффузионным отжигом [2]. Металлизация поверхности деталей с последующим диффузионным отжигом отличается универсальностью и может использоваться для широкой номенклатуры изделий из стали. Металлизация поверхности обеспечивает формирование алюминиевого покрытия, а последующий диффузионный отжиг приводит к образованию на поверхности слоя интерметаллидных соединений системы железо—алюминий.

Традиционный способ металлизации стали алюминием — газопламенное напыление, т.е. расплавление металла (проволоки) в пламени горячего газа и перенос струей сжатого воздуха. Связь напыляемых частиц с металлом основы обеспечивается за счет механического сцепления и адгезионных сил, возникающих между ними [3, 4].

Образование алитированного слоя на сталях наблюдается в результате диффузионного отжига би-

металла сталь—алюминий при температурах выше 400 °С [5]. Для повышения скорости роста алюминиевого слоя, снижения времени выдержки целесообразно проводить диффузионный отжиг при температурах выше температуры плавления алюминия.

Цель работы — исследование процессов формирования алитированного слоя при диффузионном отжиге стали с алюминиевым покрытием при температурах выше температур плавления алюминия.

Методика исследования

Исследования процессов формирования алитированных слоев на сталях с газопламенным алюминиевым покрытием проводили на образцах труб диаметром 57 мм, толщиной 3 мм, из сталей 20 и 12Х18Н10Т (рис. 1). Для напыления алюминиевого покрытия на образцы использовали газопламенную установку "Плакарт FS-15".

Регулирование давления газов осуществлялось газовыми редукторами БКО-50-5-АЛ и БПО-5-СВ-АЛ, расхода кислорода и горючего газа — ротаметром марки GTV. Подача сжатого воздуха обеспечивалась винтовым компрессором Comprag A-1108 при стабилизации давления редуктором-осушителем Pneumax.

Для обеспечения адгезионной связи алюминия со стальными образцами поверхность основного металла обрабатывали никельшлаком с фракцией 0,5...1,5 мм и обезжировали ацетоном. Перед напылением проводили предварительный подогрев до 300 °С.

Режим напыления алюминия на сталь

| Давление воздуха, МПа | Давление кислорода, МПа | Расход кислорода, л/мин | Давление пропана, МПа | Расход пропана, л/мин | Скорость подачи проволоки, м/с |
|-----------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------------------|
| 0,5 | 0,7 | 35 | 0,2 | 26 | 0,6 |



Рис. 1. Образцы после нанесения алюминиевого покрытия

Для напыления использовали проволоку Св-А5 диаметром 3,15 мм. Напыление на все образцы осуществляли на одном режиме (таблица).

Диффузионный отжиг образцов выполняли в печи сопротивления. Температуру диффузионного отжига варьировали в пределах 700...800 °С, а время выдержки устанавливали: 1, 2, 5 ч.

Металлографические исследования и анализ химического состава алитированных слоев проводили на комплексе сканирующего электронного микроскопа LEO 1455 VP (ZEISS, Германия) с блоками рентгеновского энергетического спектрометра INCAEnergy-300.

Результаты исследования и их обсуждение

Проведенные исследования показали, что образование интерметаллидных слоев на сталях с напыленным алюминиевым слоем наблюдается для углеродистых сталей при температурах выше 400 °С, а для высоколегированных хромоникелевых сталей при температурах выше 500 °С. При увеличении температуры до 650 °С и времени выдержки до 5 ч удалось получить толщину интерметаллидного слоя на стали 20 толщиной до 300 мкм, а на стали 12Х18Н10Т — до 150 мкм [4].

При диффузионном отжиге стали 20 с напыленным алюминиевым слоем при температуре 700 °С в течение 1 ч формируется слой толщиной 200 мкм, а в течение 5 ч — слой толщиной 330 мкм. При отжиге 800 °С на углеродистой стали толщина алитированного слоя после выдержки в течение 1 ч составляет 350 мкм, при выдержке 5 ч — 550 мкм (рис. 2, а).

Толщина алитированного слоя на высоколегированных хромоникелевых сталях значительно меньше. При 700 °С и выдержке в течение 1 ч толщина слоя составляла 90 мкм, а в течение 5 ч — 175 мкм. Повышение температуры диффузионного отжига до 800 °С позволяет увеличить толщину алитированного слоя при выдержке 1 ч до 140 мкм, а при выдержке 5 ч — до 210 мкм (рис. 2, б).

Микрорентгеноспектральный анализ слоя интерметаллидов показал, что при диффузионном отжиге стали 20 с напыленным покрытием формируется двухслойное интерметаллидное покрытие. Со стороны стали формируется языкообразный слой, который исходя из химического состава

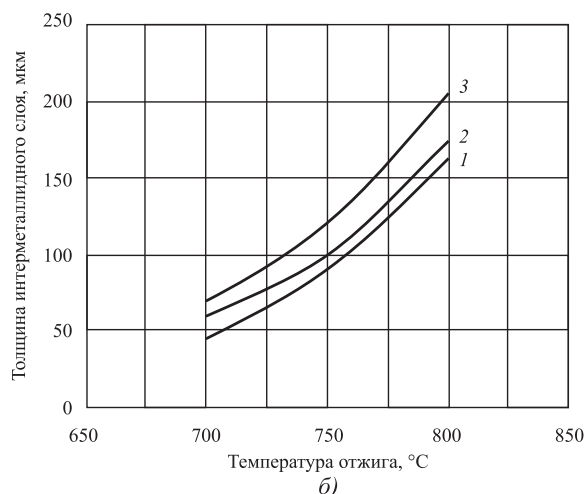
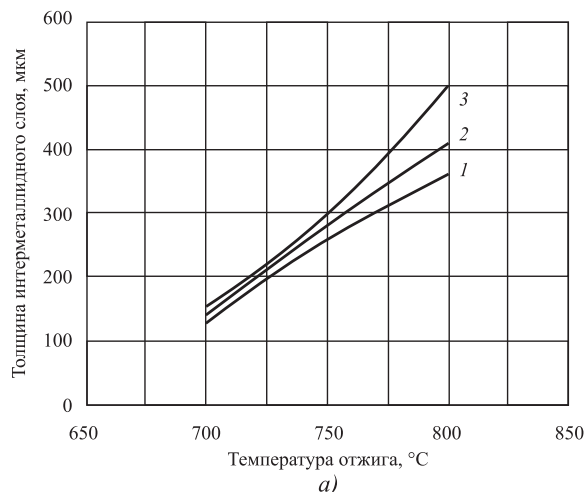


Рис. 2. Зависимость толщины интерметаллидного слоя от температуры отжига образцов из сталей 20 (а) и 12Х18Н10Т (б) при различной выдержке: 1 — 1 ч; 2 — 2 ч; 3 — 5 ч

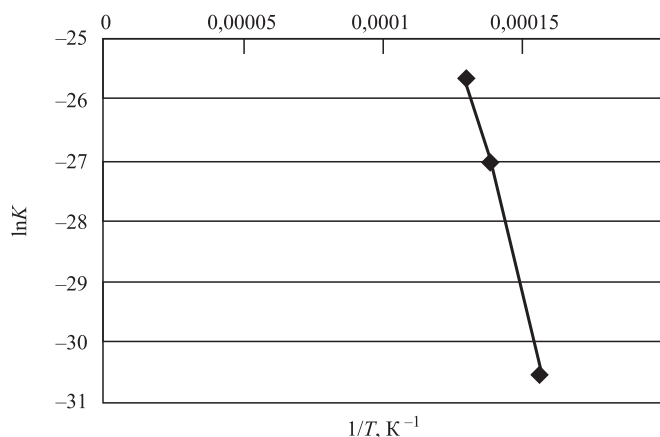


Рис. 4. Зависимость $\ln K = f(1/T)$ при отжиге образцов сталь 20—алюминий А5 при температурах 500...650 °С

является фазой Fe_2Al_5 [6, 7]. Со стороны алюминия формируется слой незначительной толщины 1...2 мкм, соответствующий химическому составу интерметаллида $FeAl_3$ (рис. 3, а, см. обложку).

При диффузионном отжиге высоколегированной стали также наблюдается двухслойный отожженный интерметаллидный слой. Со стороны стали формируется плоский слой. Между слоями практически на всех образцах наблюдалась продольная трещина (рис. 3, б, см. обложку).

На основе полученных данных и данных работы [5] была определена закономерность роста переходного слоя.

Закон роста интерметаллидного слоя имеет параболический характер [8]:

$$x^2 = Kt, \quad (1)$$

где x — толщина слоя; K — коэффициент, пропорциональный коэффициенту диффузии; t — время нагрева.

Из уравнения Аррениуса:

$$K = K_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right). \quad (2)$$

Значения энергии активации Q и K_0 определяются по зависимости $\ln K = f(1/T)$, построенной по экспериментальным данным (рис. 4).

Исходя из этого, закон роста интерметаллидного слоя при температурах отжига 500...650 °С можно записать следующим образом:

$$x^2 = 0,023 \exp\left(-\frac{152\,100}{RT}\right)t.$$

Аналогично были определены значения Q и K_0 при росте интерметаллидного слоя в интервале температур 700...800 °С и для образцов из стали 12Х18Н10Т, покрытых алюминием.

Таким образом, в интервале температур 700...800 °С закон роста интерметаллидного слоя в системе сталь 20—А5 будет иметь вид:

$$x^2 = 1,2 \cdot 10^{-4} \exp\left(-\frac{135\,700}{RT}\right)t.$$

Для образцов из стали 12Х18Н10Т, покрытых алюминием, кинетику роста можно описать следующими уравнениями:

$x^2 = 7,3 \cdot 10^{-11} \exp\left(-\frac{31\,700}{RT}\right)t$ при отжиге в интервале температур 500...650 °С;

$x^2 = 8,3 \cdot 10^{-10} \exp\left(-\frac{54\,200}{RT}\right)t$ при отжиге при температурах 700...850 °С.

Выводы

1. Проведенные исследования показали, что диффузионный отжиг стали с алюминиевым покрытием при температурах выдержки более 700 °С позволяет получать на стали 20 интерметаллидный слой системы Fe_2Al_5 .

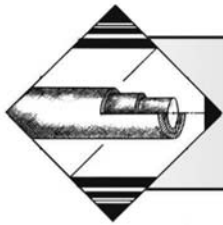
2. При отжиге стали 20 при температуре 800 °С на поверхности подложки формируется единое интерметаллидное покрытие.

3. На поверхности стали 12Х18Н10Т формируется двухслойная интерметаллидная прослойка, состоящая из фаз $FeAl_3$ и Fe_2Al_5 . Однако в покрытии присутствуют значительное количество окисных включений и продольная трещина.

4. Определены закономерности роста переходного слоя при диффузионном отжиге стали 20 и высоколегированной стали 12Х18Н10Т с напыленным алюминиевым покрытием в интервалах температур 500...650 и 700...800 °С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Рябов В.Р.** Алитирование стали. М.: Metallurgia, 1973. 239 с.
2. **Борисенок Г.В., Васильев Л.А., Ворошнин Л.Г. и др.** Химико-термическая обработка металлов и сплавов: справочник. М.: Metallurgia, 1981. 424 с.
3. **Кудинов В.В., Бобров Г.В.** Нанесение покрытий напылением. Теория, технология и оборудование / В.В. Кудинов: учебник для вузов. М.: Metallurgia, 1992. 432 с.
4. **Хасуй А., Моригаки О.** Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
5. **Ковтунов А.И., Нестеренко И.С.** Исследование процессов алитирования стали газопламенным напылением с последующим диффузионным отжигом // Современные технологии в машиностроении: сб. ст. 2019. С. 45—49.
6. **Лякишев Н.П.** Диаграммы состояния двойных металлических систем: справочник. В 3 т. Т. 1 / под общ. ред. Н.П. Лякишева. М.: Машиностроение, 1996. 992 с.
7. **Кубашевски О.** Диаграммы состояния двойных систем на основе железа / пер. с англ. М.: Metallurgia, 1985. 184 с.
8. **Рябов В.Р.** Сварка плавлением алюминия со сталью. Киев: Наукова думка, 1969. 231 с.



А.М. Некрылов, Г.А. Сухочев, А.О. Родионов
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: suhotchev@mail.ru

Исследование режимов упрочняющей обработки межлопаточных каналов деталей роторной группы

Рассмотрены новые методы комбинированной отделочно-упрочняющей обработки лопаточных деталей насосного оборудования: виброэкструзионное шлифование; обработка микрошариками струйно-динамическим методом в слабо проводящей газожидкостной среде. Показаны возможности данного метода, описан принцип действия оборудования для реализации технологии.

Ключевые слова: виброобработка, поверхностная микротвердость, виброэкструзионная обработка, межлопаточный канал, отделочно-упрочняющая обработка.

New methods of combined finishing and strengthening treatment of bladed parts of the pump equipment: vibration grinding, processing by the microspheres by jet-dynamic method in weakly conducting gas-liquid environment are considered. The capabilities of the this method are shown, the operation principle of equipment for the implementation of such technology is described.

Keywords: vibrating processing, surface microhardness, vibroexcitation processing, blade channel, finishing and strengthening treatment.

Для упрочнения профильных поверхностей каналов с просветом менее 10 мм и углом видимости наиболее труднодоступных поверхностей $\varphi_{\max} < 45^\circ$ потребовалось исследование специального способа, сочетающего достоинства различных кинематических схем движения непрофилированного инструмента, обеспечивающего комбинированное воздействие на обрабатываемую поверхность.

Одним из них является способ, объединяющий процессы вибрационной и экструзионной обработки, который заключается в продавливании гранулированной части рабочей среды через межлопаточные каналы детали типа турбина в условиях низкочастотной вибрации [1]. Обрабатываемую деталь закрепляют внутри цилиндрического контейнера с гранулированной рабочей средой, которому во время обработки сообщают колебания от платформы вибромашины и периодические повороты на пол-оборота вокруг горизонтальной оси относительно исходного вертикального или почти вертикального положения осей контейнера и детали. При этом осуществляется периодическое возвратно-поступательное перемещение рабочей среды в каналах детали.

Обработка поверхностей сквозных каналов в детали происходит в процессе вибрационного движения через них рабочей среды под действием силы тяжести и перепада динамического давления в рабочей среде по длине каждого канала. Перепад динамического давления равен динамическому давлению на входе рабочей среды в каналы.

Исследование влияния режимов виброэкструзионной обработки на показатели качества поверхностей межлопаточного канала проводили с помощью экспериментального устройства (рис. 1) для исследования процесса отделки и упрочнения поверхностей имитатора межлопаточного канала нагруженной детали транспортных машин, а также открытых поверхностей таких деталей. Основным элементом устройства — закрепленный в корпусе имитатор детали, представляющий собой две бобышки, зазор между которыми имеет вид щелевого канала (рис. 2), все стенки которого плоские. Бобышки выполнены сменными, что позволяет изменять геометрические параметры канала. На продольных поверхностях канала (в соответствующих впадинах, необходимых для сохранения плоскостности поверхностей),

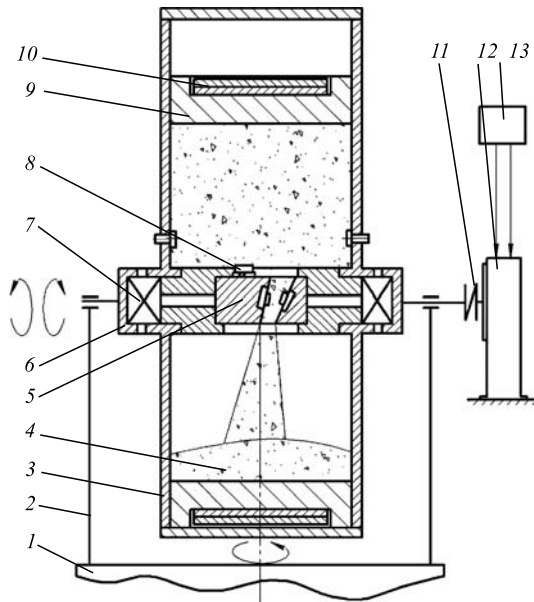


Рис. 1. Обобщенная схема устройства для экспериментальной комбинированной виброэкструзионной обработки имитатора межлопаточного канала:

1 — платформа вибромашины; 2 — опора подшипниковая; 3 — контейнер; 4 — среда рабочая гранулированная; 5 — имитатор; 6 — корпус поворотный; 7 — подшипник радиально-упорный; 8 — образец; 9 — вкладыш; 10 — пригруз; 11 — муфта упругая; 12 — привод поворотов контейнера; 13 — блок управления

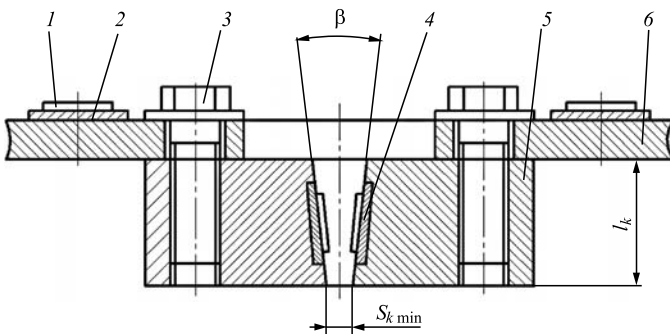


Рис. 2. Схема имитатора межлопаточного канала:

1 — прижим; 2 — образец плоский, смонтированный на открытой поверхности имитатора; 3 — болт крепления; 4 — образец плоский, смонтированный в канале имитатора; 5 — бобышка; 6 — пластина

а также на открытой поверхности имитатора прижимами закрепляются плоские образцы из различных материалов 8.

Цель эксперимента — определение зависимости показателей качества отделочно-упрочняющей виброэкструзионной обработки (параметра шероховатости Ra обработанной поверхности, глубины и степени ее наклепа, величины остаточных напряжений сжатия) открытых поверхностей и поверхности двух зон имитатора межлопаточного

канала, т.е. поверхностей закрепляемых в контейнере плоских образцов, от режима виброэкструзионной обработки, времени обработки, геометрических характеристик имитатора межлопаточного канала, физико-механических характеристик материала и исходной шероховатости обрабатываемых поверхностей.

При проведении эксперимента сохраняли постоянными минимальные межлопаточное расстояние ($S_{k \min} = 6$ мм) и минимальную площадь поперечного сечения канала ($F_{k \min} = 360$ мм², при протяженности канала $b_k = 60$ мм). Высота имитатора детали, отражающая длину проекции оси канала на главную ось детали, составляла 30 мм. В качестве гранул рабочей среды использовали стальные шарики диаметром 2,5 мм, имеющие насыпную плотность 4700 кг/м³. Номинальные размеры образцов 70×20×1,2 мм. Исходный параметр шероховатости их поверхностей $Ra_{\text{исх}} = 0,4$ мкм.

Высоту столба рабочей среды над поверхностью имитатора в его рабочем положении в каждом цикле процесса обработки изменяли от 150 до 50 мм, при этом насыпной объем виброэкструдированной через канал рабочей среды составлял $1,12 \cdot 10^{-3}$ м³, площадь поперечного сечения столба — 11 200 мм². В эксперименте использовали вкладыш массой 3,4 кг для поджимания убывающего в процессе виброэкструдирования объема гранул, статическое давление которого на столб рабочей среды составляло 0,003 МПа.

Обработку осуществляли при частоте колебаний контейнера $f = 20$ Гц ($\omega = 125,6$ с⁻¹) и при расположенной в вертикальной плоскости эллиптической траектории колебаний. Для обработки использовали типовые плоские образцы из стали У8А ($\sigma_T = 1400$ МПа, $HV = 4500$ МПа). Целевые параметры эксперимента:

$Y_1 = Z_{061}$ — прогиб образца, находящегося на открытой поверхности имитатора межлопаточного канала;

$Y_2 = Z_{062}$ — прогиб образца, находящегося в канале слева;

$Y_3 = Z_{063}$ — прогиб образца, находящегося в канале справа;

$Y_4 = v_{u1}^*$ — условная средняя скорость истечения рабочей среды через имитатор межлопаточного канала.

Прогибы образцов, образованные в результате отделочно-упрочняющей обработки, определяли измерением их действительного прогиба на прогибомере специальной конструкции [1] и последующим приведением действительного прогиба к величине прогиба, соответствующего номинальным размерам типового плоского образца.

Варьируемые факторы и их натуральные и кодированные уровни

| Варьируемый фактор | Обозначение | Код | Уровни факторов | | | Интервал варьирования |
|--|--------------------|-------|-----------------|--------|--------|-----------------------|
| | | | + | – | + | |
| Время обработки в положении I, мин | t_1 | x_1 | 60 | 45 | 30 | 15 |
| Угол сужения канала, ° | β | x_2 | 20 | 15 | 10 | 5 |
| Вертикальная составляющая амплитуды колебаний детали, м | $A_{\text{ду}}$ | x_3 | 0,0038 | 0,003 | 0,0022 | 0,0008 |
| Статическое давление вкладыша на столб гранул, МПа | $P_{\text{вк.ст}}$ | x_4 | 0,003 | 0,0015 | 0 | 0,0015 |
| Угол наклона оси канала к открытой поверхности имитатора канала, ° | α | x_5 | 90 | 75 | 60 | 15 |
| Параметр исходной шероховатости обрабатываемой поверхности, мкм | $Ra_{\text{исх}}$ | x_6 | 1,7 | 1,05 | 0,4 | 0,65 |

Условную среднюю скорость истечения рабочей среды через имитатор межлопаточного канала в каждом из его рабочих положений определяли замерами объемного расхода при этом истечении. Варьируемые факторы и их натуральные и кодированные уровни приведены в табл. 1. Зависимость каждого из целевых параметров совокупности варьируемых факторов представлена в виде уравнения:

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_4x_4 + b_5x_5 + b_6x_6 + b_{23}x_2x_3.$$

После вычисления коэффициентов этого уравнения по полученным экспериментальным данным и исключения незначимых коэффициентов уравнения регрессии для целевых параметров принимают вид:

$$y_1 = 0,33 + 0,046x_1 + 0,096x_3 - 0,071x_6; \quad (1)$$

$$y_2 = 0,2 + 0,034x_1 + 0,081x_3 + 0,049x_5 - 0,036x_6; \quad (2)$$

$$y_3 = 0,24 + 0,031x_1 + 0,084x_3 - 0,061x_6; \quad (3)$$

$$y_4 = 0,12 - 0,014x_2 + 0,011x_4 + 0,011x_5. \quad (4)$$

По абсолютным величинам коэффициентов уравнений (1)–(3) можно сделать вывод о том, что на величину прогиба образцов наибольшее влияние оказывает вертикальная составляющая амплитуды колебаний $A_{\text{ду}}$. Кроме того, на величину прогиба образцов влияют время обработки имитатора, размер микроуглублений на поверхности и параметр исходной шероховатости обрабатываемых поверхностей. На параметр Y_2 влияет также угол наклона продольной оси канала к плоскости имитатора детали α , что объясняется наиболее "затененным" положением 2-го образца по отношению к столбу рабочей среды.

Статическое давление вкладыша на столб рабочей среды $P_{\text{вк.ст}}$ и угол сужения канала β на величину прогиба образцов существенного влияния не оказывают. Это можно объяснить тем, что для принятых уровней фактора (вертикальная составляющая амплитуды колебаний детали $A_{\text{ду}}$) и частоте колебаний 20 Гц режимы обработки далеки от оптимальных: ускорение $W_{\text{ду max}} = 34,71 \text{ м/с}^2$ при $x_3 = -1$ ($A_{\text{ду}} = 0,0022 \text{ м}$); $W_{\text{ду max}} = 59,95 \text{ м/с}^2$ при $x_3 = 1$ ($A_{\text{ду}} = 0,0038 \text{ м}$). Абсолютные величины коэффициентов уравнения (4) показывают, что условная средняя скорость истечения рабочей среды через канал в наибольшей степени зависит от величины β и в меньшей степени от $P_{\text{вк.ст}}$ и α .

При времени обработки t_1 в направлении сужения канала после перехода от кодированных к натуральным значениям факторов уравнения регрессии (1)–(4) принимают вид:

$$Z_{\text{об1}} = -0,05 + 0,003t_1 + 120A_{\text{ду}} - 0,11Ra_{\text{исх}}; \quad (5)$$

$$Z_{\text{об2}} = -0,38 + 0,002t_1 + 101A_{\text{ду}} + 0,003\alpha - 0,06Ra_{\text{исх}}; \quad (6)$$

$$Z_{\text{об3}} = -0,07 + 0,002t_1 + 105A_{\text{ду}} - 0,09Ra_{\text{исх}}; \quad (7)$$

$$v_{\text{ul}}^* = 0,096 + 0,0007\alpha - 0,0028\beta + 7,333P_{\text{вк.ст}}. \quad (8)$$

На рис. 3 показан полученный из уравнений (5)–(7) график зависимости прогиба образцов от их расположения, вертикальной составляющей амплитуды колебаний имитатора детали и параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей при $t_1 = 60$ мин и $\alpha = 90^\circ$. Из этого графика видно, что увеличение амплитуды колебаний ведет не только к увеличению прогиба различно расположенных образцов, но и к увеличению соотношений прогибов $\frac{Z_{\text{об2}}}{Z_{\text{об1}}}$ и $\frac{Z_{\text{об3}}}{Z_{\text{об1}}}$, т.е. к повышению равномер-

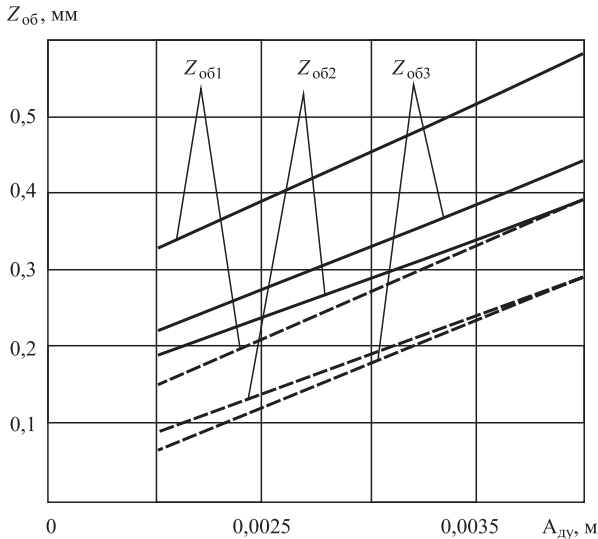


Рис. 3. График зависимости прогиба типовых плоских образцов из стали У8А от их расположения, вертикальной составляющей амплитуды колебаний и параметра шероховатости обрабатываемых поверхностей при $t_1 = 60$ мин и $\alpha = 90^\circ$:

— при $Ra_{исх} = 0,4$ мкм; - - - - при $Ra_{исх} = 1,6$ мкм

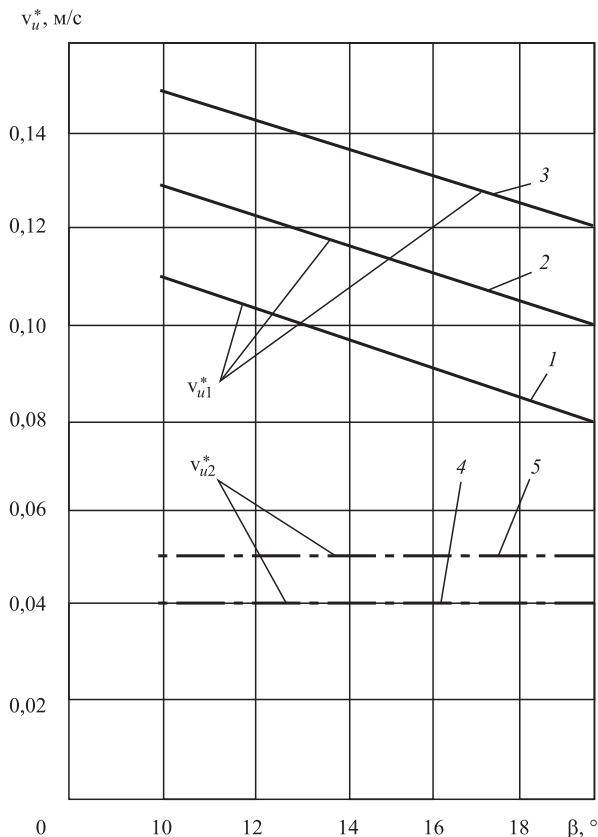


Рис. 4. Зависимость условной средней скорости истечения рабочей среды от угла раскрытия канала:

1, 2, 3 — скорость истечения рабочей среды через имитатор межлопаточного канала без вкладыша для углов раскрытия 10, 15 и 20° соответственно; 4, 5 — скорость истечения рабочей среды через имитатор межлопаточного канала для углов раскрытия 10 и 20° при наличии вкладыша

ности упрочнения обрабатываемых поверхностей имитатора детали. По данным графика, указанные соотношения при $A_{ду} = 0,0038$ м составляют 0,68...0,75 и характеризуют высокую равномерность виброэкструзионной обработки имитатора детали с такими геометрическими параметрами канала. При этом параметр средней шероховатости обработанных поверхностей составлял: на открытой поверхности имитатора — $Ra_1 = 0,12...0,18$ мкм, на поверхностях канала — $Ra_2 \approx Ra_3 = 0,15...0,22$ мкм.

Для сравнения был проведен дополнительный эксперимент, в котором имитатор детали обрабатывали обычным способом виброобработки и почти в тех же условиях, что и при виброэкструзионной обработке (для этого канал снизу был закрыт стальной пластиной, а вся рабочая среда в процессе обработки находилась в вышерасположенной плоскости контейнера, над имитатором детали и в полости канала). Обработку проводили в течение 60 мин при амплитуде $A_{ду} = 0,0038$ м, $\alpha = 90^\circ$, $P_{вк.ст} = 0$ и $Ra_{исх} = 0,4$ мкм. В двух опытах (при трех повторных опытах) для $\beta = 10^\circ$ и $\beta = 20^\circ$ получили результаты, характеризующие интенсивность и равномерность обработки имитатора детали:

— при $\beta = 10^\circ$: $Z_{об1} = 0,62$ мм; $Z_{об2} \approx Z_{об3} = 0,08$ мм;

$\frac{Z_{об2}}{Z_{об1}} \approx \frac{Z_{об3}}{Z_{об1}} = 0,13$; $Ra_1 = 0,13...0,16$ мкм; $Ra_2 \approx Ra_3 = 0,34...0,38$ мкм;

— при $\beta = 20^\circ$: $Z_{об1} = 0,62$ мм; $Z_{об2} \approx Z_{об3} = 0,13$ мм;

$\frac{Z_{об2}}{Z_{об1}} \approx \frac{Z_{об3}}{Z_{об1}} = 0,21$; $Ra_1 = 0,13...0,16$ мкм; $Ra_2 \approx Ra_3 = 0,31...0,35$ мкм.

Влияние величин α , β , и $P_{вк.ст}$ на условную среднюю скорость истечения рабочей среды через канал, соответствующую зависимости (8), графически показано на рис. 4. Из графика видно, что существовавшая ранее гипотеза о независимости объемного расхода через межлопаточные каналы детали от дополнительного механического воздействия на столб рабочей среды экспериментом не подтверждается.

Влияние такого воздействия, характеризуемого, в частности, величиной $P_{вк.ст}$, на объемный расход и скорости истечения рабочей среды через канал имитатора детали можно объяснить тем, что усиление этого воздействия повышает динамическую плотность вибрирующей рабочей среды за счет сжатия объема, занимаемого рабочей средой в вышерасположенной полости контейнера. Учитывая, в соответствии с выражением (5), линейность зависимостей $Z_{об1} = f_1(v_{уд})$ (где $v_{уд}$ — скорость соударений) и условия обработки поверхностей имитатора детали в данном эксперименте при $A_{ду} = 0,0022$ м и $A_{ду} = 0,038$ м, можно определить

линейную зависимость $Z_{об1} = Z_{об} = f(N_k)$, справедливую для обычных условий виброобработки, т.е. при постоянном значении контактной силы N_k и максимальной скорости динамического соударения $v_{ду\max}$. Для этого определили следующие характеристики взаимодействия обрабатываемых поверхностей и столба рабочей среды в условиях данного эксперимента:

— при $A_{ду} = 0,0022$ м: $W_{ду\max} = 34,71$ м/с², $v_{ду\max} = 0,28$ м/с, $\omega t_{уд} = 302^\circ$, $Y_{уд} = -0,0019$ м, $v_{уд} = 0,43$ м/с, $N_{k\text{ ст max}} = 1844,4$ Н, $N_{k\text{ ст min}} = 824,4$ Н, $P_{y\text{ max}} = 0,99$ МПа, $P_{y\text{ min}} = 0,44$ МПа, $N_{k\text{ max}} = 5,34$ Н, $N_{k\text{ min}} = 2,37$ Н, $k_N = 0,85$;

— при $A_{ду} = 0,0038$ м: $W_{ду\max} = 59,95$ м/с², $v_{ду\max} = 0,48$ м/с, $\omega t_{уд} = 338^\circ$, $Y_{уд} = -0,0014$ м, $v_{уд} = 0,76$ м/с, $N_{k\text{ ст max}} = 2978,8$ Н, $N_{k\text{ ст min}} = 1958,8$ Н, $P_{y\text{ max}} = 1,60$ МПа, $P_{y\text{ min}} = 1,05$ МПа, $N_{k\text{ max}} = 8,63$ Н, $N_{k\text{ min}} = 5,66$ Н, $k_N = 0,91$,

где $\omega t_{уд}$ — фазовый угол соударений столба рабочей среды и поверхностей образцов;

$Y_{уд}$ — координата соударений;

N_k — нормальная контактная сила воздействия шарообразной гранулы d_r рабочей среды на обрабатываемую поверхность;

P_y — вертикальная составляющая динамического давления столба обрабатывающей гранулированной среды;

k_N — коэффициент стабильности силового воздействия гранул рабочей среды на обрабатываемые поверхности.

Характеристики силового воздействия рабочей среды на обрабатываемые поверхности при обычных условиях виброобработки, эквивалентные этим характеристикам при виброэкструзионной обработке, можно получить, используя соотношения:

$$P_{y\text{ экв}} = P_y = k_N^2 P_{y\text{ max}}; N_{k\text{ экв}} = N_k = k_N^2 N_{k\text{ max}}. \quad (9)$$

С учетом (5) и (9), при $t_{упр} = t_1 = 60$ мин и $Ra_{исх} = 0,4$ мкм, имеем:

— при $A_{ду} = 0,0022$ м: $P_y = 0,71$ МПа, $N_k = 3,84$ Н, $Z_{об} = 0,35$ мм;

— при $A_{ду} = 0,0038$ м: $P_y = 1,33$ МПа, $N_k = 7,16$ Н, $Z_{об} = 0,54$ мм.

Теперь можно получить зависимости прогибов образцов от P_y и N_k :

$$Z_{об} = 0,13 + 0,307P_y = 0,13 + 0,057N_k = 0,057(2,28 + N_k), \quad (10)$$

из которых зависимость $Z_{об} = f(N_k)$ можно считать справедливой при использовании шарообразных гранул рабочей среды различных диаметров.

Численный и графический анализ уравнения (5) позволяет получить частные линейные зависимости прогибов образцов от других факторов:

— при $A_{ду} = 0,0038$ м и параметре исходной шероховатости $Ra_{исх} = 0,4$ мкм:

$$Z_{об} = 0,36 + 0,003t_{упр} = 0,003(120 + t_{упр}); \quad (11)$$

— при $A_{ду} = 0,0038$ м и времени упрочнения $t_{упр} = 60$ мин:

$$Z_{об} = 0,58 - 0,108Ra_{исх} = 0,108(5,37 - Ra_{исх}). \quad (12)$$

Используя частные линейные зависимости (10)–(12), можно получить обобщенную зависимость $Z_{об} = f(N_k, t_{упр}, Ra_{исх})$, определяющую величины прогибов типовых плоских образцов из стали У8А при различных условиях их обработки и при постоянной частоте колебаний $f = 20$ Гц:

$$Z_{об} = 63,7 \cdot 10^{-6}(2,28 + N_k)(120 + t_{упр})(5,37 - Ra_{исх}). \quad (13)$$

Учитывая взаимосвязь времени обработки и частоты колебаний, с которой она осуществляется, выражение (13) с учетом (9) можно представить справедливым для виброэкструзионной обработки поверхностей образцов с различными частотами колебаний в виде:

$$Z_{об} = 3,185 \cdot 10^{-6}(2,28 + k_N^2 N_{k\text{ max}}) \times (2400 + ft_{упр})(5,37 - Ra_{исх}) = 15,83 \cdot 10^{-6}(2,28 + k_N^2 N_{k\text{ max}})(2400 + ft_{упр}), \quad (14)$$

где единицы величин: $Z_{об}$ — мм, $N_{k\text{ max}}$ — Н, f — Гц, $t_{упр}$ — мин, $Ra_{исх}$ — мкм.

Цель второй части эксперимента — определение взаимосвязи показателей качества поверхностей виброобработанных в одинаковых условиях плоских контрольных образцов из стали У8А и имеющих такие же размеры образцов из других материалов, в частности, из тех, которые используются для изготовления натуральных деталей. Определяемые показатели качества поверхностей образцов: микротвердость, глубина и степень наклепа, остаточные напряжения, параметр шероховатости Ra .

Поверхностную микротвердость образцов определяли на микрошлифах глубиной 3...10 мкм и измеряли микротвердомером модели ПМТ-3 с нагрузкой 0,49 Н. Глубину и степень наклепа определяли путем измерения микротвердости на различных удалениях от поверхности (на наклонных шлифах) и сравнения ее с микротвердостью сердцевины образцов. Максимальные остаточные

Характеристика механических свойств и исходной шероховатости плоских образцов из различных материалов и расчетные характеристики условий и результатов их виброобработки

| Марка материала | Предел текучести σ_T , МПа | Твердость НВ | Микротвердость исходной поверхности, МПа | Параметр исходной шероховатости $Ra_{исх}$, мкм | Расчетное время упрочнения $t_{упр\ max}$, мин, max | Расчетная глубина наклепа a_n^p , мм, max | Расчетная степень поверхностной деформации ϵ_d^p , max | Расчетное изменение параметра шероховатости ΔRa_{max} , мкм, max |
|-----------------|-----------------------------------|--------------|--|--|--|---|---|--|
| У8А | 1400 | 4500 | 3500 | 0,40 | 268 | 0,057 | 0,015 | 0,04 |
| ВНЛ-1М | 940 | 3500 | 2500 | 0,10 | 127 | 0,081 | 0,022 | 0,09 |
| ВНЛ-6 | 1060 | 3800 | 2700 | 0,70 | 193 | 0,066 | 0,018 | 0,06 |
| ЖСЗДК | 850 | 3200 | 3100 | 0,12 | 112 | 0,086 | 0,023 | 0,11 |
| ВЖЛ-14 | 720 | 2600 | 2500 | 0,10 | 82 | 0,101 | 0,027 | 0,14 |
| ЭП741П | 820 | 3000 | 3500 | 0,10 | 102 | 0,091 | 0,024 | 0,12 |
| ВНС-25 | 850 | 2800 | 2400 | 0,15 | 109 | 0,088 | 0,024 | 0,11 |
| ВТ5-1КТ | 700 | 2400 | 2600 | 0,30 | 91 | 0,096 | 0,026 | 0,13 |

напряжения сжатия определяли расчетом по методике [2].

Виброобработку горизонтально расположенных плоских образцов из различных материалов проводили в следующих одинаковых условиях: $d_r = 2,5$ мм, $h_{ст} = 150$ м, $P_{вк.ст} = 0$, $f = 20$ Гц ($\omega = 125,6$ с⁻¹), $A_{ду} = 0,0045$ м, $v_{ду\ max} = 0,565$, $W_{ду\ max} = 70,99$ м/с². Фазовый угол соударений столба рабочей среды и поверхностей образцов $\omega t_{уд} = 346,5^\circ$, координата соударений $y_{уд} = -0,00105$ м, скорость соударений $v_{уд} = 0,88$ м/с. Динамическое давление рабочей среды и контактная сила воздействия ее гранул на поверхности образцов: $P_y = 1,82$ МПа, $N_k = 9,8$ Н. Параметр шероховатости гранул рабочей среды: $Ra_r = 0,2...0,6$ мкм. Соответствие характеристик механических свойств образцов из различных материалов, расчетные характеристики результата их обработки: максимальные глубина и степень наклепа, максимальные степень поверхностной пластической деформации, расчетное время виброупрочнения образцов в условиях данного эксперимента даны в табл. 2.

В результате анализа результатов эксперимента определено, что в пределах $t_{упр} = 40...80$ мин эффективность поверхностного упрочнения образцов является наибольшей и мало изменяющейся (увеличение в 2 раза времени обработки образцов из сплавов ВНЛ-6 и ЖСЗДК ведет к наибольшему, 10...15%-ному, увеличению их прогибов). При этом

значения параметра шероховатости поверхностей Ra всех образцов являются наименьшими и при $t_{упр} = 40$ мин, с увеличением времени обработки до 80 мин — возрастают, приближаясь к значениям параметра шероховатости гранул рабочей среды ($Ra_r = 0,2...0,6$ мкм). Исходя из этого, можно сделать предварительный вывод о том, что в условиях данного эксперимента оптимальное время поверхностного упрочнения плоских образцов из всех указанных выше материалов находится в пределах $t_{упр\ опт} = 30...50$ мин.

Полученные результаты позволили разработать инженерные рекомендации по назначению оптимальных режимов комбинированной обработки поверхностей нагруженных деталей транспортных машин, работающих в экстремальных условиях [3].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. RU 2173627 С2, МПК⁷ В 24 В 31/06. Способ вибрационной обработки / Г.А. Сухочев, А.В. Бондарь, А.В. Левченко // Открытия. Изобретения. 2001. № 26.
2. Сухочев Г.А. Управление качеством изделий, работающих в экстремальных условиях при нестационарных воздействиях. М.: Машиностроение, 2004. 287 с.
3. 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.



УДК 621.9.025

А.А. Верещака

(Московский государственный технологический университет "СТАНКИН",

В.П. Табаков

(Ульяновский государственный технический университет)

E-mail: vpt1947@yandex.ru

Исследование влияния архитектуры многослойного покрытия на работоспособность твердосплавного инструмента

Представлены результаты исследований влияния общей толщины и толщины нанослоев износостойкого слоя на работоспособность твердосплавного инструмента с многослойным покрытием.

Ключевые слова: многослойное покрытие, износостойкий слой, нанослой, работоспособность, твердосплавный инструмент.

The results of studies on the effect of the total thickness and thickness of the nanolayers of the wear-resistant layer on the serviceability of carbide tool with multilayer coating are presented.

Keywords: multilayer coating, wear-resistant layer, nanolayer, serviceability, carbide tool.

Введение

Применение многослойных покрытий существенно повышает работоспособность режущего инструмента [1, 2]. Эффективность таких покрытий во многом определяется их архитектурой — количеством и расположением функциональных слоев, их толщиной и составом. Влияние архитектуры на работоспособность режущего инструмента рассмотрено в работах [3–5]. Однако в данных работах исследована работоспособность режущего инструмента в зависимости от количества функциональных слоев покрытия, их состава и толщины. В последние годы разрабатываются многослойные покрытия с функциональными слоями, имеющими нанослойную структуру [6, 7], влияние которой на работоспособность режущего инструмента практически не изучено.

Цель работы — исследование влияния общей толщины и толщины нанослоев износостойкого слоя на работоспособность твердосплавного инструмента с многослойным покрытием.

Методика экспериментальных исследований

Исследовано многослойное композиционное наноструктурированное покрытие Ti—TiN—TiAlSiN. Покрытие наносили на твердосплавные пластины TiC—WC—Co на установке ВИТ-2 с использованием катодов из титана и литых катодов из сплава

алюминия и кремния, которые устанавливали на фильтрующую испарительную систему. Микроструктуру покрытий изучали с помощью растрового (сканирующего) электронного микроскопа (РЭМ) FEI Quanta 600 FEG с катодом полевой эмиссии и интегрированной приставкой энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора EDAX. Работоспособность твердосплавных пластин оценивали по периоду стойкости и пути резания при токарной обработке заготовок из стали 45 и криогенной стали AISI 321 (аналог — сталь 12X18H10T) при достижении износа по задней поверхности, равного 0,4 мм.

Результаты исследований и их обсуждение

Архитектура многослойного композиционного наноструктурированного покрытия включала в себя: адгезионный слой Ti, переходный слой TiN и износостойкий слой TiAlSiN, имеющий нанослойную структуру. Пример микроструктуры покрытия Ti—TiN—TiAlSiN представлен на рис. 1.

Исследовали влияние общей толщины износостойкого слоя и толщины его нанослоев на работоспособность твердосплавных пластин. Толщину износостойкого слоя TiAlSiN варьировали в пределах от 2,0 до 15,0 мкм при постоянных толщинах переходного слоя TiN и адгезионного слоя Ti, равных соответственно 1,5 мкм и 50 нм, толщину нанослоев — от 20 до 120 нм при толщине износостойкого слоя 5 мкм.

Установлено, что зависимости периода стойкости твердосплавных пластин от толщины износостойкого слоя носят экстремальный характер (рис. 2). Независимо от скорости резания период стойкости максимальный при толщине износостойкого слоя 5 мкм при обработке заготовок из стали 45 и 6...7 мкм — из стали AISI 321.

Исследования кинетики изнашивания пластин показали, что при малой толщине износостойкого слоя (2 и 3,5 мкм) происходит более интенсивное образование лунки износа на передней поверхности по сравнению с покрытием, имеющем толщину износостойкого слоя 5 мкм. Как видно из рис. 3 (см. обложку), за одно и то же время работы твердосплавных пластин большая величина лунки износа характерна для покрытия с меньшей толщиной износостойкого слоя. Кроме того, для покрытий с малой толщиной износостойкого слоя характерно меньшее время работы твердосплавных пластин до разрушения перемычки между режущей кромкой и лункой (рис. 4, см. обложку).

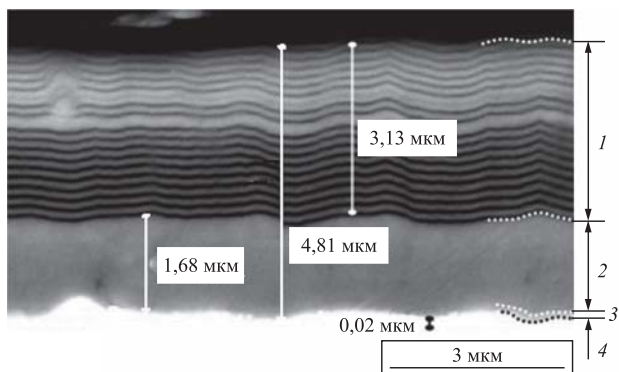


Рис. 1. Микроструктура поперечного шлифа покрытия Ti—TiN—(Ti, Al, Si)N:

1 — износостойкий слой; 2 — переходный слой; 3 — адгезионный слой; 4 — основа WC—TiC—Co

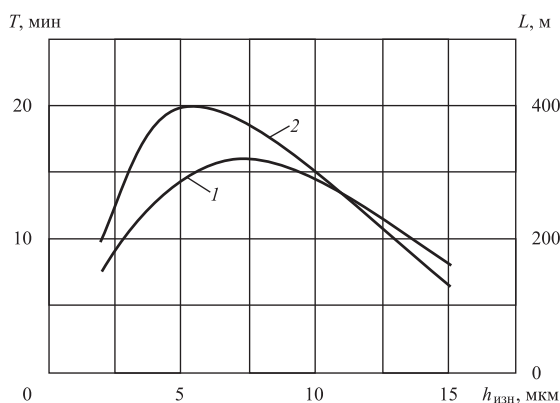


Рис. 2. Влияние толщины износостойкого слоя $h_{изн}$ на путь резания L (1) и период T стойкости (2) твердосплавных пластин с покрытием Ti—TiN—TiAlSiN при обработке заготовок из сталей AISI 321 ($v = 120$ м/мин) (1) и 45 ($v = 300$ м/мин) (2)

Для твердосплавных пластин с толщиной износостойкого слоя свыше 5 мкм на начальном этапе наблюдается более медленное развитие лунки износа. Однако с повышением времени работы данный процесс заметно интенсифицируется и размеры лунки износа становятся существенно больше по сравнению с твердосплавными пластинами, имеющими покрытие толщиной износостойкого слоя 5 мкм.

Установлено, что процесс разрушения покрытий на передней поверхности имеет одинаковый характер независимо от толщины износостойкого слоя. В то же время интенсивность данного процесса существенно выше для покрытий с износостойкими слоями, имеющими толщины меньше и больше 5 мкм.

Процесс разрушения покрытий начинается с образования в износостойком слое поперечных трещин. Поперечные трещины проходят через покрытие, выходят на границу покрытия с твердосплавной основой и "прорастают" в инструментальную основу. Пример сквозной поперечной трещины приведен на рис. 5, а (см. обложку). Движение поперечных трещин может тормозиться границами нанослоев и трещины, изменяя свое направление, трансформируются в наклонные (рис. 5, б, см. обложку). Изменение направления движения поперечных трещин на границах нанослоев может привести к формированию деламинаций (расслоений) между нанослоями износостойкого слоя (рис. 5, в, см. обложку). Формирование деламинаций и поперечных трещин активизирует процессы трещинообразования, что ведет к образованию сетки продольных и поперечных трещин (см. рис. 5, в), существенно ослабляющих покрытие.

Влияние толщины нанослоев износостойкого слоя TiAlSiN на период стойкости твердосплавных пластин при обработке заготовок из стали 45 показано на рис. 6.

Установлено, что максимальный период стойкости твердосплавных пластин наблюдается при толщине нанослоев износостойкого слоя порядка 40 нм независимо от скорости резания. Как видно из рис. 6, увеличение толщины нанослоев свыше 40 нм ведет к заметному снижению периода стойкости твердосплавных пластин. Уменьшение толщины нанослоев до 20 нм также снижает период стойкости, но в меньшей степени, особенно при работе на скорости резания $v = 300$ м/мин. Снижение периода стойкости твердосплавных пластин при толщине нанослоев свыше 40 мкм может быть связано с обширными деламинациями между нанослоями износостойкого слоя, приводящими к разрушению износостойкого слоя. Кроме того, дополнительным фактором может служить увеличение внутренних напряжений при большей толщине нанослоев. При слишком малой толщине нанослоев снижение периода стойкости может быть связано с утратой (исчезновением) эффекта нанослойности структуры

износостойкого слоя, что приведет к снижению эффективности покрытия в целом.

Эффективность многослойно-композиционного наноструктурированного покрытия с оптимальными толщинами износостойкого слоя и его нанослоев Ti—TiN—TiAlSiN (опт.) оценивали при токарной обработке заготовок из сталей 45 и AISI 321 в сравнении с пластинами без покрытия, с покрытиями TiN и Ti—TiN—TiAlSiN, с толщинами износостойких слоев 2,5 и 7 мкм при обработке заготовок из стали 45 и 2,5 и 11 мкм — из стали AISI 321.

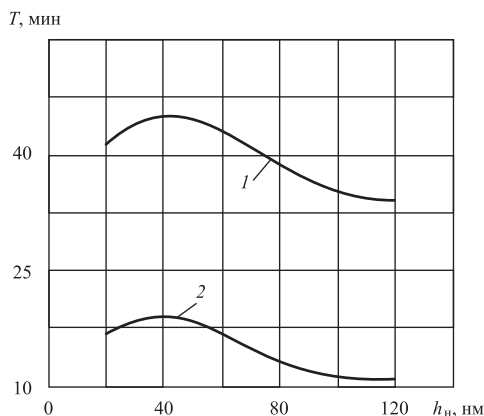


Рис. 6. Влияние толщины нанослоев h_n износостойкого слоя TiAlSiN на период стойкости T твердосплавных пластин при различных скоростях резания:

1 — 250 м/мин; 2 — 300 м/мин

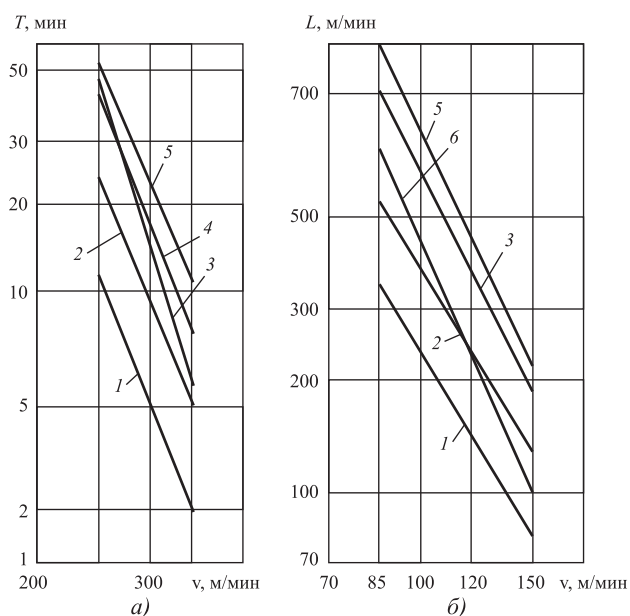


Рис. 7. Влияние скорости резания v на период стойкости T (а) и путь резания L (б) твердосплавных пластин при обработке заготовок из сталей 45 (а) и AISI 321 (б):

1 — без покрытия; 2 — TiN; 3 — Ti—TiN—TiAlSiN ($h_{изн} = 2,5$ мкм); 4 — Ti—TiN—TiAlSiN ($h_{изн} = 7$ мкм); 5 — Ti—TiN—TiAlSiN (опт.); 6 — Ti—TiN—TiAlSiN ($h_{изн} = 11$ мкм)

Результаты данных исследований представлены на рис. 7. Установлено, что применение многослойно-композиционного наноструктурированного покрытия с оптимальными толщинами слоев позволяет повысить период стойкости твердосплавных пластин в 2,7...5,4 раза по сравнению с пластинами без покрытия, в 1,4...2,2 раза — с покрытием TiN и в 1,1...2,2 раза — с покрытиями Ti—TiN—TiAlSiN, имеющими толщины износостойких слоев 2,5 и 11 мкм в зависимости от марки обрабатываемого материала и режима резания. При этом с увеличением скорости резания эффективность пластин с многослойно-композиционными наноструктурированными покрытиями с оптимальными толщинами возрастает.

Заключение

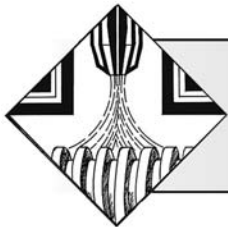
Установлено, что толщина износостойкого слоя и толщина его нанослоев оказывают влияние на изнашивание твердосплавных пластин и разрушение многослойного покрытия.

Выявлены толщины износостойкого слоя и его нанослоев, обеспечивающие максимальное повышение периода стойкости.

Показано, что применение многослойных композиционных наноструктурированных покрытий с оптимальными толщинами износостойкого слоя и его нанослоев позволяет повысить период стойкости твердосплавных пластин в 2,7...5,4 раза по сравнению с пластинами без покрытия, в 1,4...2,2 раза — с покрытием TiN в зависимости от условий резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Табаков В.П. Формирование износостойких ионно-плазменных покрытий режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2008. 311 с.
2. Верещака А.С., Ермолаев А.А. Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями. М.: Машиностроение, 1993. 336 с.
3. Табаков В.П., Ермолаев А.А. Многослойные покрытия инструмента, работающего в условиях непрерывного резания // СТИН. 2005. № 7. С. 21—25.
4. Табаков В.П., Циркин А.В. Применение многослойных покрытий для повышения работоспособности торцовых фрез // СТИН. 2005. № 1. С. 27—30.
5. Табаков В.П., Смирнов М.Ю., Циркин А.В. Многослойные износостойкие покрытия для повышения работоспособности торцовых фрез // Технология машиностроения. 2006. № 2. С. 28—30.
6. Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S. et al. Investigation of wear and diffusion processes on rake faces of carbide inserts with Ti—TiN—(Ti, Al, Si)N composite nanostructured coating // Wear 416—417 (2018) 72—80. DOI: 10.1016/j.wear.2018.10.004.
7. Vereschaka A., Tabakov V., Grigoriev S. et al. Effect of adhesion and the wear-resistant layer thickness ratio on mechanical and performance properties of ZrN—(Zr, Al, Si)N coatings // Surface & Coatings Technology 357 (2019) 218—234. DOI: 10.1016/j.surfcoat.2018.09.087.



УДК 621.315.612

И.А. Вербенко, Л.А. Резниченко, Е.В. Глазунова
(НИИ физики Южного федерального университета, г. Ростов-на-Дону)
E-mail: ilich001@yandex.ru

Сегнетоэлектрические среды со структурой типа перовскита как основа нового поколения мемристорных композитных материалов*

Представлен краткий обзор перспективных направлений создания керамических материалов с особыми электрофизическими свойствами как основы новых мемристорных технологий. Предложены новые экологически безопасные химические композиции. Описаны их основные преимущества и недостатки.

Ключевые слова: мемристоры, функциональные материалы, экологически безопасные технологии.

Brief review of promising areas of creation of ceramic materials with special electrophysical properties as the basis of new memristor technologies is presented. New environmentally safe chemical compositions are proposed. The main their advantages and disadvantages are described.

Keywords: memristors, functional materials, environmentally safe technologies.

Одним из наиболее перспективных направлений в развитии современного материаловедения является разработка, создание и внедрение экологически безопасных материалов [1], способных не просто выполнять свою функцию в антропогенных объектах, но и гармонично встроиться в существующие в природе круговороты химических элементов.

Переход к подобным технологиям предполагает комплексный подход, определяющий необходимость перестройки существующих устоявшихся производственных циклов, а также поиск новых решений, позволяющих заменить уникальность свойств опасных химических композиций использованием новых принципов структурирования материалов на нано- и мезоструктурном уровнях.

Ярким примером опасных с точки зрения экологии соединений, обладающих уникальными свойствами, безальтернативными для совре-

менной техники, являются свинецсодержащие пьезокерамики и, прежде всего, материалы на основе цирконата титаната свинца (ЦТС) [2]. Свинец, составляющий более 50 % мас. ЦТС, сравнительно легко проникает в окружающую среду и организм человека, активно накапливается ими. Большая часть соединений свинца токсична и обладает кумулятивным эффектом, постепенно разрушая внутренние органы человека, центральную нервную систему, стимулируя развитие онкологических заболеваний. Использование свинецсодержащих материалов способно резко снизить экологический класс любого технического решения. Стоит также отметить, что разработка новых технологий не может проходить без учета требований экологической безопасности, которые в недалеком будущем, вероятно, будут все больше ужесточаться и неизбежно приведут к снижению рентабельности опасных для природы и человека технологий. Тем не менее, несмотря на миллиарды долларов, вложенные в поиски альтернативных технологий, и огромные усилия, предпринятые научными коллективами по всему миру [2], система ЦТС остается основой подавляющего числа пьезоэлектрических преобразователей.

* Результаты получены в рамках выполнения государственного задания Минобрнауки России: проекты № 3.6371.2017/8.9, 3.6439.2017/8.9 с использованием оборудования ЦКП "Электромагнитные, электромеханические и тепловые свойства твердых тел" НИИ физики Южного федерального университета.

Перспективные соединения для создания экологически безопасных эффективных материалов — титанаты бария и стронция, а также их твердые растворы (BST) [3]. Последние не менее изучены, чем ЦТС, обладают высокими поляризационными свойствами, химической стабильностью в широком температурном интервале, а также совместимы с кремниевой технологией, преобладающей в современной полупроводниковой микроэлектронике. Использование малых химических добавок (модификаторов) позволяет существенно изменять электрофизические параметры BST-керамик, что может обеспечить расширение возможностей варьирования свойств низкоразмерных структур на их основе.

Особенно привлекательно использование сегнето- и магнитоактивных гетероструктур в качестве мемристоров — пассивных элементов, способных варьировать свое сопротивление в зависимости от протекающего через них заряда. Энергонезависимость, высочайшая емкость, природоподобие (работа мемристора напоминает работу синапса нервной системы, когда пропускная способность элемента возрастает с ростом интенсивности сигнала) мемристорной технологии делают ее одной из наиболее перспективных в электронике будущего.

Не меньшими возможностями для создания указанных структур могут обладать и представители другого «бесвинцового» семейства сегнетоэлектриков — ниобаты щелочных металлов [2]. Ограничения их промышленного применения во многом связаны с гидрофильностью исходных компонентов при синтезе, исключающей использование водных растворителей в технологическом процессе создания керамики. При переходе к пленочным технологиям это ограничение уже не столь существенно, как и несколько более слабый, чем в ЦТС, пьезоотклик. В то же время более значимыми могут оказаться преимущества ниобатных керамик — высокая скорость звука, возможность увеличения рабочих температур, склонность к образованию высокоанизотропных текстур, подвижность составляющих А-подрешетку низкорядных катионов щелочных металлов.

В последние годы все больше внимания уделяется перспективам совмещения различных, иногда взаимоисключающих свойств в одном объекте. Этой задаче в полной мере отвечают мультиферроики — вещества, сочетающие магнитное и сегнетоэлектрическое упорядочения. В этой связи важно изучение другого соединения со структурой перовскита — феррита висмута, практически единственного мультиферроика, обладающего достаточно высокими для практического применения температурами выше указанных упорядо-

чений. Феррит висмута обладает высокой удельной сегнетоэлектрической поляризацией, но при этом недостаточно химически устойчив, проявляет слабые диэлектрические свойства и, благодаря высоким коэрцитивной силе и электропроводности, практически не поддается поляризации в объемном состоянии. Одним из перспективных путей преодоления указанных трудностей может стать переход к низкоразмерным структурам.

В рамках проведенной работы в НИИ физики ЮФУ была разработана методика, позволяющая получить по обычной керамической технологии ряд бесвинцовых сегнетопьезокерамических материалов, которые ранее удавалось изготовить спеканием только с использованием горячего прессования или методов, применимых только в лабораторных условиях, — топохимического текстурирования и синтеза в плазменном разряде [4]. Ряд попыток получить аналогичную бесвинцовую керамику предприняты китайскими авторами, для чего ими использованы сложная схема модифицирования и различные методы дополнительной активации реагентов.

В ходе работы авторам удалось изготовить и изучить свойства следующих керамик:

— материалы на основе многокомпонентной системы $[(\text{Na}_{0,5}\text{K}_{0,5})_{1-x}\text{Li}_x](\text{Nb}_{1-y-z}\text{Ta}_y\text{Sb}_z)\text{O}_3$, в которых достигнуты следующие значения электрофизических параметров: диэлектрическая проницаемость $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 330$; коэффициент электромеханической связи $K_p = 0,34$; пьезомодуль $|d_{31}| = 58,3$ пКл/Н; механическая добротность $Q_M = 100$; скорость звука $v_1^E = 4,5$ км/с;

— высокоэффективные материалы типа ПКР-35 на основе системы $\text{NaNbO}_3\text{—LiNbO}_3$ (с практически нулевым уходом резонансной частоты) и ПКР-61 на основе LiNbO_3 (с рекордной рабочей температурой ≥ 1000 °С), с диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 155$, коэффициентом электромеханической связи $K_p = 0,19$, пьезомодулем $|d_{31}| = 11$ пКл/Н, скоростью звука $v_1^E = 5,5$ км/с и диэлектрической проницаемостью $\epsilon_{33}^T/\epsilon_0 = 48$, пьезомодулем $|d_{31}| = 3$ пКл/Н, коэффициентами электромеханической связи $K_p = 0,068$, $K_t = 0,31$ соответственно, для которых разработана серийная технология их производства без использования ГП.

Полученные в работе материалы можно использовать в высокочастотных акустоэлектрических преобразователях, ультразвуковых дефектоскопах и толщиномерах для неразрушающего контроля нагретых тел, расходомерах и датчиках контроля процессов, происходящих в различных энергетических установках [5], а также стать основой создания нового поколения мемристорных композитных материалов на базе сегнетоэлектриков со структурой типа перовскита.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **DIRECTIVE 2002/95/EC OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL** of 27 January 2003 on the restriction of the use of certain hazardous substances in electronic equipment // Official Journal of the European Union. 2003. № 37. P. 19—23.

2. **Вербенко И.А., Резниченко Л.А., Разумовская О.Н. и др.** Бессвинцовая пьезоэлектрическая керамика и экологически безопасная технология ее получения // Экология промышленного производства. 2007. Т. 4. С. 45—47.

3. **Хасбулатов С.В., Садыков Х.А., Половинкин Б.С. и др.** Оптимизация условий получения функциональных керамических материалов с участием титаната ба-

рия // Конструкции из композиционных материалов. 2016. № 4. С. 27—34.

4. **Li J.-F., Wang J.K., Zhang B.-P., Zhang L.-M.** Ferroelectric and Piezoelectric Properties of Fine-Grained $\text{Na}_{0.5}\text{K}_{0.5}\text{NbO}_3$ Lead-Free Piezoelectric Ceramics Prepared by Spark Plasma Sintering // J. Am. Ceram. Soc. 2006. Vol. 89. P. 706—709.

5. **Юрасов Ю.И.** Экологически чистый ультразвуковой датчик парковки и датчик детонации на основе бессвинцовых сегнетопьезоокерамик: сб. материалов Всероссийского семинара с международным участием "Радиационная и промышленная экология". 21—28 апреля 2016 г. Ростов-на-Дону, Таганрог, ЮФУ. 2016. С. 394—397.



ИЗДАТЕЛЬСТВО «ИННОВАЦИОННОЕ МАШИНОСТРОЕНИЕ»



МЕДЬ И МЕДНЫЕ СПЛАВЫ ОТЕЧЕСТВЕННЫЕ И ЗАРУБЕЖНЫЕ МАРКИ СПРАВОЧНИК

Осинцев О.Е., Федоров В.Н.

2-е изд., перераб. и доп. 2016. 360 с.

Цена 1300 руб.

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

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

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

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

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 03.07.2019 г. Подписано в печать 21.08.2019 г. Формат 60×88 1/8.

Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.

Отпечатано в ООО "Канцлер", 150008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49

Оригинал-макет: ООО "Авансед солюшнз". 119071, г. Москва, Ленинский пр-т, д. 19, стр. 1

Сайт: www.aov.ru