ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 11 (119)
ноябрь
2014

Издается с января 2005 г.

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

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

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

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

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

Редакция:
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: “Роспечать” **85159,** “Пресса России” **39269,** ″Почта России″ **60252)** или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Кокорин В.Н., Филимонов В.И., Григорьев А.А., Сизов Н.А., Кокорин А.В. Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей 3

Лебедев В.А., Ермолаев Г.В., Лой С.А., Матвиенко М.В. Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость 8

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Буглаев А.М. Повышение стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами алмазным выглаживанием 13

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Михальченков А.М., Соловьев С.А., Михальченкова М.А. Эффективность импортозамещающих технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей почвообрабатывающих орудий способом компенсирующих термоупрочненных элементов 17

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Латушкина С.Д., Куис Д.В., Жижченко А.Г., Посылкина О.И., Рудак П.В., Комаровская В.М. Вакуумно-плазменные защитные покрытия на дереворежущий инструмент 23

ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Жачкин С.Ю., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Михайлов В.В., Гедзенко Д.В., Пеньков Н.А. Антикоррозионная защита металла методом гальваноконтактного осаждения 29

Коренев В.Н. Обоснование микротвердости покрытий при напылении водородно-кислородным пламенем 31

Смоленцев В.П., Сафонов С.В., Грицюк В.Г. Проектирование технологического процесса электроискрового легирования и покрытия металлических изделий 36

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Леванцевич М.А., Белоцерковский М.А., Кукареко В.А., Белый А.В. Ионно-лучевое азотирование газотермических покрытий с плакированными слоями 42

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

© Издательство “Машиностроение”, “Упрочняющие технологии и покрытия”, 2014

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 11 (119)
November
2014

Since 2005, January

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

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

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

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

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

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

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159,** "Pressa Rossii" **39269,**"Pochta Rossii" **60252)** or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry Tele- and Broadcasting of Mass Communications Media. The certificate of registration ПИ № 77-17733, March 9, 2004

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Kokorin V.N., Filimonov V.I., Grigoriev A.A., Sizov N.A., Kokorin A.V. Theoretical study of the intensive seals heterophase mechanical mixtures 3

Lebedev V.A., Ermolaev G.V., Loy S.A., Matvienko M.V. Tense state of sprayed coating when tested on heat stability 8

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Buglayev A.M. Increase of firmness of dividing stamps with hard alloyed cutting elements by diamond burnishing 13

THERMAL PROCESSING

Mikhalchenkov A.M., Solovyov S.A., Mikhalchenkova M.A. The effectiveness of import-substituting technologies manufacturing, repair and hardening of details tillage machinery by the way of compensating heat-treated elements 17

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Latushkina S.D., Kuis D.V., Zhizhchenko A.G., Posylkina O.I., Rudak P.V., Komarovskaya V.M. Vacuum plasma protective wood-cutting tool coatings 23

CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Zhachkin S.Yu., Boldyrev A.I., Boldyrev A.A., Mihailov V.V., Gedzenko D.V., Penkov N.A. Anticorrosive protection of metal by galvanic contact plating method 29

Korenev V.N. Justification of microhardness coatings at hydrogen-oxygen flame spraying 31

Smolentsev V.P., Safonov S.V., Grizuk V.G. Technical process designing of metal items electrospark doping and coating 36

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Levantsevich M.A., Belotserkovskii M.A., Kukareko V.A., Byeli A.V. Ion-beam nitriding thermal coatings with clad layers 42

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

© "Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2014

УДК 621.726

[1]В.Н. Кокорин, [1]В.И. Филимонов, [2]А.А. Григорьев, [1]Н.А. Сизов, [1]А.В. Кокорин,
([1]Ульяновский государственный технический университет,
[2]Санкт-Петербургский государственный политехнический университет)
E-mail: vnkokorin@mail.ru

Теоретические исследования процесса интенсивного уплотнения гетерофазных механических смесей

Рассмотрены вопросы интенсификации процесса уплотнения гетерофазных механических смесей.
Ключевые слова: *уплотнение, порошок, схема нагружения, интенсификация процесса.*

The article presents the issues of process intensification intensive seals of mechanical heterophase mixtures.
Keywords: *seal, powder, loading scheme, the intensification process.*

Формование изделий из порошковых смесей в присутствии жидкой и газообразной фаз при сравнительно высоких давлениях, как указано в работе [1], происходит постадийно: компактирование, преимущественно упругое уплотнение, преимущественно пластическое уплотнение, локальное кавитационное разрушение, залечивание дефектов и консолидация структуры заготовки, что определяет интенсивное уплотнение и структурирование механических смесей. На последней стадии в зависимости от условий деформирования может иметь место разрыхление заготовки в зонах истечения материала без значительного внешнего сопротивления.

Компактирование порошка в присутствие жидкости (флюида)

Влияющие факторы и модельное представление. На данной стадии формования различие размеров и формы частиц порошка, условия заполнения пространства между ними жидкостью и воздухом, расположение частиц порошка относительно друг друга делают свойства деформируемой среды неопределенными. Задача состоит в приведении столь сложной ситуации к более простому представлению без существенной потери данных о свойствах указанной трехкомпонентной смеси, важных для процесса структурирования. Речь идет о выделении некоторого представительного элемента минимальных размеров, который бы отражал свойства полного объема деформируемой среды. При этом объем представительного элемента ΔV должен существенно превышать средний объем зерна порошкового материала $d_{ср}^3$:

$$\Delta V >> d_{ср}^3. \quad (1)$$

В формулу (1) не включен известный коэффициент, входящий в формулу для расчета объема шаровых тел.

Если условие (1) не обеспечивается, то изучение поведения материала можно проводить с использованием моделей дискретных тел, в которых контактирующие частицы рассматриваются как набор твердых или упругих тел различных формы и размера. Однако такое рассмотрение возможно лишь на начальном этапе деформирования. При этом наличие жидкости не позволяет рассматривать исходный материал как сыпучее вещество. Возникает необходимость учесть связность, т. е. представить исходную смесь в виде структурно связанного тела с гибкими связями, которые придают этой смеси следующее свойство [2]: наличие предельного напряжения сдвига, при превышении которого происходит разрушение структурной упорядоченности, причем превышение предельного напряжения сдвига в материале не может иметь места. Начало сдвига определяется внешней сдвигающей нагрузкой, которой отвечает соответствующее внутреннее предельное напряжение сдвига. Факторы, влияющие на предельное сопротивление сдвигу, представлены на рис. 1.

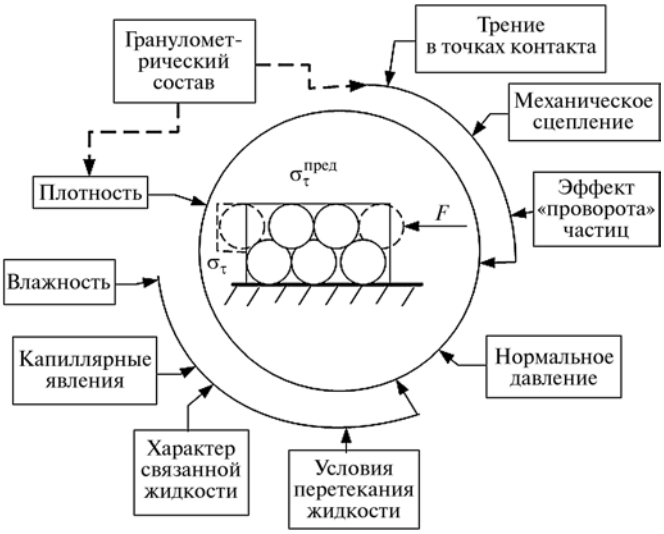


Рис. 1. Факторы предельного напряжения сдвига при компактировании [3]

Прессование в закрытой матрице

Напряжения в теле прессовки. Для установления закономерностей прессования в закрытой матрице рассмотрим матрицу цилиндрической формы (рис. 2). Используем метод прямого интегрирования. Примем следующие допущения:

1. Представительный элемент объема, образованный вертикальными плоскостями, расположенными эквидистантно от оси симметрии, деформируется в условиях плоской деформации.

2. Упрочнение материала не учитывается.

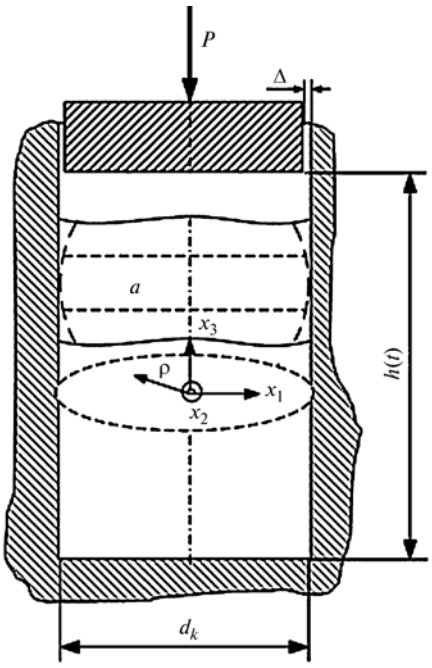


Рис. 2. Схема формовки порошковой смеси в матрице

3. Механические характеристики рассматриваемого массива не отличаются от тех же характеристик материала порошка.

4. Касательные напряжения являются функцией только координаты x_3.

5. На границах трение учитывается по закону трения Зибеля.

Для выделенного элемента *a* первое допущение позволяет записать

$$\sigma_{ij} \neq f(x_2) \Rightarrow \sigma_{12} = \sigma_{23} = 0. \qquad (2)$$

С учетом соотношений (2) уравнения равновесия можно представить в виде

$$\sigma_{11,1} + \sigma_{13,3} = 0;\ \sigma_{31,3} + \sigma_{33,3} = 0, \qquad (3)$$

где нижние индексы ,1 и ,3 означают дифференцирование по соответствующим координатам.

Применяя операторы дифференцирования ,1 и ,3 к первому и второму уравнениям (3) соответственно с последующим вычитанием второго уравнения из первого, получим

$$(\sigma_{11} + \sigma_{33})_{,13} + \sigma_{13,33} + \sigma_{31,11} = 0. \qquad (4)$$

Преобразуем условие пластичности с учетом второго допущения и условия (2) к виду

$$\frac{1}{\sqrt{2}}\sqrt{(\sigma_{11}-\sigma_{33})^2 + (\sigma_{11}-\sigma_{22})^2 + (\sigma_{22}-\sigma_{33})^2 + 6(\sigma_{13})^2} = \psi\sigma_s. \qquad (5)$$

С учетом первого допущения преобразование условия (5) приводит к следующей форме условия пластичности:

$$\sigma_{11} - \sigma_{33} = 2\sqrt{\frac{\psi^2(\sigma_3)^2}{3} - (\sigma_{13})^2}. \qquad (6)$$

При преобразованиях для получения уравнения (6) учтено, что у σ_{33} – отрицательный знак, причем модуль этого напряжения превышает значения других напряжений.

Подстановка условия пластичности (6) в уравнение (4) с учетом четвертого допущения дает

$$\sigma_{13,33} = 0. \qquad (7)$$

Интегрирование уравнения (7) приводит к решению

$$\sigma_{13} = C_1 + C_2 x_3, \qquad (8)$$

где C_1, C_2 – константы интегрирования, которые определяются из условий

$$\sigma_{13}(x_3 = 0) = 0;\ \sigma_{13}\left(x_3 = \frac{h}{2}\right) = \tau_k\,, \qquad (9)$$

где τ_k – контактное касательное напряжение.

Из соотношений (8) и (9) следует

$$\sigma_{13} = \frac{2\tau_k}{h} x_3\,. \qquad (10)$$

Подстановка (10) в (3) и интегрирование входящих в последнюю формулу уравнений дает решения

$$\sigma_{11} = -\frac{2\tau_k}{h} x_1 + \varphi_1(x_3)\,;\ \sigma_{33}(x_1) = \varphi_2(x_1), \qquad (11)$$

где $\varphi_1(x_3)$, $\varphi_2(x_1)$ – некоторые функции, подлежащие определению.

Подставляя решения (11) в условие пластичности (6) и разделяя функциональные зависимости по x_1 и x_3, получим

$$-\frac{2\tau_k}{h} x_1 - \varphi_2(x_1) = 2\sqrt{\frac{\psi^2(\sigma_3)^2}{3} - (\sigma_{13})^2} - \varphi_1(x_3)\,. \qquad (12)$$

Левая и правая части уравнения (12) зависят от разных аргументов, а в таком случае равенство обеих частей возможно лишь в случае, когда каждая из них равняется некоторой константе, например C. Выразив из этого условия функции $\varphi_2(x_1)$ и $\varphi_1(x_3)$ через константу C и подставив их в решения (11), получим

$$\sigma_{11} = -\frac{2\tau_k}{h} x_1 + 2\sqrt{\frac{\psi^2(\sigma_s)^2}{3} - \left(\frac{2\tau_k}{h} x_3\right)^2} + C\,;$$

$$\sigma_{13} = \frac{2\tau_k}{h} x_3\,; \qquad (13)$$

$$\sigma_{33} = -\frac{2\tau_k}{h} x_1 + C\,.$$

Ввиду осевой симметрии задачи выбор направления оси x_1 системы координат можно считать произвольным в плоскости, перпендикулярной оси симметрии, а потому напряжение σ_{33} из (13) можно представить в виде

$$\sigma_{33} = -\frac{2\tau_k}{h}\rho + C\,, \qquad (14)$$

а учитывая пятое допущение и полагая $\tau_k = -\sigma_s/2$, формулу (14) можно представить в виде

$$\sigma_{33} = \frac{\sigma_s}{h}\rho + C\,. \qquad (15)$$

Константу C в решении (15) можно найти из граничного условия

$$\sigma_\rho\left(\rho = \frac{d_k}{2}\right) = -\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\lambda\,, \qquad (16)$$

где λ – податливость пояска под зазором, зависящая от высоты прессовки, зазора между пуансоном и матрицей, условий увлажнения смеси, качества рабочих поверхностей технологического оснащения и толщины стенок матрицы.

В этом случае можно считать напряжения σ_{33} и σ_ρ главными. Тогда условие пластичности (5) трансформируется к виду

$$\sigma_\rho - \sigma_3 = \frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s\psi\,. \qquad (17)$$

Подставляя (15) в (17) и удовлетворяя граничному условию (16), определяем значение константы:

$$C = -\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\sigma_s(\psi + \lambda) + \frac{\sigma_s d_k}{2h}\right). \qquad (18)$$

С учетом значения константы (18) получим расчетную формулу для σ_3

$$\sigma_3 = -\sigma_s\left(\frac{2}{\sqrt{3}}(\psi + \lambda) - \frac{\rho - \frac{d_k}{2}}{h}\right). \qquad (19)$$

Таким образом, для каждой стадии деформирования (отслеживается по значению h) можно определить распределение напряжений по телу прессовки на основе формул (19) и (17).

Изменение плотности прессовки. Уравнение неразрывности для прессовки можно записать в виде

$$\rho_{,t} + (\rho\dot{u}_3)_{,3} = 0\,, \qquad (20)$$

где $\dot{u}_3$ – скорость деформации вдоль оси x_3; t – время.

Если $\rho \neq \rho(x_3)$, то дифференциальное уравнение (20) принимает вид уравнения с разделяющимися переменными

$$\frac{d\rho}{\rho} = -\frac{dh}{h}\,. \qquad (21)$$

При получении формулы (21) принято кинематически возможное поле скоростей [4]:

$$\dot{u}_3 = \mathrm{v}\frac{x_3}{h} = \frac{dh}{dt}\frac{x_3}{h}\,, \qquad (22)$$

где v – скорость движения инструмента.

Решение уравнения (22) представляется в виде

$$\rho = \frac{C}{h}\,. \qquad (23)$$

Здесь C – константа, определяемая из условия

$$\rho_1 = \frac{C}{h_1}\,, \qquad (24)$$

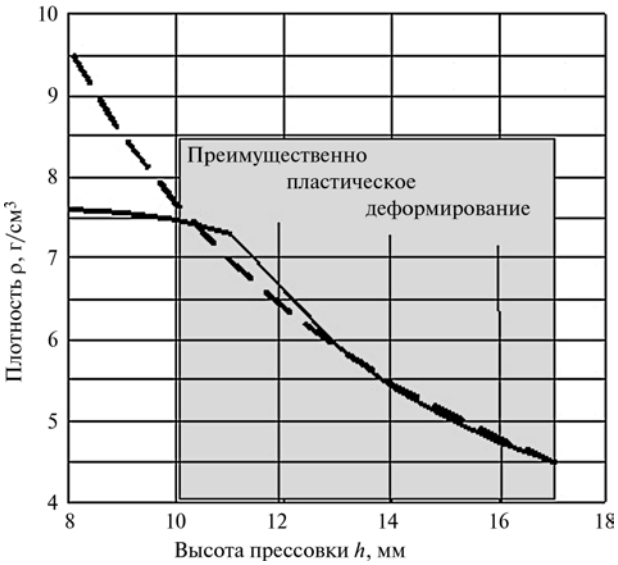


Рис. 3. Зависимость плотности от высоты прессовки:
----- расчет по формуле (25); —— эксперимент

где ρ_1, h_1 – значения плотности и высоты прессовки соответственно в конце первой стадии деформирования.

Из формул (23) и (24) получаем

$$\rho = \rho_1 \frac{h_1}{h}. \qquad (25)$$

Зависимость (25) достаточно хорошо коррелирует с аналогичной экспериментальной зависимостью (рис. 3) на стадиях преимущественно пластического деформирования. Экспериментальные данные для построения зависимости, приведенной на рис. 3, обработаны в среде MathCAD-2001Pro с использованием интерполяции кубическим сплайном с линейными функциями первых производных на концевых участках:

$$\rho_{эксп} = \mathrm{interp}(vs, vh, v\rho, h),\ vs = \mathrm{lspline}(vh, v\rho), \qquad (26)$$

где vh, $v\rho$ – массивы соответствующих экспериментальных данных; v, s – линейный сплайн экспериментальных данных.

Влияние схемы нагружения на интенсификацию процесса уплотнения

На рис. 4 представлена замкнутая полость с флюидом, подверженная дополнительному действию касательного напряжения, возникающего из-за изменения траектории движения материала. Радиус полости можно считать соизмеримым с радиусом первичного капилляра, а минимальную толщину стенки замыкающего металла – равной примерно четверти диаметра полости. Ввиду малости частиц можно считать $\varphi \approx \gamma$, где γ – угол наклона образующей конического участка матрицы.

Толщина стенки практически не влияет на распределение напряжений, но влияет на «схлопывание» полости при дальнейшем увеличении внешнего давления p_f или дальнейшей трансформации формы полости. При наличии касательного напряжения распределение напряжений в прилегающей области (сферической оболочке, наружный контур которой показан пунктиром на рис. 4) имеет вид

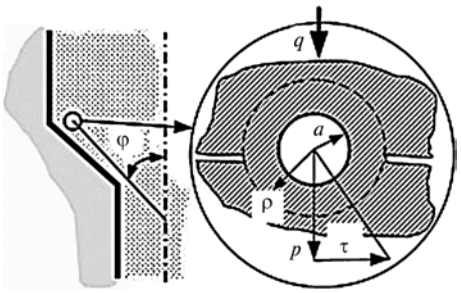


Рис. 4. Действие касательных напряжений на переходных участках

$$\frac{\tau_{\rho\varphi}}{k} = m\frac{a^2}{\rho^2};\quad \frac{\sigma_\rho}{2k} = -\frac{p}{2k} + \ln\left(\frac{\rho}{a}\right) + \frac{1}{2}\ln\left(\frac{1-\sqrt{1-m^2}}{1-\sqrt{1-m^2\frac{a^4}{\rho^4}}}\right) -$$

$$-\frac{1}{2}\left(\sqrt{1-m^2\frac{a^4}{\rho^4}} - \sqrt{1-m^2}\right), \qquad (27)$$

где $m = \mathrm{tg}\,\gamma$; a – радиус замкнутой области с флюидом.

На рис. 5 представлено распределение $\tau_{\rho\varphi}$ вокруг полости. Теоретическое предельное значение угла матрицы представляет собой величину $\gamma = 45°$ ($\tau_{\rho\varphi} = k$), в то время как экспериментальное значение – величину $\gamma = 55°$. При превышении этого угла возникают застойные зоны, в которых пористость будет существенно выше, чем

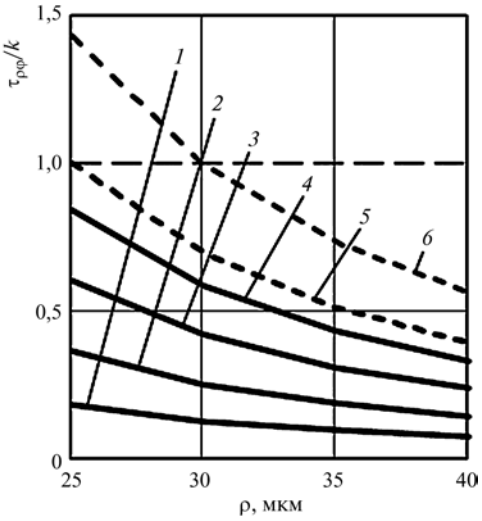


Рис. 5. Распределение относительных касательных напряжений вблизи полости:
1 – 6 – кривые, соответствующие значениям γ = 10; 20; 30; 40; 45; 55°; ------ значения γ = 45 и 55° – предельные теоретическое и экспериментальное значения угла матрицы

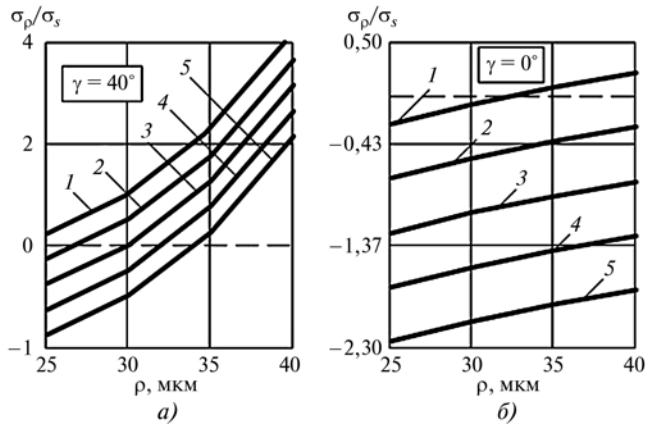


Рис. 6. Распределение относительных радиальных напряжений вблизи полости при различных схемах нагружения:
а – при наличии касательного напряжения; *б* – в отсутствие касательных напряжений; *1 – 5* – зависимости, соответствующие значениям нормального давления p = 100; 300; 500; 700; 900 МПа

даже в срединной части прессовки, где механизм сдвиговых деформаций макрообъема (типа указанного на рис. 4) отсутствует.

На рис. 6 приведены графики распределения радиальных напряжений при различных давлениях при $\gamma = 40°$ и $\gamma = 0°$ ($m = 0$). Из сравнения графиков хорошо видно, что в отличие от графиков, приведенных на рис. 6, *а*, во втором случае напряжения в областях, примыкающих к полости, принимают практически везде отрицательные значения. Это отличие можно также констатировать, анализируя вторую формулу (27). В отсутствие касательных напряжений распределение будет содержать только первые два слагаемых. Знакопеременный характер распределения радиальных напряжений и наличие касательных напряжений способствуют более легкому разрушению областей замыкания полости и отводу флюида. Вблизи стенок матрицы на это напряженное состояние накладывается также влияние контактных касательных напряжений, повышающих плотность прессовок (если только не образуются застойные зоны при завышенных углах конусности матрицы).

С другой стороны, известно, что плотность прессовки в ее центральной части выше, чем на периферийных участках. Поэтому суммарное распределение плотности в центральном продольном сечении прессовки будет иметь характер двугорбой кривой и будет более равномерным, чем в случае формовки в закрытой матрице. Кроме того, контрпуансон обеспечивает схему двустороннего прессования, повышающего равномерность распределения плотности по высоте.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Кокорин В.Н., Филимонов В.И.** Моделирование процесса уплотнения увлажненных порошков при значительных давлениях // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 11. С. 35–37.

2. **Теория** управления окомкованием сыпучих материалов / Е.А. Исаев, И.Е. Чернецкая, Л.Н. Крахт, В.С. Титов. Старый Оскол: ООО «ТНТ», 2004. 384 с.

3. **Кокорин В.Н., Филимонов В.И., Булыжев Е.М.** Научные основы интенсификации уплотнения металлических порошков. Ульяновск, УлГТУ, 2010. 217 с.

4. **Друянов Б.А.** Прикладная теория пластичности пористых тел. М.: Машиностроение, 1989. 168 с.

Поздравляем с юбилеем

ШУЛОВА ВЯЧЕСЛАВА АЛЕКСАНДРОВИЧА
доктора физ.-мат. наук, профессора,
члена редакционного совета нашего журнала.

Желаем юбиляру здоровья, благополучия, счастья и успеха
на поприще российского образования и науки!

Редакционный совет и редакция журнала
«Упрочняющие технологии и покрытия»

УДК 621.7

В.А. Лебедев *(ИЭС им.Е.О. Патона НАН Украины, г. Киев),*
Г.В. Ермолаев, С.А. Лой, М.В. Матвиенко *(Национальный университет кораблестроения, г. Николаев, Украина)*
E-mail: lebedevvladimir@ucr.net

Напряженное состояние напыленного покрытия при испытаниях на термостойкость

С использованием компьютерного моделирования и аналитического расчета выполнен анализ напряженного состояния при нагреве-охлаждении плоского образца с напыленным покрытием, имеющим меньший коэффициент линейного термического расширения, чем материал подложки. Установлена зависимость максимальных напряжений в нем от его жесткости и относительной толщины.
Ключевые слова: *покрытие, испытания на термостойкость, напряженное состояние.*

The method of computer simulation and analytical calculation is execute the analysis of the tense state at heating-cooling of flat standard with a spraying coating, having less coefficient of linear thermal expansion, what material of substrate. Dependence of maximal tensions in coating from his inflexibility and relative thickness is set.
Keywords: *coating, tests on heat stability, tense state.*

Постановка проблемы

Для повышения работоспособности и долговечности деталей газовых турбин широко используются специальные защитные покрытия [1–5]. Эти покрытия должны обладать достаточными пластичностью и прочностью и не растрескиваться под действием механических и термических нагрузок. На сопротивление покрытия разрушению большое влияние оказывают термические напряжения, возникающие в результате разности кэффициентов линейного температурного расширения (КЛТР) подложки и напыленного слоя, изменения температуры в процессе как изготовления (нанесения покрытия и термообработки), так и работы детали.

Для оценки термостойкости покрытия проводят специальные лабораторные испытания [6], в которых образцы с нанесенным покрытием многократно нагревают и охлаждают в диапазоне температур 100...1200 °С. Критерием термостойкости при этом является состояние покрытия после испытаний, в частности отсутствие трещин и отслоений от подложки. К сожалению, при этом, как правило, не анализируется количественное влияние отдельных параметров, таких, например, как соотношение толщин покрытия и подложки, их жесткостей (модулей упругости), КЛТР, наличие начальных напряжений и т. д. Это затрудняет обобщение результатов многочисленных экспериментов, проводимых на образцах с подложками и покрытиями из различных материалов. Поэтому изучение напряженного состояния при нагреве-охлаждении образцов с покрытиями и влияния на него различных факторов актуально.

Анализ последних публикаций

В публикациях, посвященных напряженному состоянию в газотермических покрытиях [7–12], как правило, рассматривается влияние технологических факторов на величину и характер распределения остаточных напряжений и практически отсутствуют данные об их распределении в образцах при последующем термоциклировании, поэтому данная работа, посвященная изучению напряженного состояния при изменении температуры, актуальна.

Цель работы

Целью работы являются исследование напряженного состояния при нагреве-охлаждении образцов с напыленными покрытиями и установление количественных зависимостей уровня напряжений от толщины покрытия и свойств материалов.

Проведение исследований и их результаты

Исследования выполнялись методом компьютерного моделирования на базе метода конечных элементов (КЭ) с использованием программного комплекса ANSYS. Исследовали образцы типа плоской пластины с нанесенным на верхнюю поверхность покрытием, которые обычно используются при испытаниях на термостойкость. Анализировались поля и эпюры напряжений в упругой стадии работы на образцах с покрытием при повышении температуры на $\Delta T = 100$ °С. Физические и конечно-элементные модели показаны на рис. 1.

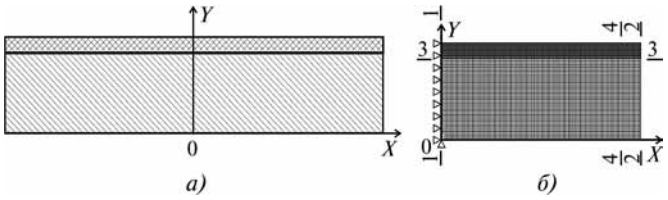


Рис. 1. Физическая (*а*) и конечно-элементная (*б*) модели образца с покрытием

Изучались два варианта моделей: с покрытием малой (вариант 1) и большой (вариант 2) жесткости. В обоих вариантах КЛТР материала покрытия принимался меньше, чем у материала подложки. Принятые при моделировании размеры и физико-механические свойства приведены в таблице. Коэффициенты Пуассона для всех материалов подложек и покрытий принимались равными 0,3.

Толщины слоев и свойства материалов

Слой	Толщина a_i, мм	Модуль упругости E_i, МПа		КЛТР α_i, 1/° С
		Вариант 1	Вариант 2	
Подложка	1,0 и 2,0	$2\cdot10^5$	$2\cdot10^5$	$12\cdot10^{-6}$
Покрытие	От 0,1 до 1,0	$0{,}5\cdot10^5$	$3\cdot10^5$	$5\cdot10^{-6}$

Анализ полей продольных, поперечных и касательных напряжений в сечении узла показал, что их характер практически одинаков в обоих вариантах образцов (рис. 2, см. с. 3 обложки) и при всех соотношениях толщин. На большей части длины образца продольные напряжения сохраняют постоянную величину (рис. 2, *а*, *б*) и только вблизи торца, на расстоянии, равном толщине, начинают заметно снижаться. Это соответствует общим принципам механики и говорит о том, что на большей части длины образца в средней его части поперечные сечения остаются плоскими, искривляясь только вблизи торцов. Это подтверждают и поля поперечных и касательных напряжений (рис. 2, *в*...*е*). На большей части длины образца они отсутствуют, а появляются и растут только вблизи торцов, достигая максимума на боковой поверхности. При этом максимальные касательные напряжения сосредоточены на поверхности раздела покрытие–подложка.

Для удобства количественного сравнения уровня напряжений и характера их распределения на рис. 3 приведены эпюры продольных напряжений в сечении 1 (по вертикальной оси в средней части), поперечных напряжений в сечении 2 (по торцевой поверхности) и касательных напряжений в сечении 3 (по границе раздела) для образцов с напыленными покрытиями малой (вариант 1) и большой (вариант 2) жесткости.

Анализ полей и эпюр показывает, что максимальные (по модулю) значения продольных и поперечных напряжений противоположны по знаку. При нагреве максимальные продольные сжимающие напряжения возникают в материале подложки, а максимальные растягивающие – в напыленном слое на границе раздела (рис. 3, *а*, *б*). Поперечные напряжения при этом сосредоточены на торцевых поверхностях (сечение 2). В материале подложки они растягивающие, а в напыленном слое – сжимающие (рис. 3, *в*, *г*).

Касательные напряжения сосредоточены на границе раздела слоев (сечение 3) и достигают максимума вблизи наружной торцевой поверхности (рис. 3, *д*, *е*).

При смене нагрева охлаждением уровень напряжений сохранится, а знаки изменятся на обратные.

Уровень всех напряжений как в материале подложки, так и в напыленном слое существенно зависит от жесткости (модуля упругости) материала напыленного слоя. Так, максимальные продольные напряжения в подложке возрастают от –25 МПа в варианте 1 ($E_{н.с}$ = $0{,}5\cdot10^5$ МПа) до –70 МПа в варианте 2 ($E_{н.с}$ = $3{,}0\cdot10^5$ МПа), т. е. почти в 3 раза. В напыленном слое максимум этих напряжений на границе раздела также возрастает от 29 до 100 МПа (рис. 3, *а*, *б*), т. е. более чем в 3 раза.

Максимальные поперечные напряжения на торцевой поверхности вблизи границы раздела возрастают соответственно с 70 до 110 МПа в подложке и от –5 до –75 МПа в напыленном слое (рис. 3, *в*, *г*).

Максимальные касательные напряжения на границе раздела вблизи внешней торцевой поверхности также увеличиваются с 35 до 65 МПа (рис. 3, *д*, *е*).

Таким образом, с увеличением жесткостти напыленного слоя в 6 раз (от $0{,}5\cdot10^5$ до $3\cdot10^5$ МПа) в наибольшей степени в нем увеличиваются поперечные напряжения (в 15 раз), в меньшей степени – продольные (более чем в 3 раза) и касательные (почти в 2 раза).

Для оценки адекватности результаты компьютерного моделирования напряжений в образцах с покрытием сравнивались с аналитическим решением для двухслойной пластины по методике, изложенной в [13]. Методика основывается на гипотезе плоских сечений и позволяет определить только продольные напряжения в средней части образца.

Аналитический расчет выполнялся для образцов (см. рис. 1, *а*) с толщиной подложки a_2, равной 1 и 2 мм, толщина покрытия a_1 при этом изменялась от 0,1 до 1,0 мм. Рассчитывались напряжения в покрытии на уровне верхней его поверхности (точка 1) и на поверхности раздела покрытие–подложка (точка 2).

Напряжения в любой точке при нагреве двухслойного бруса складываются из двух составляющих: напряжения растяжения-сжатия и напряжения изгиба [13].

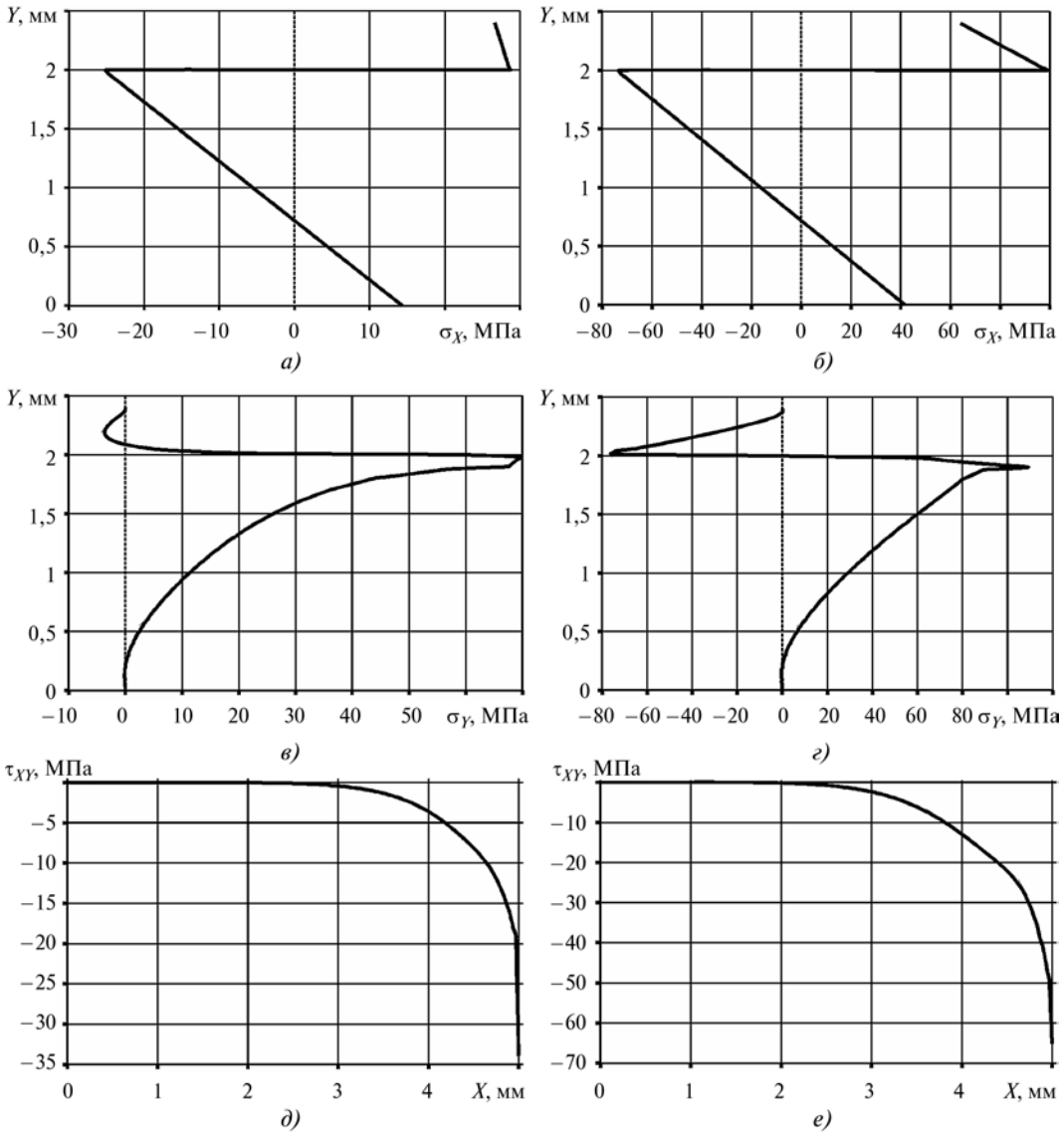


Рис. 3. Эпюры продольных напряжений в сечении 1 (*а*, *б*), поперечных в сечении 2 (*в*, *г*) и касательных по границе раздела (*д*, *е*) в образцах вариантов 1 (*а*, *в*, *д*) и 2 (*б*, *г*, *е*)

В точках 1 и 2 напряжения растяжения

$$\sigma_{\text{р}} = -E_1 \frac{(\alpha_1 - \alpha_2)\Delta T}{1 + \dfrac{E_1 a_1}{E_2 a_2}}.$$

Вследствие несимметричности бруса эти напряжения создают изгибающий момент

$$M = \sigma_{\text{р}} a_1 (a_1 + a_2)/2.$$

Напряжения от изгиба в точках 1 и 2:

$$\sigma_1 = \frac{M(z_0 - a_1 - a_2)E_1}{E_0 I_{x0}}; \ \sigma_2 = \frac{M(z_0 - a_2)E_1}{E_0 I_{x0}},$$

где z_0 – ордината упругого центра масс относительно нижней кромки образца, которая определяется уравнением

$$z_0 = \frac{E_1 a_1 (a_2 + a_1/2) + E_2 a_2/2}{a_1 E_1 + a_2 E_2};$$

$E_0 I_{x0}$ – упругий момент инерции сечения образца, который определяется по формуле

$$E_0 I_{x0} = E_1 \frac{a_1^3}{12} + E_2 \frac{a_2^3}{12} + E_1 a_1 (z_1 - z_0)^2 + E_2 a_2 (z_2 - z_0)^2.$$

Сравнение результатов аналитических расчетов и компьютерного моделирования показал, что уровень продольных напряжений в любой точке при

одних и тех же жесткостях материалов подложки и напыленного слоя зависит только от соотношения толщин слоев, оставаясь неизменным при пропорциональном изменении толщин. Результаты расчетов и моделирования продольных напряжений полностью совпали (рис. 4). Анализ кривых показывает, что наибольших значений растягивающие продольные напряжения в напыленном слое при нагреве достигают на поверхности раздела с основным металлом, при этом различие напряжений по толщине слоя с уменьшением его относительной толщины заметно уменьшается и при отношении толщин менее 0,1 они становятся практически одинаковыми. При увеличении относительной толщины наплавленного слоя растягивающие продольные напряжения на внешней поверхности напыленного слоя заметно снижаются, достигая нуля и переходя в сжимающие при отношении толщин a_1/a_2, равном 0,9 и 0,4 в слоях с малой и большой жесткостью соответственно.

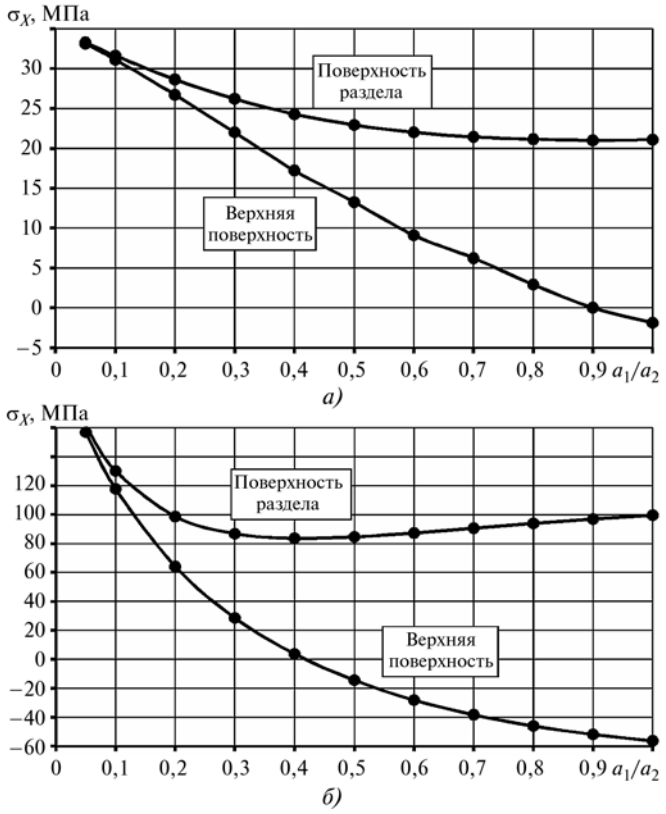


Рис. 4. Зависимость продольных напряжений от отношения толщин слоев a_1/a_2 в покрытии малой (*а*) и большой (*б*) жесткости при нагреве на 100 °С

Некоторое уменьшение растягивающих продольных напряжений на поверхности раздела с увеличением относительной толщины напыленного слоя наблюдается только при ее значениях до 0,3...0,5. Затем напряжения стабилизируются, а в слое с большой жесткостью снова несколько увеличиваются.

Таким образом, наиболее вероятной областью зарождения трещины в напыленном слое при нагреве является поверхность раздела. При этом лучшим с точки зрения уменьшения растягивающих продольных напряжений в напыленном покрытии и повышения его термостойкости является отношение толщин a_1/a_2 более 0,5 в слоях малой жесткости и более 0,2 (в диапазоне 0,3...0,7) в слоях большой жесткости.

Компьтерное моделирование при полном совпадении с результатами аналитического расчета продольных напряжений вместе с тем позволяет в отличие от последнего определить поперечные и касательные напряжения на участках искривления сечений. Именно на этих участках, как показали результаты моделирования, создаются благоприятные условия для образования трещин в хрупком материале напыленного слоя, так как растягивающие поперечные напряжения на стадии снижения температуры соизмеримы с продольными в средней части образца на стадии нагрева.

Кроме того, большие касательные напряжения на границе раздела на этих участках создают опасность отслоения напыленного слоя.

Выводы

1. Методами аналитического расчета и компьютерного моделирования установлены количественные зависимости для напряжений при нагреве и охлаждении образцов с напыленным покрытием.

2. Уровень и характер распределения продольных напряжений на большей части образца с напыленным покрытием могут быть определены аналитическим расчетом, поперечные и касательные напряжения – только компьютерным моделированием.

3. При термоциклировании образцов с напыленным покрытием в последнем возникают растягивающие напряжения, создающие условия для хрупкого разрушения как на стадии нагрева (продольные в средней части образца), так и на стадии охлаждения (поперечные на торцевых поверхностях). Вблизи торцов на границе раздела возникают касательные напряжения, создающие условия для отслоения покрытия.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Гецов Л.Б.** Детали газовых турбин. Л.:Машиностроение, 1982. 296 с.

2. **Коломыцев П.Т.** Газовая коррозия и прочность никелевых сплавов. М.: Металлургия, 1984. 215 с.

3. **Мовчан Б.А., Малашенко Н.С.** Жаростойкие покрытия, осаждаемые в вакууме. Киев: Наук. думка, 1983. 231 с.

4. **Лой С.А., Дубовой А.Н.** Плазменное напыление защитных покрытий на детали горячего тракта судовых турбин // Збірник наукових праць УДМТУ. Миколаів. УДМТУ. 1999. № 6 (366). С. 105–109.

5. **Лой С.А., Дубовой А.Н.** Повышение эффективности плазменного напыления защитных покрытий // Збірник наукових праць УДМТУ. Миколаів. УДМТУ. 1999. № 2 (362). С. 68–75.

6. **Термостойкость** азотированной стали Н26Ю3ТБ / А.В. Бильченко, В.Г. Горбач, А.И. Дудка, А.В. Любомский // Вісник СевНТУ: Зб. наук. пр. Вип. 120/2011. Серія: Механіка, енергетика, екологія. Севастополь; СевНТУ, 2011. С. 131–136.

7. **Хаскин В.Ю.** Комбинированное лазерно-микроплазменное нанесение керамических покрытий на стали // Доповіді Національної академії наук України. 2007. № 8. С. 99–102.

8. **Лузан С.А., Кальянов В.Н.** Исследование остаточных напряжений в напыленных покрытиях // Сварочное производство. 1986. № 1. С. 2–4.

9. **Долгов Н.А.** Метод определения модуля упругости газотермических покрытий // Порошковая металургія. 2004. № 7/8. С. 110–115.

10. **Похмурский В.И., Студент М.М., Довгунык В.М. и др.** Возникновение и перераспределение внутренних напряжений в электродуговых покрытиях во время их формирования // Автоматическая сварка. 2006. № 10. С. 15–19.

11. **Кулик А.Я., Шаронов Е.А., Мезерницкий А.Ю.** Остаточные напряжения в оксидных плазменных покрытиях // Теория и практика газотермического нанесения покрытий. Рига: Зинатне, 1980. Т. 2. С. 12–16.

12. **Куприянов И.Л., Геллер М.А., Горелик Г.Е, Мазовко А.В.** Теплообмен и термические напряжения при нанесении газотермических покрытий на положку // Физика и химия обработки материалов. 1988. № 3. С. 27–31.

13. **Ермолаев Г.В., Кручинов В.Н.** Напряжения и деформации в паяных соединениях. Технология судостроения и сварочного производства. Сб. науч. трудов. Николаев, НКИ, 1983. С. 48–57.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

ОСНОВЫ НАНОТЕХНОЛОГИЙ

Ю.И. Головин

2012 г. Объем 656 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-662-8 Цена 800 р.

Изложены физико-химические основы нанотехнологии. Особенное внимание уделено размерным эффектам различной природы и путям их практического использования в различных наноструктурах и изделиях. Рассмотрены современные методы получения, исследования и определение свойств наноматериалов. Систематизированы и описаны основные направления развития нанотехнологий и нанотехники: физическое наноматериаловедение и наномеханика, наноэлектроника и нанобиотехнологии.

Наряду с общими положениями приведено большое число примеров конкретных разработок, доведенных до промышленного производства. Автор использовал как литературные, так и собственные данные. Книга содержит обширный ссылочный аппарат, включающий зарубежные и отечественные источники.

Для инженерно-технических работников, осваивающих и использующих нанотехнологические процессы, а также может быть полезна студентам и аспирантам, специализирующимся в этой области.

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 621.98 + 621.787

А.М. Буглаев
(Брянская государственная инженерно-технологическая академия)
E-mail: abuglaev-bgita@yandex.ru

Повышение стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами алмазным выглаживанием

Статья посвящена актуальной проблеме повышения долговечности разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами. Рассмотрены схемы упрочнения твердосплавных режущих элементов штампов алмазным выглаживанием, разработаны конструкции инструментов для алмазного выглаживания, приведены результаты исследования износа режущих элементов, установлены режимы алмазного выглаживания.

Ключевые слова: *стойкость, разделительные штампы, твердосплавные штампы, режущие элементы, алмазное выглаживание, износ.*

The article is concerned with the topical problem of increasing durability of dividing stamps with hard alloyed cutting elements. The article considers the schemes of reinforcement of hard alloyed cutting elements by diamond burnishing. Designs of tools for diamond burnishing are developed. The results of research of wear of cutting elements are given. The modes of diamond burnishing are set up.

Keywords: *firmness, dividing stamps, hard alloyed stamps, cutting elements, diamond burnishing, wear.*

Введение

Алмазное выглаживание является одним из эффективных методов повышения долговечности деталей машин, изготовленных из легированных сталей [1]. Однако и твердосплавные детали и инструменты можно упрочнять алмазным выглаживанием. Практический интерес представляет применение алмазного выглаживания для упрочнения твердосплавных разделительных штампов, стойкость которых желательно увеличить, особенно штампов для вырубки – пробивки деталей из слоистых пластиков – гетинакса и стеклотекстолита [2].

Целью работы является исследование возможностей повышения стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами методом алмазного выглаживания.

Материалы и методы проведения исследований

Проводились исследования влияния режимов алмазного выглаживания на износ и выкрашивание твердоспавных режущих элементов штампов. Для исследований разработаны две схемы обработки выглаживанием рабочих частей образцов. При обработке детали *1* (образца) двухинденторным инструментом (рис. 1) выглаживание поверхности производится наконечниками *2* и *3* с рабочими частями из искусственных алмазов. Применение регулировки относительного расположения рабочих частей наконечников *2* и *3* в вертикальной плоскости за счет прокладок *4* различной толщины позволяет предохранять режущую кромку и алмаз от повреждения. Наконечники *2* и *3* установле-

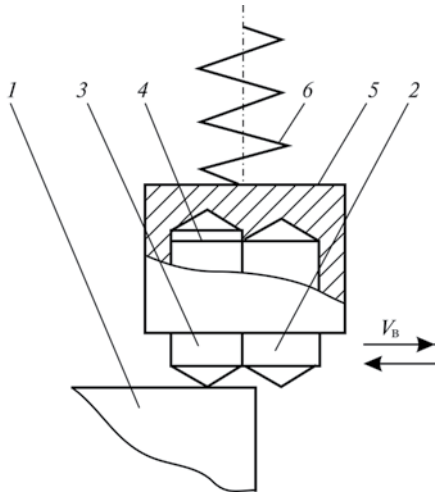


Рис. 1. Схема выглаживания двухинденторным инструментом: *1* – деталь; *2*, *3* – выглаживающий наконечник; *4* – прокладка; *5* – держатель; *6* – пружина

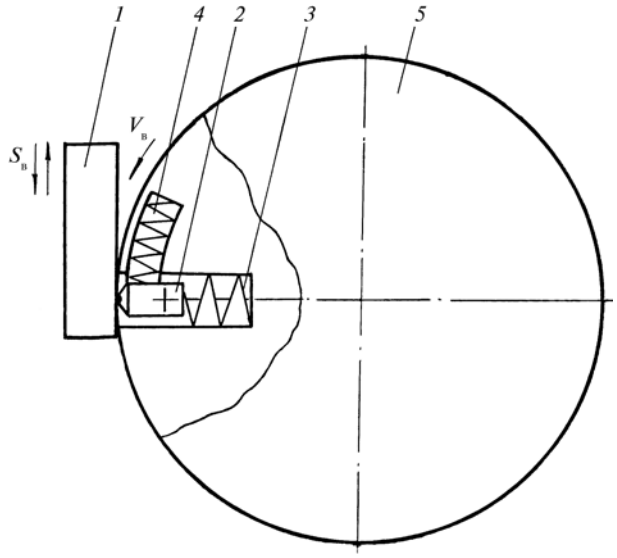


Рис. 2. Схема выглаживания вращающимся инструментом: *1* – деталь; *2* – выглаживающие наконечники; *3* – основная пружина; *4* – дополнительная пружина; *5* – корпус

ны в держателе *5* и нагружены пружиной *6*. Обработка осуществляется таким образом, чтобы при продольной подаче (перпендикулярно режущей кромке) выглаживающий наконечник *2* периодически выходил за ее границу. Дополнительное предохранение режущей кромки обеспечивает прокладка *4*.

При обработке вращающимся инструментом (рис. 2) выглаживание поверхности детали *1* производится наконечниками *2*, нагруженными основными пружинами 3, создающими необходимую силу выглаживания. Использование дополнительных пружин *4* обеспечивает отвод выглаживающих наконечников *2* за боковую поверхность корпуса *5* при возникновении нагрузок, превышающих допустимые для режущей кромки или алмаза.

На основе этих схем разработаны конструкции и изготовлен инструмент для алмазного выглаживания. Двухинденторный инструмент предназначен для обработки выглаживанием на строгальных и токарных

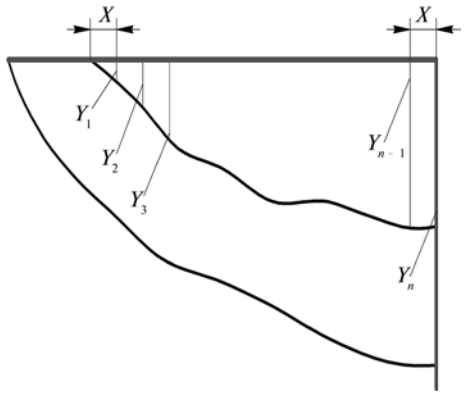


Рис. 3. Схема определения износа режущих элементов штампов

станках и обеспечивает обработку плоскостей и внешних цилиндрических поверхностей исследуемых образцов. Вращающийся инструмент позволяет на фрезерных и профильно-шлифовальных станках выглаживать образцы достаточно сложного профиля.

Испытания стойкости штампов с упрочненными и неупрочненными образцами проводились на высокоскоростном прессе-автомате И5М3 111014 при различных скоростях (до 1200 ударов в минуту) штамповки гетинакса и стеклотекстолита толщиной 1,0 мм.

Износ режущих элементов штампов определялся по профилограммам их поверхностей до и после изнашивания (рис. 3) и рассчитывался по формуле

$$F_{изн} = \frac{Y_1 X}{2Z_в Z_2} + \frac{(Y_1 + Y_2)X}{2Z_в Z_2} + \frac{(Y_2 + Y_3)X}{2Z_в Z_2} + \frac{(Y_{n-1} + Y_n)X}{2Z_в Z_2},$$

где $F_{изн}$ – площадь износа; Y_1 – ордината, измеренная по профилограммам до и после изнашивания, мм; X – расстояние между ординатами, мм; $Z_в$ – вертикальное увеличение профилографа-профилометра; Z_2 – горизонтальное увеличение профилографа-профилометра.

Аналогичным образом определялась площадь выкрашивания режущего элемента штампа.

Для установления рациональных режимов алмазного выглаживания проводились исследования влияния силы выглаживания, радиуса алмаза и числа проходов на износ режущих элементов, изготовленных из различных твердых сплавов.

Результаты исследований

Результаты исследований влияния режимов алмазного выглаживания на износ режущих элементов в процессе штамповки гетинакса (рис. 4) позволили установить, что износ этих деталей $F_{изн}$ снижается на 10...15 % при увеличении силы выглаживания P от 100 до 250 Н. Дальнейшее повышение силы выглаживания до 400 Н приводит к повышению износа в среднем на 15 %. При силе выглаживания 200...250 Н износ режущих элементов минимальный, что можно объяснить благоприятным сочетанием микротвердости и параметров шероховатости изнашиваемых поверхностей [3].

Радиус алмаза выглаживающего инструмента $R_{алм}$ также оказывает существенное влияние на износ. У режущих элементов из сплавов, содержащих 6...10 % кобальта, с увеличением радиуса алмаза от 0,5 до 1 мм износ снижается в среднем на 8...10 %. Дальнейшее увеличение радиуса алмаза до 2 мм приводит к росту износа примерно на такую же величину.

У рабочих элементов, изготовленных из сплавов с содержанием кобальта 15...25 %, износ снижается на 6...10 % при увеличении радиуса алмаза от 0,5 до 1,5 мм.

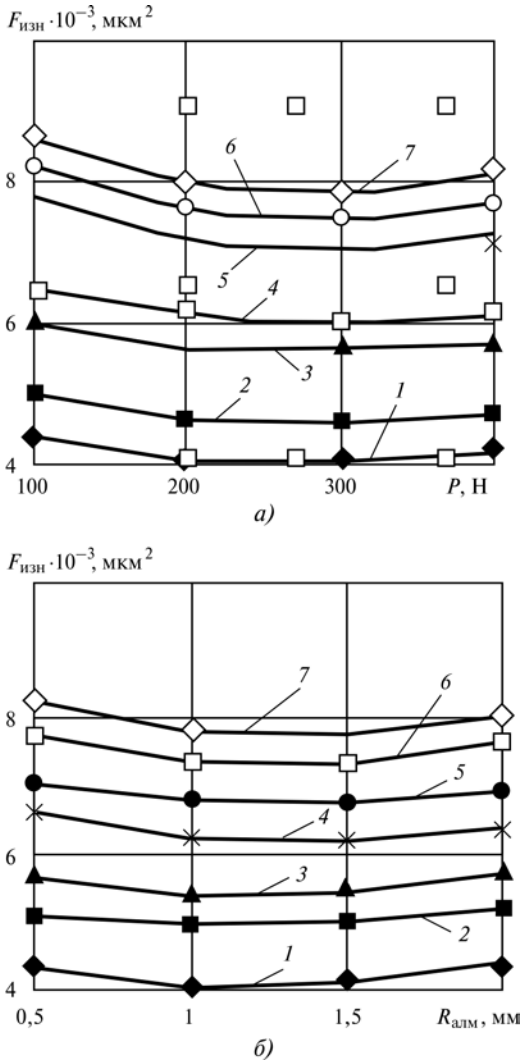


Рис. 4. Влияние на износ рабочих элементов режимов выглаживания:

а – силы *P*; *б* – радиуса алмаза $R_{алм}$; *1* – ВК6М, ВК6, ВК6С; *2* – ВК10М, ВК10, ВК10С; *3* – ВК15, ВК15С; *4* – ВК20; *5* – ВК25; *6* – ВК20КС; *7* – ВК20К

Увеличение радиуса алмаза до 2 мм способствует повышению износа на 5...6 %. Таким образом, минимальный износ режущих элементов, изготовленных из сплавов, содержащих до 10 % кобальта, наблюдается, если обработка проводится инструментом с радиусом 1 мм, а рабочих элементов из сплавов с содержанием кобальта от 15 до 25 % – с радиусом алмаза 1,5 мм

Это связано с тем, что сплавы, содержащие до 10 % кобальта, обладают повышенной твердостью и поэтому требуется увеличение давления алмаза при выглаживании по сравнению со сплавами, содержащими от 15 до 25 % кобальта.

Необходимо отметить, что закономерности влияния силы выглаживания и радиуса алмаза на износ режущих элементов, обработанных двухинденторным

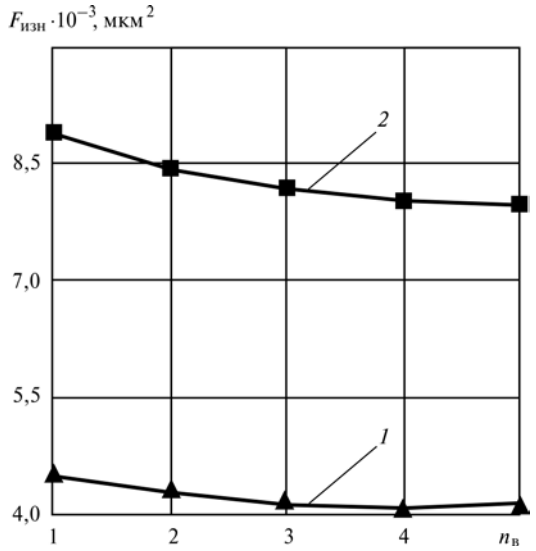


Рис. 5. Влияние на износ режущих элементов режимов выглаживания – числа проходов при выглаживании $n_в$:

1 – ВК6С; *2* – ВК20К

и вращающимся инструментом, различаются незначительно. Увеличение числа проходов до 4 при обработке двухинденторным инструментом способствует уменьшению износа (рис. 5). Дальнейшее повышение числа проходов заметного уменьшения износа не вызывает. При выглаживании вращающимся инструментом число проходов существенного влияния на износ не оказывает.

Установлено, что эффективность выглаживания как двухинденторным, так и вращающимся инструментом возрастает с повышением содержания кобальта в сплаве и размера основной массы зерен WC-фазы. Так, по сравнению с алмазным шлифованием алмазное выглаживание обеспечивает снижение износа рабочих элементов, изготовленных из сплавов ВК6М, ВК6 и ВК6С, до 20...30 %.

Выглаживание рабочих элементов из сплава ВК25 способствует уменьшению износа на 30...40 %, а рабочих элементов из сплава ВК20К – на 60...70 %. Аналогичные результаты получены и при исследовании износа пуансонов и матриц штампов для пробивки и отрезки стеклотекстолита.

Полученные данные можно объяснить тем, что с увеличением содержания кобальта и размера основной массы зерен карбидной фазы возрастает толщина кобальтовой прослойки, а значит, и повышается эффективность упрочнения.

Алмазное выглаживание в отличие от алмазного шлифования обеспечивает снижение выкрашивания рабочих элементов из сплава ВК6М на 10...20 %, ВК6 – на 10...30 % и ВК6С – 40...50 % (рис. 6, 7).

Уменьшение выкрашивания, видимо, обусловлено увеличением предела выносливости твердого сплава после выглаживания. Анализ полученных данных

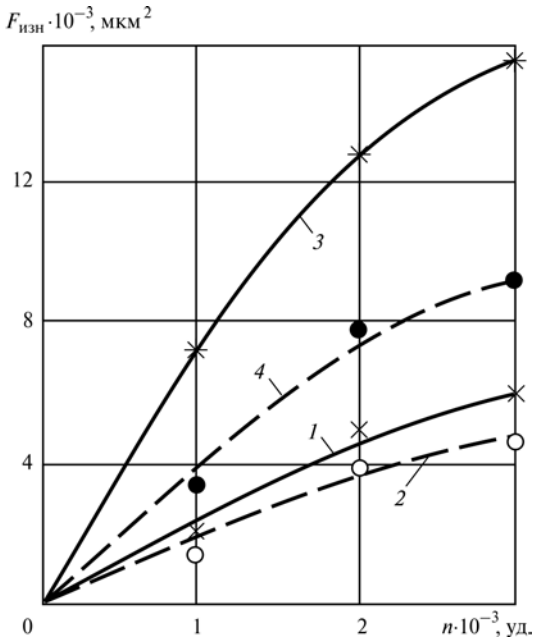


Рис. 6. Изменение износа твердосплавных режущих элементов при штамповке стеклотекстолита в зависимости от числа ударов *n*:
1, *2* – ВК6С; *3*, *4* – ВК20К

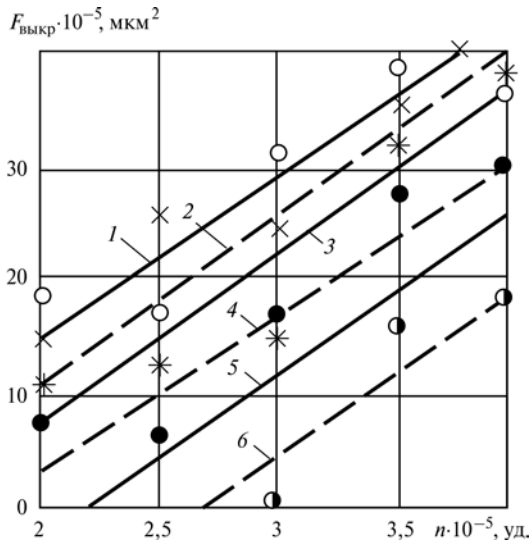


Рис. 7. Изменение выкрашивания твердосплавных пуансонов и подвижных ножей при штамповке стеклотекстолита в зависимости от числа ударов *n*:
$F_{выкр}$ – площадь участка выкрашивания в сечении; *1*, *2* – ВК6М; *3*, *4* – ВК6; *5*, *6* – ВК6С

показывает, что при выглаживании на режимах, обеспечивающих минимальный износ рабочих элементов, микротвердость их поверхностей составляет 22...23 ГПа, параметр шероховатости *Ra* – 0,63...0,32 мкм, радиусы выступов – 600...700 мкм, впадин – 350...400 мкм.

С учетом того, что при штамповке стеклотекстолита пуансоны и подвижные ножи, изготовленные из наиболее износостойких твердых сплавов с содержанием кобальта 6 %, подвержены выкрашиванию, для их изготовления целесообразно использовать сплавы с 10 %-м содержанием кобальта. При этом предпочтение следует отдать сплаву ВК10С, износостойкость которого практически не отличается от износостойкости сплава ВК10, а сопротивляемость выкрашиванию несколько выше, чем у ВК10. Для изготовления матриц и неподвижных ножей следует использовать сплав ВК6С, так как рабочие элементы из сплава ВК6М и ВК6 выкрашиваются.

Результаты экспериментальных исследований позволили разработать рекомендации по применению твердых сплавов и выбору режимов алмазного выглаживания в целях повышения износостойкости твердосплавных штампов.

При использовании и двухинденторного, и вращающегося инструмента, изготовленного из твердых сплавов, рекомендуется режим выглаживания $P_в$ = 250...200 Н; $n_в$ = 4; $S_в$ = 0,05 мм/ход (об); V = 0,1...5,0 мм/с, при этом для инструмента, изготовленного из сплавов ВК6М, ВК6, ВК6С, ВК10М, ВК10, ВК10С, рекомендуется $R_{алм}$ = 1 мм, а из сплавов ВК15, ВК15С, ВК20, ВК20С, ВК20КС, ВК20К, ВК25 – $R_{алм}$ = 1,5 мм.

Выводы

Алмазное выглаживание можно с успехом использовать для повышения стойкости разделительных штампов с твердосплавными режущими элементами.

Разработаны методы алмазного выглаживания двухинденторным и вращающимся инструментом на токарном, фрезерном и строгальном металлообрабатывающих станках.

Установлены режимы алмазного выглаживания, выбираемые в зависимости от марки твердого сплава, используемого для изготовления режущих элементов разделительных штампов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Одинцов Л.Г.** Финишная обработка деталей алмазным выглаживанием и вибровыглаживанием. М.: Машиностроение, 1981. 160 с.

2. **Буглаев А.М.** Совершенствование технологических методов повышения стойкости инструментов для обработки неметаллических материалов на основе компьютерного моделирования износа режущих кромок: Дис. ... д-ра техн. наук: 05.02.04, 05.02.01. М., 2002. 302 с.

3. **Суслов А.Г.** Технологическое обеспечение параметров состояния поверхностного слоя деталей. М.: Машиностроение, 1987. 208 с.

УДК 631.31

А.М. Михальченков *(МГУПС – Брянский филиал МИИТ),*
С.А. Соловьев, М.А. Михальченкова *(ГОСНИТИ)*
E-mail: mihalekm@ya.ru

Эффективность импортозамещающих технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей почвообрабатывающих орудий способом компенсирующих термоупрочненных элементов

Показано, что применение способа компенсирующих термоупрочненных элементов является высокоэффективным по техническим, технологическим, эксплуатационным и экономическим критериям.
Ключевые слова: *эффективность, критерии, импортозамещающие технологии, почвообрабатывающие орудия, изготовление, восстановление, упрочнение, компенсирующие элементы.*

It is shown that application of the method of compensating heat-treated elements is a highly effective technical, technological, operational and economic criteria.
Keywords: *efficiency, criteria, import-substituting technologies, tillage implements, manufacture, repair, reinforcement, compensating elements.*

Наличие в сельскохозяйственном производстве России большого количества импортных машин привело к необходимости поиска технологий изготовления, восстановления и упрочнения деталей, способствующих импортозамещению и позволяющих производить отечественные изделия, соответствующие современным требованиям. Немаловажную роль в актуализации таких изысканий играет и чрезмерно высокая рыночная цена деталей зарубежного производства. (Например, покупная стоимость фирменного лемеха компании «Квернеланд Групп» составляет 2400 руб.) Кроме того, нужно проводить исследования по повышению ресурса отечественных деталей, выводя его на уровень зарубежных.

Оптимальными с точки зрения изложенного следует считать технологии, которые могут быть применены как при изготовлении, так и при восстановлении деталей с одновременным использованием упрочняющих воздействий.

На основании анализа известных методов изготовления и восстановления наиболее распространенных деталей почвообрабатывающих машин (плужных лемехов и стрельчатых лап культиваторов) было установлено, что большинство из них не может в полной мере отвечать технологическим условиям и машиностроения, и ремонтного производства одновременно. В этом плане выделяется способ компенсирующих термоупрочненных элементов (КТЭ), когда к пригодной после эксплуатации части детали (остову) крепится заменяемая рабочая часть [1–3]. Он основан на приваривании вместо изношенной области компенсирующего элемента, термообработанного на твердость 43...48 HRC, превышающую этот показатель у деталей отечественного производства и сопоставимую с твердостью импортных. В результате появляется возможность производить штампосварные изделия (работы ГОСНИТИ и Брянской ГСХА), а также восстанавливать детали рабочих органов по различным технологическим вариантам (приемам).

Между тем оценка эффективности использования деталей, изготовленных и (или) восстановленных по данному методу, отсутствует. Поэтому целью представляемых в статье исследований является выбор критериев оценки технологических вариантов и определение уровня их эффективности.

Рассматриваемый ниже комплекс технологических приемов восстановления, основанный на способе КТЭ, позволяет проводить одновременно и упрочнение вос-

станавливаемых изделий [4]. Технологии предусматривают применение вторичного сырья из конструктивных элементов, утративших работоспособность, но пригодных по показателю твердости для дальнейшего использования в качестве абразивостойких материалов (например, листов рессор с твердостью не менее 43 HRC) [5]. Кроме того, эти технологии могут быть использованы и непосредственно на производстве. Собственно говоря, после проведения реновации детали, утратившей служебные свойства, она получает в некотором смысле новое конструктивное исполнение.

Для исследований использовались две группы деталей, различающихся по функциональному назначению: плужные цельнометаллические лемеха отечественного производства и составные лемеха зарубежного изготовления; импортные стрельчатые лапы культиваторов. Восстановлению подвергались детали, снятые с эксплуатации по причине их предельного износа.

С учетом специфики износа, оцениваемого его геометрическими параметрами и формой, разработана классификация технологических приемов восстановления применительно к перечисленным деталям почвообрабатывающих орудий (рис. 1).

Рис. 1. Классификация и область применения технологических приемов восстановления деталей

В общем виде технологический процесс состоит в следующем (рис. 2). Подрезающая лезвийная часть в виде конусной пластины (компенсирующий элемент) изготовляется, как правило, из сталей рессорно-пружинного класса и подвергается термической упрочняющей обработке по всей глубине на твердость около 43...48 HRC. Компенсирующий элемент копирует форму подрезающей части лапы в состоянии поставки с увеличением на 10 мм размера в сечении, параллельном траектории перемещения лапы, для осуществления его приваривания. Если элемент изготовлен путем сваривания, упрочняющую термообработку следует проводить до сваривания; в случае же штамповки – после. Рекомендуется изготовлять конусную пластину из рессорных листов, снятых с эксплуатации, но имеющих твердость не менее 43 HRC.

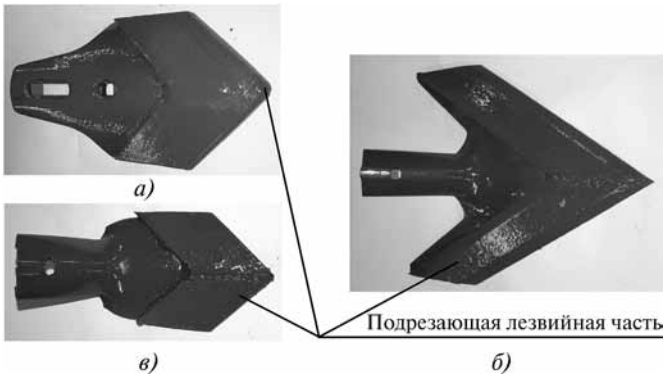


Рис. 2. Восстановленные стрельчатые лапы ведущих зарубежных компаний:
а – для поверхностной культивации (компания Amazone); *б* – для высева по стерне (компания Morris); *в* – для высева по подготовленной почве (компания Morris)

Конусная пластина крепится к рабочей поверхности остова привариванием с двух сторон. Со стороны рабочей поверхности сварка осуществляется короткими швами, 6...8 мм, расположенными равномерно по длине крыльев, с тыльной стороны на их всю длину. Число швов в зависимости от длины крыльев может составлять от одного (рис. 2, *а*, *б*), до двух (рис. 2, *в*). Сваривание осуществляется электродуговым методом (ручным или полуавтоматическим) электродным материалом для сварки углеродистых сталей.

Лапу подобной конструкции можно производить серийно, изготовляя остов из того же материала, что и пластины, без каких-либо существенных изменений в принятом технологическом процессе. В результате такого технологического подхода стрельчатую лапу можно рассматривать как штампосварную конструкцию. Данный технологический прием позволяет повысить степень ремонтопригодности лапы.

После износа пластины и шва с тыльной стороны (он выступает вперед относительно шва, расположенного со стороны рабочей поверхности, в сечении, параллельном осевой линии) имеется возможность беспрепятственного удаления пластины и приваривания новой, тем самым упрощается технологический процесс восстановления.

Достижение высокой долговечности обеспечивается применением компенсирующего элемента, изготовленного из стали рессорно-пружинного класса и термообработанного на твердость 43...48 HRC по всей глубине, что повышает стойкость к абразивному изнашиванию всего изделия, а также неоднократным использованием остова.

Критериями потери работоспособного состояния отечественных цельнометаллических лемехов является предельный износ заглубляющейся части и образование лучевидного износа с остаточной толщиной детали

менее 2 мм в долотообразной области. По причине таких дефектов выбраковке подлежат более 90 % лемехов. Их восстановление сводится к замене предельно изношенной долотообразной части на новую, которая изготовляется из термоупрочненной на твердость 43...48 HRC рессорно-пружинной стали. Следует отметить, что такая твердость соответствует твердости изделий импортного производства. Это позволяет приблизить ресурс отечественных лемехов к ресурсу зарубежных.

Приваривание упрочненных долот производится с двух сторон встык к пригодному к эксплуатации остову электродами для сварки углеродистых сталей. (В этом случае у потребителей возникает резонный вопрос о прочности сварного соединения. Авторы не проводили специальных исследований по определению прочностных показателей соединения «металл лемеха – шов – термоупрочненный металл», однако многолетний опыт использования восстановленных таким образом лемехов позволяет утверждать, что их надежность с точки зрения прочности шва высокая.)

Технология учитывает соотношение остаточной ширины остова и вылета долотообразной части. Кроме этого, соблюдаются все нормативы по заточке восстановленной детали (лезвийная часть и полевой обрез). Это позволяет избежать нарушений агротехнических норм и обеспечить надежное заглубление восстановленных лемехов.

Для оценки эффективности технологий испытывались лемеха, восстановленные по трем вариантам (рис. 3). Применение этих технологических схем восстановления обусловлено использованием лемехов на почвах различного гранулометрического состава. Лемеха, восстановленные без дополнительных технологических воздействий (рис. 3, *а*), применяются на почвах с изнашивающей способностью до 200 г/га; армирование пятки и восстановленной части (рис. 3, *б*) рекомендуется проводить применительно к лемехам, эксплуатируемым на почвах с изнашивающей способностью более 300 г/га; наличие гравиевидных включений заставляет проводить армирование и износостойкую наплавку долотообразной области лемеха (рис. 3, *в*).

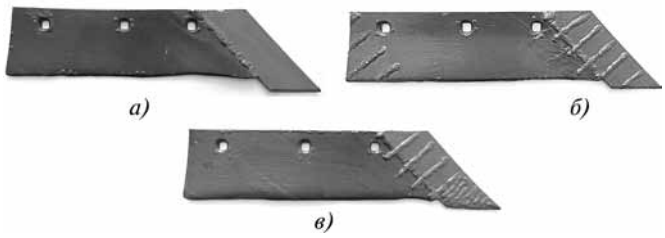


Рис. 3. Технологические схемы восстановления лемехов приваривaнием термоупрочненных долот встык:
а – без технологических воздействий; *б* – с армированием областей носка и пятки абразивостойким сплавом; *в* – с армированием области восстановления и заплавкой заглубляющейся части абразивостойким сплавом

Нужно обратить отдельное внимание на то, что термоупрочненные долота необходимо армировать электродами, предназначенными для износостойкой наплавки, в целях соблюдения правила Шарпи [6]. В случае применения электродов для сварки углеродистых сталей эффективность термоупрочнения долот как метода повышения износостойкости значительно снижается.

В отличие от отечественных цельнометаллических лемехов наработка до отказа у импортных лемехов определяется достижением предельного износа их режущей лезвийной части. По этой причине восстановлению подлежат 100 % лемехов, выбывших из эксплуатации. Причем износ неравномерен по длине – область пятки изнашивается более интенсивно, чем область, расположенная в носовой части.

Технологический процесс восстановления для этих деталей сводится к удалению изношенной, неработоспособной части изделия, выравниванию стыка и привариванию компенсирующего термоупрочненного на твердость 43...48 HRC элемента к оставшемуся пригодным остову (рис. 4). Использование остова изношенного лемеха целесообразно и даже необходимо еще и по той причине, что лемеха зарубежных компаний не взаимозаменяемы вледствие различной конструкции крепежных отверстий.

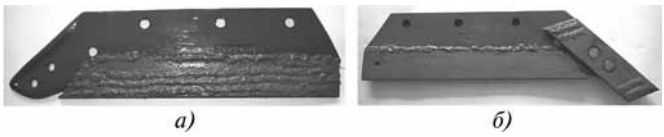


Рис. 4. Восстановленный лемех компании «Квернеланд Групп»:
а – износостойкая наплавка с тыльной стороны; *б* – лемех в сборе

Описанная технология может быть распространена на лемеха фактически всех европейских компаний.

Опыт использования восстановленных лемехов фирм “Фогель и Ноот”, “Квернеланд Групп”, “Белотта”, “Бессон” показал, что для достижения ресурса, превышающего ресурс заводских деталей, необходимо проводить тыльную наплавку износостойким сплавом с охватом зоны пятки (рис. 4, *а*).

Приваривание вставки осуществляется, как и в случае восстановления отечественных лемехов.

В качестве оценочных параметров были приняты ресурсы деталей в состоянии поставки $N_п$ и восстановленных $N_в$; разность ресурсов $\Delta N = N_в - N_п$ и их соотношение $\frac{N_в}{N_п} \cdot 100$ (эксплуатационный критерий); цены деталей восстановленных $Ц_в$ и в состоянии поставки $Ц_п$, разность цен $\Delta Ц = Ц_п - Ц_в$ и их соотношение $\frac{E_в}{E_п} \cdot 100$. Эти параметры обосновываются прежде всего интересом потребителей.

Итоговыми критериями эффективности явились отношение рыночной цены к наработке ($K = Ц/N$) изделий заводского изготовления $K_н$ и восстановленных $K_в$ и сравнительный критерий экономической эффективности ΔK, равный разности между $K_н$ и $K_в$.

Ресурс опытных деталей определялся в полевых условиях при вспашке супесчаных и легких суглинистых почв. Полученные данные являются итогом многолетних наблюдений (8 лет), что позволило получить информацию, достоверную с точки зрения многообразия факторов и изменчивости их влияния. Число испытываемых деталей по каждому технологическому варианту было не менее 60 в соответствии с положениями теории вероятностей и математической статистики.

При отсутствии встроенного датчика расход топлива контролировался счетчиком ИП-179 и был примерно одинаков как для изделий в состоянии поставки, так и для восстановленных.

Наработка до снятия детали с эксплуатации определялась для стрельчатых лап предельным износом рабочей области; для лемехов отечественного производства износом заглубляющейся части, превышающим 45 мм, лучевидным износом с остаточной толщиной лемеха менее 2 мм и образованием трапецеидальной формы; для лемехов производства зарубежных компаний износом режущей лезвийной части по ширине более 50 мм.

В качестве рабочих агрегатов использовались плуги, культиваторы, посевные комплексы российского и зарубежного производства.

Полученные данные, как экспериментальные, так и расчетные, приведены в табл. 1–3.

Применение способа КТЭ позволило увеличить наработку на отказ для стрельчатых лап культиваторов на 20 %; для цельнометаллических лемехов отечественного производства на 100...250 % и для составных лемехов импортного изготовления на 33 % (табл. 1).

Очевидно, что столь существенный прирост наработки на отказ отечественных лемехов связан с увеличением твердости привариваемых долот в два раза, применением наплавочного армирования и заплавки подрезающей части абразивостойким сплавом. В результате восстановления обеспечивается ресурс отечественного лемеха, сравнимый с ресурсом лемеха компании «Квернеланд Групп» в состоянии поставки (см. табл. 1).

В отличие от отечественных лемехов средний прирост ресурса у культиваторных лап и импортных лемехов значительно ниже. Это объясняется их достаточно высокой твердостью (50 HRC), сравнимой с твердостью материала компенсирующих элементов.

Для культиваторных лап повышение ресурса достигается за счет некоторого увеличения толщины привариваемых пластин и повышенной твердости острия лапы, которая обеспечивается наличием сварного шва. У восстановленных лемехов зарубежных компаний, рост ресурса достигается применением износостойкой наплавки (60 HRC) с тыльной стороны.

Как известно, потребителей прежде всего интересуют цена комплектующих и их ресурс. Технические и технологические достоинства рассматриваемых технологий (простота и доступность реализации; использование вторичного сырья для изготовления ТКЭ, отсутствие необходимости в высокооплачиваемых квалифицированных кадрах и сложного оборудования) позволяют снизить цену реализации восстановленных деталей на 10...50 % в сравнении с деталями заводского

Таблица 1

Показатели по наработке на отказ деталей в состоянии поставки и восстановленных

Рисунок	Ресурс деталей N, га		Разность ресурсов ΔN, га	Соотношение ресурсов $\frac{N_в}{N_п} \cdot 100$, %
	в состоянии поставки $N_п$	восстановленных $N_в$		
Стрельчатые лапы культиваторов				
1, *а*	28...30	34...36	6	121...120
1, *б*	28...30	34...36	6	121...120
1, *в*	28...30	34...36	6	121...120
Цельнометаллические лемеха				
2, *а*	8	16	8	200
2, *б*	8	24	16	300
2, *в*	8	30	22	375
Составные лемеха				
3, *а*	30	40	10	133
Лемех в сборе				
3, *б*	30	40	10	133

Таблица 2

Цены деталей в состоянии поставки и восстановленных

Рисунок	Цена деталей *Ц*, руб.		Разность цен Δ*Ц*, руб.	Соотношение цен $\frac{E_{в}}{E_{п}} \cdot 100$, %
	в состоянии поставки $Ц_{п}$	восстановленных $Ц_{в}$		
Стрельчатые лапы культиваторов				
1, *а*	600	400	200	66
1, *б*	1000	800	200	80
1, *в*	800	600	200	75
Цельнометаллические лемеха				
2, *а*	460	400	60	86
2, *б*	460	410	50	89
2, *в*	460	420	40	91
Составные лемеха				
3, *а*	2700	1400	1300	51
Лемех в сборе				
3, *б*	4200	2200	2000	52

Таблица 3

Показатели экономической эффективности технологии

Рисунок	Оценочный коэффициент эффективности, $K = Ц/N$, руб./га		Сравнительный критерий экономической эффективности Δ*K*, руб./га
	$K_{н}$	$K_{в}$	
Стрельчатые лапы культиваторов			
1, *а*	20	11	9
1, *б*	33	22	11
1, *в*	26	16	10
Цельнометаллические лемеха			
2, *а*	57	25	32
2, *б*	57	17	40
2, *в*	57	14	43
Составные лемеха			
3, *а*	90	35	55
Лемех в сборе			
3, *б*	140	55	85

производства (см. табл. 2). Особое место в этом случае занимает незначительная себестоимость восстановления. Следует заметить, что чем выше цена детали заводского исполнения, тем больше разность между ее рыночной стоимостью и стоимостью реализации восстановленного изделия (см. табл. 2). Неоднократное восстановление детали (до трех раз) позволяет еще больше снизить этот параметр при сохранении ресурса. Следует особо подчеркнуть, что такие детали, как лемеха импортного производства, необходимо восстанавливать, т. е. технические и технологические преимущества способа КТЭ в совокупности обеспечивают минимально возможное соотношение цен.

В случае использования восстановленных комплектующих имеется возможность максимально снизить затраты времени и средств на поиски и доставку деталей. (Часто компании материально-технического снабжения находятся на значительных расстояниях от потребителей, а иногда вообще в других регионах страны.)

В то же время, как следует из табл. 2, максимальные значения соотношения цен для восстановленных и изготовленных на заводе лемехов российских производителей приближаются к 100 %. В этом случае предприятие, занимающееся восстановлением, вынуждено продавать лемеха по цене, близкой к цене завода-поставщика, что не совсем выгодно потребителю. Однако повторная реновация (после первого восстановления) позволяет значительно снизить $Ц_{в}/Ц_{п}$.

Исходя из данных, приведенных в последней колонке табл. 2, можно заключить, что восстановление предлагаемым методом дорогостоящих деталей потребителю более выгодно (с финансовой стороны), чем восстановление относительно недорогих изделий. Однако в любом случае с учетом цены и ресурса потребителю должно быть выгодно приобретать восстановленные детали.

В связи с этим конечным итогом анализа эффективности является оценка по сравнительному критерию, характеризующему разность отношений цены детали к ее ресурсу в заводском исполнении и восстановленной при равных условиях эксплуатации (см. табл. 3). В случае если он достигает значения, большего единицы, то применение технологического процесса восстановления, основанного на способе КТЭ, будет иметь положительную экономическую эффективность. Данные табл. 3 говорят о высокой эффективности способа КТЭ применительно ко всем рассматриваемым деталям. Причем повышение технологической сложности восстановления и рост нагруженности на деталь при выполнении операций приводят к росту ΔK. Очевидно, что ценовая политика в этом случае также будет играть значительную роль.

Это подтверждается столбчатой диаграммой (рис. 5), которая показывает, что наибольший ΔK присущ восстановленному составному лемеху в сборе, а это самая нагруженная деталь из рассматриваемых.

Значения коэффициентов эффективности показывают целесообразность использования предлагаемых технологических приемов восстановления.

Таким образом, применение способа КТЭ является высокоэффективным, что подтверждается техническими, технологическими, эксплуатационными и экономическими критериями. Технические и технологические критерии: простота и доступность реализации, использование вторичного сырья, отсутствие необходимости в высококвалифицированных кадрах

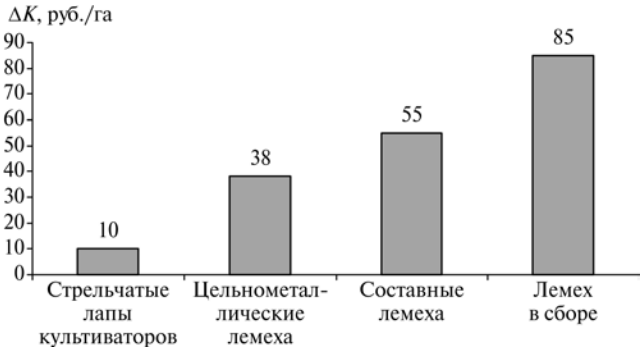


Рис. 5. Средние значения сравнительного критерия экономической эффективности применения способа КТЭ

и сложном оборудовании. Эксплуатационный критерий – увеличение ресурса на 20...250 %. Экономические критерии: снижение цены восстановленной детали на 10...50 %, сравнительный критерий экономической эффективности, значительно больший единицы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. РФ № 2413601**, 10.03.2011.

2. **Пат. РФ № 2392102**, 27.10.2008.

3. **Михальченков А.М., Лялякин В.П., Кожухова Н.Ю., Горбачев Р.В.** Возобновление ресурса лемехов // Сельский механизатор. 2013. № 2. С. 34–35.

4. **Кожухова Н.Ю., Михальченкова М.А.** Анализ дефектов восстановленных стрельчатых лап импортных посевных комплексов и их влияние на возможность повторного использования // Труды ГОСНИТИ. 2014. Т. 114. С. 134–139.

5. **Михальченков А.М., Будко С.И.** Стойкость к абразивному изнашиванию восстановленных и упрочненных лемешных долот Lemken // Тракторы и сельхозмашины. 2012. № 7. С. 45–48.

6. **Сильман Г.И.** Материаловедение: Учеб. пособие для втузов. Брянск: Изд-во Брянской государственной инженерно-технологической академии (БГИТА), 2006. 89 с.

УДК 621.793

[1] С.Д. Латушкина, [2]Д.В. Куис, [1]А.Г. Жижченко, [1] О.И. Посылкина, [2] П.В. Рудак, [3] В.М. Комаровская
([1]Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск,
[2]Белорусский государственный технологический университет, г. Минск,
[3]Белорусский национальный технический университет, г. Минск)
E-mail: phti@tut.by

Вакуумно-плазменные защитные покрытия на деворежущий инструмент

Показано, что формирование на рабочей поверхности деворежущего инструмента вакуумно-плазменных многокомпонентных покрытий позволяет улучшить износостойкость поверхности режущего материала, а также уменьшить тепловую нагрузку в зоне резания. Установлено, что для образования однородной структуры покрытия по объему необходимо устанавливать потенциал смещения на подложке 60 В. Выявлено, что при определенной концентрации легирующего элемента (алюминия) происходит формирование наноразмерной структуры покрытия, что положительно сказывается на его физико-механических и эксплуатационных свойствах.

Ключевые слова: *многокомпонентные покрытия, вакуумно-дуговое осаждение, сепарация, износостойкость, наноструктура, шероховатость.*

It's shown, the generation of the vacuum-arc multicomponent coatings on the wood-cutting tool operating surface allows improving the cutting tool wear resistance and also reducing the thermal load in the cutting area. It's found, that in order to get the uniform coatings structure by volume it's necessary to set the bias substrate 60 V. It's revealed that the generation of the nanosized coatings structure takes place under certain alloying element (aluminum) concentration and it has a positive influence on its physical-mechanical and operating properties.

Keywords: *multicomponent coatings, vacuum-arc deposition, separation, wear resistance, nanostructure, roughness.*

Введение

В современном деревообрабатывающем производстве все в большей степени используются ресурсосберегающие, экологически чистые технологии, позволяющие не только повышать производительность обработки резанием, но и обеспечивать функционирование с оптимальными экономическими показателями. В то же время прогрессивные режимы резания требуют применения высоконадежного режущего инструмента, исключающего простои станочного оборудования и повышенный расход дорогостоящих инструментальных материалов. В свою очередь, режущие элементы деревообрабатывающего инструмента работают в специфических условиях, отличных от условий для металлообрабатывающего инструмента. Это связано, в первую очередь, с принципиальным отличием в теплофизике резания неметаллических материалов, обусловленным их физико-механическими свойствами (низкая теплопроводность, влажность, высокая гигроскопичность и т. д.), технологическими режимами обработки (большая частота вращения, динамический характер нагружения режущих элементов, исключение смазочно-охлаждающих жидкостей). В результате в поверхностных слоях инструментального материала возникают большие градиенты температур, которые создают циклические температурные напряжения в теле резца и условия для развития усталостного механизма изнашивания инструментального материала [1]. Увеличение выпуска труднообрабатываемых древесных материалов и повышение требований к качеству продукции также обусловливают повышение требований к эксплуатационным свойствам режущих инструментов. Так, при обработке ДСТП-материалов имеет место абразивное изнашивание инструмента твердыми включениями, воздействующими на его поверхность.

Исходя из этого защитные слои, формируемые на поверхности деворежущего инструмента, должны выполнять следующие функции:

1) высокотвердого поверхностного слоя, снижающего абразивное изнашивание рабочих поверхностей инструмента в процессе резания;

2) барьерного слоя, препятствующего изменению физико-механических свойств материала инструмента в результате повышенных теплосиловых нагрузок;

3) барьерного слоя, способного тормозить или останавливать распространение сетки усталостных трещин, приводящей к макровыкрашиванию рабочих кромок.

Этим требованиям в наиболее полной мере отвечают композитные наноструктурированные многокомпонентные покрытия. Технология осаждения тонких покрытий является одним из способов получения наноструктурированных материалов, функциональные свойства (физико-механические, химические, оптические и др.) которых могут существенно отличаться от свойств соответствующих материалов в компактном состоянии. Причем прогресс в области получения новых материалов с высокой износо- и коррозионной стойкостью на основе наноматериалов наиболее ярко демонстрируется на примере развития технологии формирования вакуумно-дуговых покрытий. Технология вакуумно-дугового осаждения позволяет получать многокомпонентные нанокристаллические покрытия из тугоплавких соединений с гораздо более мелким зерном, чем в случае других альтернативных нанотехнологий (компактирование из ультрадисперсных порошков, кристаллизация из аморфной фазы, интенсивная пластическая деформация и т. п.). Материалом покрытия, способным удовлетворить столь широкий спектр требований, является соединение (Ti, Al)N, при определенном соотношении в кристаллической решетке атомов титана и алюминия обладающее уникальным сочетанием свойств: высокой твердостью, износостойкостью, термической стабильностью и одновременно высоким коэффициентом упругого восстановления и низким коэффициентом трения [2].

Следует отметить, что осаждение покрытий сложного элементного состава наталкивается на трудности, связанные с необходимостью получения однородной многокомпонентной плазмы [3]. Существует несколько методов для создания многокомпонентной плазмы [4, 5]:

а) одновременное распыление нескольких катодов (мишеней) различного элементного состава;

б) применение мозаичных катодов, состоящих из нескольких однокомпонентных частей;

в) использование композиционных катодов, полученных с помощью самораспространяющегося высокотемпературного синтеза (СВС) в многокомпонентных порошковых смесях целевого состава.

Применение мозаичных катодов часто приводит к технологическим сложностям из-за различных скоростей дуговой эрозии частей катода. В случае получения катодов СВС-методом сложно варьировать их элементный состав в широком интервале, так как предлагаемый метод может быть реализован в ограниченном диапазоне концентраций порошковых компонентов. При этом как для мозаичных катодов, так и в случае катодов, полученных СВС-методом, не всегда удается сохранить фазовую идентичность материала катода и осажденного покрытия. Поэтому представляет интерес способ одновременного распыления нескольких катодов, изготовленных из чистых металлов, при котором конденсация покрытия происходит из ионных потоков от нескольких источников.

Цель настоящей работы – повышение работоспособности дереворежущего инструмента за счет оптимизации технологического процесса осаждения (Ti, Al)N-покрытий из сепарированной многокомпонентной плазмы.

Материалы и методы исследований

В рассматриваемой работе для формирования многокомпонентных покрытий использовали вакуумно-дуговую технологию осаждения многофазных покрытий при одновременном распылении двух материалов. Процесс формирования покрытия осуществлялся с использованием установки модели УРМ 3.279.048, предназначенной для нанесения износостойких, упрочняющих и декоративных покрытий методом электродугового напыления. Следует отметить, что одной из основных проблем, возникающих при формировании вакуумно-дуговых покрытий, является наличие капельной фазы, которое отрицательно сказывается на качественных и эксплуатационных характеристиках покрытий. Использование сепарирующих устройств, позволяющих минимизировать содержание капельной фазы в плазменном потоке, является одним из перспективных путей решения данной проблемы [6]. В данной работе предложено использование Y-образной сепарирующей системы при двухкатодном распылении (рис. 1).

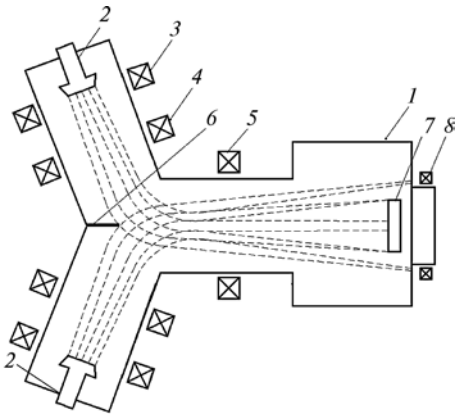


Рис. 1. Схема осаждения многокомпонентных покрытий с сепарацией плазменных потоков:

1 – корпус; *2* – дуговой испаритель; *3–5*, *8* – электромагнитная катушка; *6* – экран для удаления капельной фазы; *7* – подложка

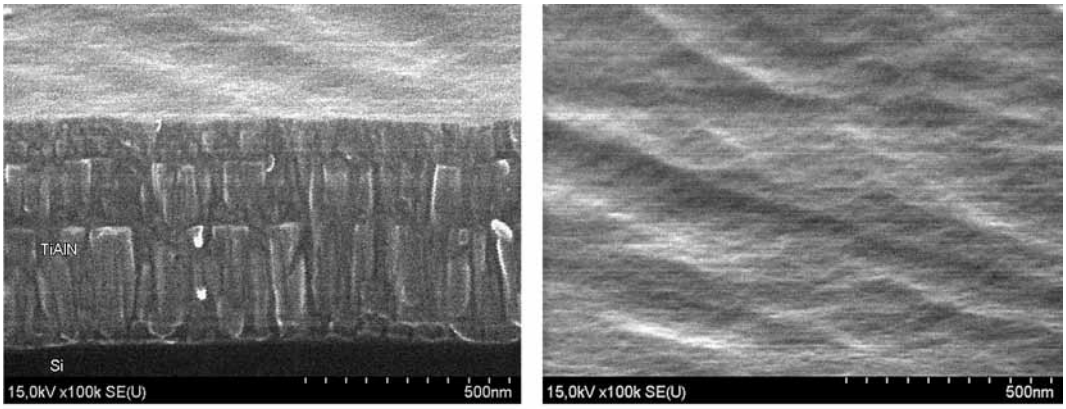
Два разноименных дуговых испарителя *2* расположены симметрично под углом 120° к оси падения общего плазменного потока на подложку *7*. Ионизированные части каждого из плазменных потоков отклоняются на 120° с помощью электромагнитных катушек *5* и *8*, и их общий поток попадает в вакуумную камеру. Фокусировка каждого из двух плазменных потоков производится с помощью электромагнитных катушек *3* и *4*. Экран *6* обеспечивает удаление капельной фазы из плазменных потоков и осаждение ее на стенках камеры.

Для получения покрытий были использованы катоды из титана марки ВТ1-0 и алюминия высокой чистоты марки А99. Осаждение при различных режимах осуществлялось на подложки из кремния и твердого сплава при парциальном давлении азота $0{,}2\cdot10^{-2}$ Па, токе дуги титанового катода 40...60 А, токе дуги алюминиевого катода 40...70 А, потенциале смещения на подложке 20...70 В. Для определения механических характеристик и проведения испытаний на стойкость использовали неперетачиваемые твердосплавные пластины для концевого фрезерного деревообрабатывающего инструмента, для исследования структуры, элементного и фазового состава покрытий – на подложки из кремния. Рентгеноструктурный анализ производился на дифрактометре ДРОН-3М в фильтрованном излучении CuKα. По положению дифракционных линий определяли период решетки выявленных фаз в направлении нормали к поверхности покрытия *d* и размер областей когерентного рассеяния *L*. Исследование структуры покрытий проводилось с использованием просвечивающего электронного микроскопа РЭМ S-4800 Hitachi при ускоряющем напряжении 1 кВ. Микротвердость Н покрытий измерялась с использованием нанотвердомера Duramin 5 при нагрузке 25 г. Для определения шероховатости покрытий использовался цеховой профилометр 296-й модели с цифровым отсчетом и индуктивным преобразователем. Для проведения триботехнических исследований применялся испытательный стенд, реализующий трение по схеме «сфера–плоскость». Трибологические свойства осажденных покрытий исследовались при следующих параметрах: контртело–шарик ∅ 5,5 мм, изготовленный из подшипниковой стали ШХ15, нагрузка на контртело 0,4 Н, скорость вращения образца 120 мин$^{-1}$, радиус контртела 10 мм, время испытаний 1 ч. Испытания проводились на воздухе при отсутствии смазки. Испытания на износ режущих пластин с покрытием проводились на деревообрабатывающем центре с ЧПУ ROVER B 4.35 фирмы BIESSE. В качестве обрабатываемого материала использовали древесно-стружечную плиту с отделкой с двух сторон ламинатом (EN 14322) производства Pfleiderer Grajewo S.A. (Польша). Толщина плиты – 18 мм, средняя плотность – 650 кг/м^3, содержание связующего – 8 %. Режимы обработки: диаметр концевой фрезы 21 мм; частота вращения концевой фрезы – 14 000 мин$^{-1}$; скорость подачи – 6,6 м/мин; снимаемый припуск – 21 мм. После каждого прохода фрезы осуществлялся визуальный контроль качества обработанных поверхностей отделенного участка и заготовки с использованием лупы с 20-кратным увеличением. Критерием потери режущей способности фрезы при испытаниях являлись сколы отделки плиты. При обнаружении дефекта диагностировался момент достижения фрезой предела работоспособности.

Результаты исследований и их обсуждение

Как показали проведенные исследования, морфология поверхности покрытий (Ti, Al)N характеризуется микроячеистой структурой, аналогичной структуре покрытий на основе чистого титана. Отсутствие капель на поверхности и в объеме покрытия (рис. 2) свидетельствует об эффективной работе сепарирующей системы.

Исходная шероховатость твердосплавных пластин *Ra* составляла 0,09...0,1 мкм. После осаждения покрытия в зависимости от количества легирующего элемента в его составе *Ra* повысилась незначительно, до 0,15...0,3 мкм. Известно, что шероховатость вносит существенный вклад в процесс трения в качестве деформационной составляющей [7], поэтому достигнутый



а) *б)*

Рис. 2. Морфология поверхности (*а*) и фрактограмма (*б*) осаждаемых покрытий под углом 90° при увеличении 100 000

результат является важным с точки зрения повышения эксплуатационных свойств покрытий.

Важным моментом для установления физических закономерностей формирования многокомпонентных покрытий является определение зависимости элементного состава покрытий от технологических параметров осаждения. Известно, что в плазме ионизируется 80 % титана и 50 % алюминия [8], поэтому на формирование структуры и фазового состава покрытий существенное влияние должны оказывать потенциал смещения на подложке и ток дугового разряда – технологические параметры, определяющие энергию осаждаемых ионов.

Анализ полученных результатов показал, что процентное содержание алюминия в покрытии прямо пропорционально току дугового разряда на алюминиевом катоде (рис. 3).

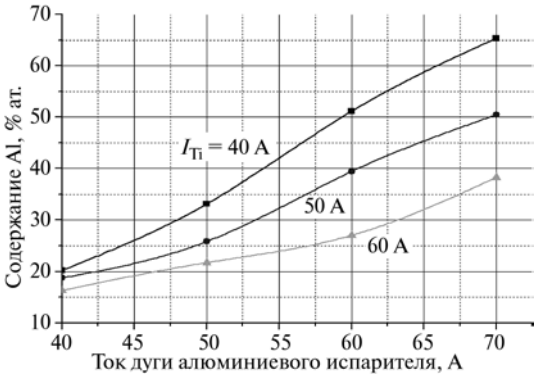


Рис. 3. Зависимости содержания алюминия в покрытии от тока дуги алюминиевого испарителя (напряжение смещения на подложке 60 В) при различных токах титанового испарителя I_{Ti}

В то же время установлен факт, что несмотря на увеличение тока дугового разряда содержание алюминия в покрытии уменьшается с увеличением напряжения смещения свыше 40 В (рис. 4). Эффект обратного рассеяния ионов распыляемого металла на поверхности подложки при больших значениях напряжения смещения (свыше 200 В) хорошо известен [6]. Однако в случае осаждения покрытий (Ti, Al)N изменение фазового состава наблюдается при значительно меньших значениях потенциала смещения.

По-видимому, это происходит по нескольким причинам. В нашем случае для ионов алюминия, обладающих меньшей массой,

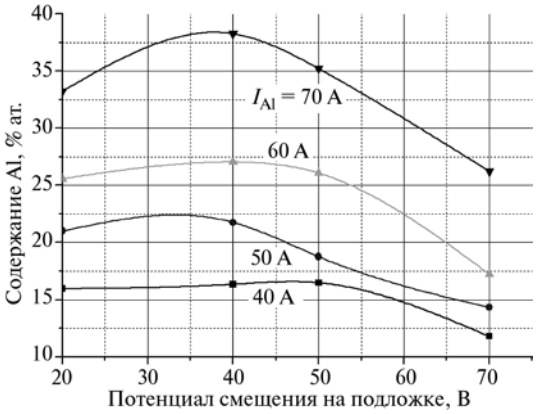
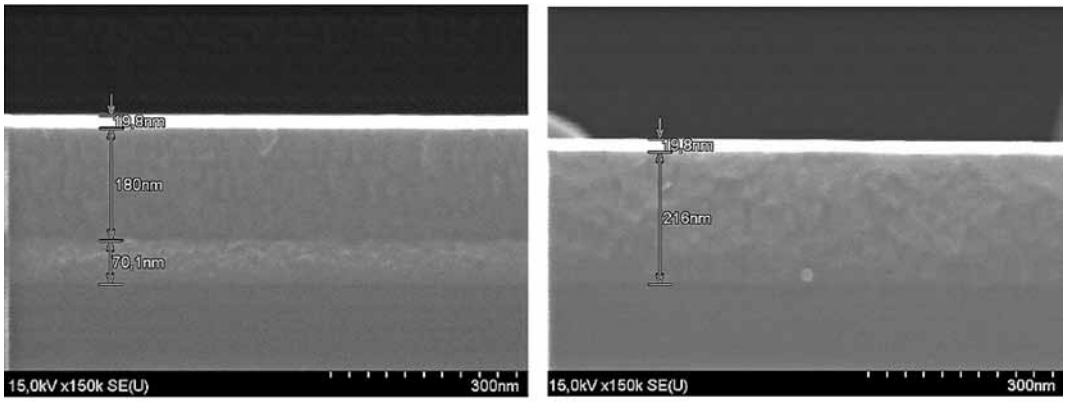


Рис. 4. Зависимость содержания алюминия в покрытии от потенциала смещения на подложке при различных токах дуги алюминиевого испарителя. Ток дуги титанового испарителя 60А

чем ионы титана, необходима и более низкая энергия для реиспарения с поверхности конденсации [6]. Поэтому в определенном интервале значений потенциала, подаваемого на подложку, ионы алюминия начинают рассеиваться, в то время как ионы титана продолжают процесс конденсации. Существенный вклад в полученные закономерности вносит и процесс сепарации плазменного потока. Как известно, скорость эрозии катода определяется подаваемым разрядным током и материалом катода. Так, коэффициент эрозии катода для Al составляет 1,25, в то время как для Ti он равен 0,53 [6]. Учитывая это обстоятельство и тот факт, что в плазме ионизируется больше титана, чем алюминия [8], можно предположить, что значительная доля алюминия в виде капельной фазы оседает на стенках плазмовода.

Как показали исследования (рис. 5), наблюдается существенное различие структуры покрытий, осаждаемых при различных значениях потенциала смещения.

Неоднородность структуры конденсатов (рис. 5, *а*) при низких значениях потенциала смещения, по-



а) *б)*

Рис. 5. Фрактограммы покрытий (Ti, Al)N, полученные при различных значениях напряжения смещения на подложке $U_п$:

а – $U_п$ = 40 В; *б* – $U_п$ = 60 В

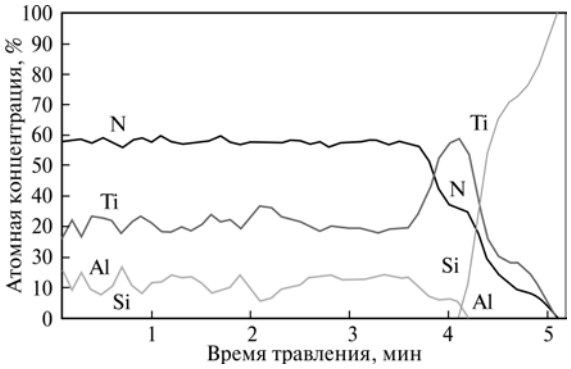


Рис. 6. Распределение элементов по толщине пленок (Ti, Al)N

видимому, обусловлена как низкой энергией ионов титана, недостаточной для протекания диффузионных процессов в объеме покрытия, так и преимущественным осаждением ионов алюминия на начальном этапе осаждения покрытия вследствие различия атомных масс распыляемых материалов. Таким образом, с точки зрения технологичности для осаждения покрытий представляется оптимальным выбор потенциала смещения 60 В.

Как показало ступенчатое травление пленки (Ti, Al)N, полученной при потенциале смещения 60 В, с помощью высокоэнергетического пучка ионов аргона, распределение элементов в пленках (Ti, Al)N по толщине является равномерным, что свидетельствует о достижении необходимой степени смешения плазменных потоков в сепарирующей системе (рис. 6). Это является существенным фактором при использовании технологии в промышленных целях, так как сохранение элементного состава по толщине в покрытии при работе инструмента в реальных условиях (уменьшение толщины в результате износа) обеспечивает стабильность его упрочняющих свойств при длительной работе.

Из фазовой диаграммы системы Ti–Al–N [9] следует, что в равновесных условиях Al и N плохо растворимы в TiN и TiAl соответственно, а при высоких температурах образуются тройные соединения Ti_2AlN, Ti_3AlN и $Ti_3Al_2N_2$ в зависимости от давления азота и содержания алюминия и титана [10].

В результате рентгеновских исследований установлено, что при концентрации алюминия в покрытии менее 30 % ат. наблюдаются линии кристаллической фазы соединения TiAlN, представляющей собой твердый раствор Al в решетке TiN с кубической структурой типа NaCl. При дальнейшем увеличении концентрации алюминия в покрытии появляются линии кристаллической фазы $Ti_3Al_2N_2$ с гексагональной структурой, однако данная фаза является нестабильной и при концентрации свыше 55 % ат. происходит ее распад в фазу TiN с кубической структурой и фазу AlN со структурой вюрцита. Таким образом, элементный состав покрытий (Ti, Al)N оказывает значительное влияние на их физико-механические свойства (табл.).

Физико-механические характеристики покрытий (Ti, Al)N

Покрытие	I_{Ti}, А	I_{Al}, А	Ti, % ат.	Al, % ат.	d, нм	L, нм	H, ГПа
TiN	60	–	60,21	–	0,429	28	26,5
(Ti, Al) N	60	40	91,81	8,19	0,423	24	29,8
		50	84,19	15,81	0,421	20	34,9
		60	73,32	26,68	0,419	14	32,1
		70	63,79	36,21	0,417	15	36,1
AlN	–	60	–	58,23	–	76	19,2

Полученные результаты согласуются с данными, приведенными в литературе, где показано, что пленка (Ti, Al)N характеризуется кубической структурой TiN с уменьшенным периодом решетки, если атомная концентрация Al не превосходит 60 % [10].

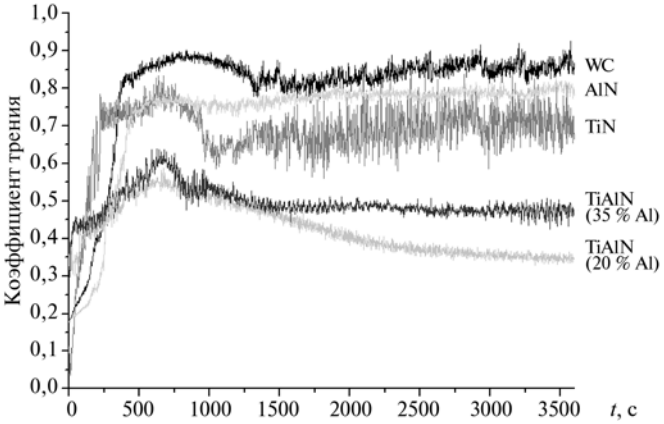


Рис. 7. Коэффициент трения вакуумно-дуговых покрытий на твердом сплаве

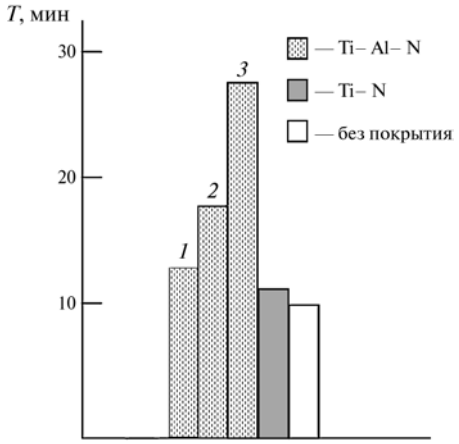


Рис. 8. Зависимость периода стойкости *T* твердосплавных пластин с покрытиями (Ti, Al)N от концентрации алюминия в составе покрытия:
1 – 8 % ат. Al; *2* – 26 % ат. Al; *3* – 36 % ат. Al

Коэффициент трения режущих пластин с покрытием системы Ti–Al–N находится в пределах от 0,31 до 0,5 (рис. 7), что существенно ниже, чем у пластин с покрытием TiN (0,7...0,8) и у пластин без покрытия (0,9). Это связано с тем, что при трении без смазки большое влияние на коэффициент трения оказывает наличие пластичного материала (Al). Уменьшение коэффициента трения обеспечивает снижение температуры в зоне резания и, как следствие, приводит к повышению износостойкости дереворежущего инструмента с покрытием.

При обработке древесно-стружечных плит твердосплавные режущие пластины с покрытиями (Ti, Al)N показали более высокую работоспособность при высоких скоростях, а следовательно, и температурах по сравнению с покрытиями TiN (рис. 8).

Выводы

В результате проведенных экспериментальных исследований доказана эффективность разработанной сепарирующей системы, которая позволила получать (Ti, Al) N-покрытия с микроячеистой структурой, низкой шероховатостью (Ra = 0,15...0,3 мкм) и равномерным распределением элементов покрытия по толщине, что положительно сказывается на физико-механических свойствах покрытий. Также выявлено, что на структуру покрытий существенное влияние оказывает потенциал смещения на подложке, причем его оптимальное значение составляет 60 В. При этом значении обеспечивается однородная структура покрытия.

Установлено, что увеличение процентного содержания алюминия в покрытии приводит к уменьшению размера зерна, что, в свою очередь, приводит к увеличению микротвердости покрытия, снижению коэффициента трения и увеличению периода стойкости инструмента с покрытием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.
2. **Верещака А.С.** Современные технологии в машиностроении. Харьков, 2007. 248 с.
3. **Гурских А.В.** Разработка спеченных Ti–Cu, Ti–Si катодов для ионно-плазменного нанесения наноструктурных нитридных покрытий: автореф. ... канд. техн. наук. Томск, 2012. 17 с.
4. **Коваль Н.Н., Иванов Ю.Ф., Гончаренко И.М. и др.** Структура и свойства нанокристаллических покрытий Ti–Si–N, синтезированных в вакууме электродуговым методом // Известия вузов. Физика. 2007. № 2. С. 46–51.
5. **Goncharenko I.M., Ivanov Y.F., Lobach M.I. et al.** Nanostructured nitride coating produced by vacuum arc evaporation of sintered Ti–Al cathodes // 9th International Conference on Modification of Materials with Particle Beams and Plasma Flows: Proceedings. Tomsk: Publishing house of the IAO SB RAS, 21–26 September. 2008. P. 430–433.
6. **Мрочек Ж.А., Вершина А.К., Иващенко С.А. и др.** Плазменно-вакуумные покрытия. Минск: УП «Технопринт», 2004. 369 с.
7. **Штанский Д.В., Левашов Е.А.** Многокомпонентные наноструктурные тонкие пленки: проблемы и решения // Известия вузов. Цветная металлургия. 2001. № 3. С. 52–62.
8. **PalDey S., Deev S.C.** Single Layer and Multilayer Wear Resistant Coatings of (Ti, Al)N: A Review Materials Science and Engineering. A. 2003. Vol. 342. P. 58–79.
9. **Holm B., Ahuja R., Li S., Johansson B.** Theory of the ternary layered system Ti–Al–N // J. Appl. Phys. 2002. Vol. 91. P. 9874–9877.
10. **Tentardini E.K., Aguzzoli C., Castro M. et al.** Reactivity between aluminum (Ti, Al)N coatings for casting dies // Thin Solid Films. 2008. Vol. 516. P. 3062–3069.

УДК 621.9.047

С.Ю. Жачкин, А.И. Болдырев, А.А. Болдырев, В.В. Михайлов, Д.В. Гедзенко, Н.А. Пеньков
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: alexboldyrev@yandex.ru

Антикоррозионная защита металла методом гальвоноконтактного осаждения

Представлены материалы по практическому применению метода гальваноконтактного осаждения покрытий в целях повышения коррозионной устойчивости стальных конструкционных материалов. Приведены практические режимы реализации метода.
Ключевые слова: *износостойкость, гальванические композитные покрытия.*

Materials of practical application of a method galvanic contact plating sedimentation of galvanic coverings for the purpose of increase of corrosion stability of steel constructional materials are presented. Practical modes of realization of a method are resulted.
Keywords: *wear resistance, galvanic composite coverings.*

Введение

В современном машиностроении все большее количество деталей работает в агрессивной среде и, соответственно, нуждается в антикоррозионной защите. В этих целях на предприятиях применяются различные технологические приемы. Однако в подвижных соединениях деталей машин защитная пленка должна обладать не только антикоррозионными свойствами, но и хорошей износостойкостью. Этим требованиям в наилучшей степени отвечают различные гальванические покрытия, в частности гальваническое хромирование. Однако стандартное хромирование, замедляя процесс коррозии основного металла, не в силах остановить его полностью. Связано это с имеющимися в хромовом покрытии порами и сеткой трещин, по которым агрессивная среда проникает к основному металлу, вызывая его разрушение. Более того, слои хрома, которые пронизаны порами и трещинами, не только не образуют никакой защиты от коррозии на неблагородных металлах основания, но и значительно ускоряют ее [1].

Следовательно, для гарантированной защиты черных металлов от коррозии необходимо покрытие без пор и трещин. Такие покрытия называют герметичными. Получить их можно разработанным способом гальваноконтактного осаждения (ГКО) [2] на режимах осаждения беспористых покрытий [3].

Проведение исследований

Суть метода заключается в послойном упругопластическом деформировании растущего гальванического покрытия при одновременном внедрении в него инородных частиц в процессе осаждения. Для реализации технологии ГКО в промышленности был создан целый ряд технологического оборудования и оснастки [4]. На рис. 1 представлена автоматизированная уста-

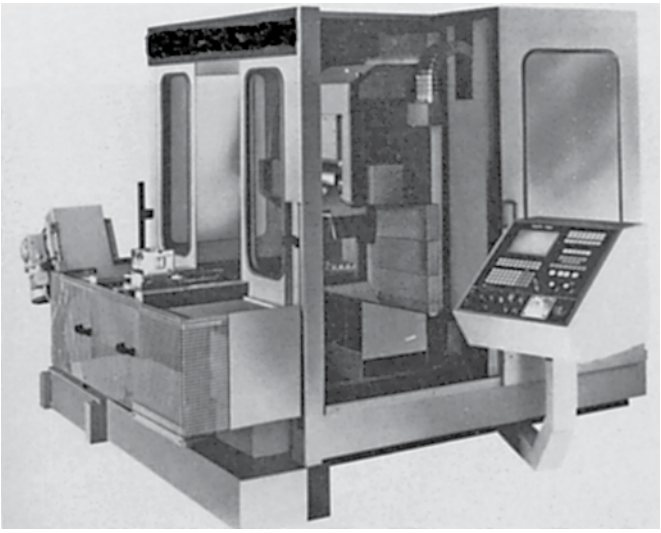


Рис. 1. Установка для ГКО

Рис. 2. Головка для ГКО

Рис. 3. Шток для испытаний

новка для нанесения покрытий на цилиндрические поверхности. Отличие данного оборудования от его предшественников заключается в полностью автоматизированном цикле нанесения покрытий гарантированного качества и закрытой циркуляции электролита, что позволяет в значительной степени улучшить экологическую обстановку на производстве.

Для восстановления различных типов цилиндрических поверхностей разработана и изготовлена специальная головка для ГКО, изображенная на рис. 2.

Полученные способом ГКО покрытия подвергались проверке на коррозионную устойчивость наравне с образцами, имеющими гальваническое хромовое покрытие, осажденное по стандартной технологии. Исследования проводились по ГОСТ 9.308–85 на серийных штоках, восстановленных по разным технологиям. Серия 1 – детали, восстановленные по стандартной технологии. Серия 2 – детали, восстановленные по технологии ГКО на режимах, обеспечивающих получение беспористых хромовых покрытий. Толщина покрытий в обеих сериях составляла 120 мкм. Коррозионные исследования проводились в камере соляного тумана КСТ-2 в атмосфере распыленного раствора хлористого натрия концентрацией 5 кг/м^3 при температуре 35 °С по ГОСТ 9.308–85 в течение 240 ч. Раствор изготовлялся путем растворения NaCl (ГОСТ 4233–77) в дистиллированной воде (ГОСТ 6709–72). Оценку результатов испытаний проводили в соответствии с ГОСТ 9.908–85. Детали для испытаний готовили по ГОСТ 9.909–86. Внешний вид испытуемых деталей представлен на рис. 3. Результаты экспериментов приведены на рис. 4.

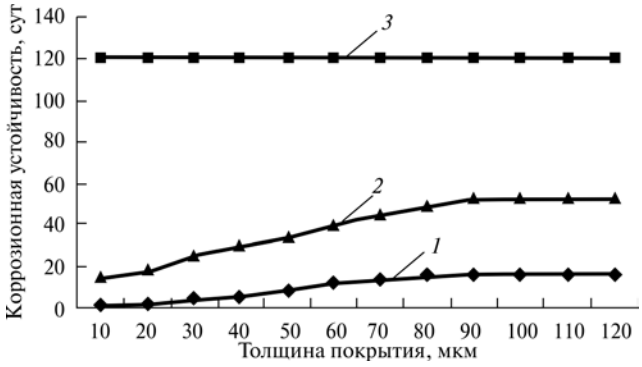


Рис. 4. Коррозионная устойчивость покрытий

Обсуждение результатов исследований

Из данных, представленных на рис. 4, ясно видно, что стандартные хромовые покрытия, представленные кривой *1,* по мере увеличения толщины увеличивают свою коррозионную устойчивость, однако незначительно. Применение различных технологических приемов, например алмазного выглаживания, позволяет в некоторой степени увеличить их коррозионную устойчивость, что показывает кривая *2.* Однако получаемый в этом случае эффект мал по сравнению со стойкостью к коррозии, демонстрируемой покрытиями, полученными по технологии ГКО, которые представлены на рис. 4 кривой *3.* Авторы объясняют такой эффект значительного повышения коррозионной устойчивости гальванических хромовых покрытий, полученных по технологии ГКО, тем, что данный тип покрытий характеризуется отсутствием сетки пор и трещин на поверхности, что присуще их гальваническим покрытиям, осаждаемым по стандартной технологии. К этому необходимо добавить, что, во-первых, как показали исследования, толщина покрытий, полученных по технологии ГКО, практически не влияет на их способность противостоять вредному воздействию агрессивных сред, во-вторых, метод ГКО позволяет наносить покрытия без дорогостоящей механической обработки, необходимой для повышения их коррозионной устойчивости.

Выводы

Анализируя результаты проведенных экспериментов, которые полностью подтверждают теорию о первостепенности влияния пористости покрытия на его коррозионную стойкость, можно утверждать, что метод ГКО, рекомендованный для восстановления деталей гальваническими покрытиями, превосходит известные достижения технологии в этой области.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Жачкин С.Ю., Сидоркин О.А.** Расчет напряжений в дисперсно-упрочненных композитах, полученных методом

ГКО // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 10. С. 36–38.

2. **Пат. 2224827 РФ**, МПК[7] С 25 В 5/22. Способ гальваномеханического восстановления токопроводящих деталей / Жачкин С.Ю., Лабузов В.В., Смоленцев В.П., Болдырев А.И. (РФ). № 2002102130; Заявл. 23.01.02; Опубл. 27.02.04; Бюл. № 6. 4 с.

3. **Жачкин С.Ю., Болдырев А.И., Болдырев А.А., Пеньков Н.А.** Получение хромовых покрытий с заданными свойствами методом гальваноконтактного осаждения // Вестник ВГТУ. 2012. № 12.1. С. 12–16.

4. **Жачкин С.Ю., Живогин А.А., Пеньков Н.А., Сидоркин О.А., Лазукин В.Ф.** Повышение износостойкости деталей гидроприводов прессового оборудования // Заготовительные производства в машиностроении. 2012. № 8. С. 38–41.

УДК 621.785

В.Н. Коренев
(Всероссийский научно-исследовательский технологический институт ремонта и эксплуатации машинно-тракторного парка ФГ БНУ ГОСНИТИ, г. Москва)
E-mail: korenev_vlad@list.ru

Обоснование микротвердости покрытий при напылении водородно-кислородным пламенем

Теоретически обосновано увеличение микротвердости покрытий при напылении водородно-кислородным пламенем с органической добавкой пропан-бутана за счет образования оксидов кремния, хрома, бора и карбидов кремния и бора. Экспериментально установлено, что применение добавки пропан-бутана к водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления позволяет повысить микротвердость получаемых покрытий.

Ключевые слова: *газопламенное напыление, микротвердость, водородно-кислородное пламя, органическая добавка, оксиды, карбиды.*

Theoretically justified increase in microhardness sprayed coatings during deposition of hydrogen-oxygen flame with an organic additive propane-butane due to the formation of oxides of silicon, chromium, boron and silicon carbide and boron. It was established experimentally that the use of additives propane-butane to hydrogen-oxygen mixture for flame spraying can increase the microhardness of the coatings obtained.

Keywords: *flame spraying, microhardness, hydrogen-oxygen flame, organic additive, oxides, carbides.*

Актуальность и задачи исследований

Для упрочнения и восстановления деталей машин широкое применение находит метод газопламенного напыления порошковых материалов. Благодаря своей технологической простоте и доступности при высоких показателях качества восстановленной поверхности метод газопламенного напыления используется для упрочнения и восстановления различных участков изношенных деталей.

Существенным недостатком газопламенного напыления является выделение при напылении продуктов сгорания органического топлива. Использование водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления дает возможность избавиться от этого недостатка [1].

Однако влияние водородно-кислородного пламени на процессы, происходящие с частицами напыляемого материала, сегодня еще практически не изучено. Обоснование и исследование этих процессов для разработки и внедрения технологии газопламенного напыления с использованием водородно-кислородного пламени является актуальной задачей.

Методы исследований

Науку о взаимных превращениях различных видов энергии называют термодинамикой. Термодинамика устанавливает законы превращений, направление самопроизвольного течения различных процессов в рассматриваемых условиях.

При химических реакциях происходят глубокие качественные превращения в системе, сопровождающиеся поглощением и выделением энергии. Раздел термодинамики, изучающий тепловые эффекты химических реакций, называют термохимией. Реакции, сопровождающиеся выделением теплоты, называют экзотермическими (изменение энтальпии $\Delta H < 0$), реакции, сопровождающиеся поглощением теплоты, – эндотермическими ($\Delta H > 0$). В термохимических реакци-

ях указывают количество выделенной и поглощенной теплоты. Значение ΔH приводят справа от уравнения, отделяя его запятой.

При любом процессе соблюдается закон сохранения энергии. Теплота Q, поглощенная системой, идет на изменение внутренней энергии ΔU и на совершение работы A:

$$Q = \Delta U + A \quad (1)$$

– это первый закон термодинамики.

Внутренняя энергия системы – это общий ее энергетический запас, включающий энергию различных видов: поступательную и вращательную энергию молекул, энергию движения электронов, внутриядерную энергию и т. д. Внутренняя энергия является функцией состояния, т. е. ее изменение определяется начальным и конечным состояниями системы и не зависит от пути перехода, по которому протекает процесс:

$$\Delta U = U_2 - U_1,$$

где ΔU – изменение внутренней энергии системы при переходе от начального состояния U_1 в конечное U_2.

Теплота и работа являются функциями состояния, так как связаны с процессом и зависят от массы тела. В химических реакциях A – работа против внешнего давления ($A = P\Delta V$, где P – давление; ΔV – изменение объема).

Большинство химических реакций проходит при постоянном давлении. Для изобарно-изотермических процессов (давление P = const, температура T = const) теплота

$$Q_P = \Delta U + P\Delta V. \quad (2)$$

Если сумму $\Delta U + P\Delta V$ обозначить через H, получим

$$Q_P = \Delta H, \quad (3)$$

где величина H – энтальпия. Энтальпия является функцией состояния. Ее изменение ΔH определяется только начальным и конечным состояниями системы и не зависит от пути перехода.

Теплота реакции в изохорно-изотермическом процессе (V = const, T = const), при котором $\Delta V = 0$, равна изменению внутренней энергии системы:

$$Q_V = \Delta U. \quad (4)$$

Теплоты химических процессов, протекающих при P = var, T = const и T = var, V = const, называют тепловыми эффектами.

При экзотермических реакциях энтальпия системы уменьшается ($\Delta H \to 0$), при эндотермических – энтальпия увеличивается ($\Delta H > 0$).

Термохимические расчеты базируются на законе Гесса: тепловой эффект химической реакции зависит только от природы и физического состояния исходных и конечных продуктов, но не зависит от пути перехода.

Следствие из закона Гесса: тепловой эффект химической реакции $\Delta H_{х.р}$ равен сумме теплот образования продуктов реакции $\Delta H_{обр}^{прод.}$ за вычетом суммы теплот образования исходных веществ $\Delta H_{обр}^{исх}$ с учетом коэффициентов перед формулами веществ:

$$\Delta H_{х.р} = \Sigma\Delta H_{обр}^{прод.} - \Sigma\Delta H_{обр}^{исх}. \quad (5)$$

Если рассматриваемый процесс – горение, то

$$\Delta H_{х.р} = \Sigma\Delta H_{гор}^{исх.} - \Sigma\Delta H_{гор}^{прод}. \quad (6)$$

Энтропия S так же, как внутренняя энергия, – тепловой эффект химической реакции, объем является свойством вещества и функцией состояния. Энтропия отражает движение частиц вещества и является мерой неупорядоченности системы. Она увеличивается с увеличением интенсивности движения частиц – при нагревании, испарении, плавлении.

Движущая сила процесса складывается из двух составляющих: силы, обусловленной стремлением к упорядочению (H), и силы, обусловленной стремлением к беспорядку (TS), так как энтропия растет с повышением температуры, можно считать, что мера беспорядка $\approx T\Delta S$.

При постоянном давлении и изменяющейся температуре общую движущую силу процесса, которую обозначают ΔG, можно найти из соотношения

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S. \quad (7)$$

Например, при протекании процесса напыления на изделие из материала 15ХГН2ТА (хромомарганцевоникелевая сталь с титаном и бором) порошковым материалом ПР-НХ17С4Р4, содержащим никель (температура плавления 1455 °С), бор (температура плавления 2075 °С), кремний (температура плавления 1415 °С), хром (температура плавления 1903 °С) в пламени с температурой 2700...3000 °С возможны несколько химических процессов, в ходе которых могут образоваться продукты, снижающие качество полученных покрытий.

Основная задача – определить возможность протекания химических реакций образования соответствующих оксидов и карбидов металлов и неметаллов при данной температуре и прогнозировать возможность изменения свойств материала.

Процесс горения протекает в две стадии.

Первая стадия

$$4H_2 + O_2 = 2H_2O + 2H_2. \quad (8)$$

Водород может быть восстановителем, однако с металлами, обладающими такими же свойствами, реагировать не будет.

Водород может взаимодействовать с кремнием:

$$\text{а) } Si + 2H_2 \rightarrow SiH_4 \text{ (силан);} \quad (9)$$

$$\text{б) } SiH_4 + O_{2\,(\text{воздуха})} \rightarrow SiO_2 + H_2O. \quad (10)$$

В ходе химической реакции возможно образование оксида кремния, который ухудшает качество напыления и прочность поверхности.

Определим возможность протекания реакции при температуре 2700 °С (2923 К) по формуле

$$\Delta G = \Delta H - T\Delta S: \quad (11)$$

$$\Delta S_{Si} = 18{,}83 \text{ Дж/(моль·К)};$$

$$\Delta S_{H_2\,(\text{газ})} = 130{,}52 \text{ Дж/(моль·К)};$$

$$\Delta S_{SiH_4} = 204{,}56 \text{ Дж/(моль·К)};$$

$$\Delta S_{\text{х.р}} = \Sigma\Delta S^{\text{прод}} - \Sigma\Delta S^{\text{исх}};$$

$$\Delta S_{\text{х.р}} = \Delta S_{SiH_4} - (\Delta S_{Si} + 2\Delta S_{H_2\,(\text{газ})});$$

$$\Delta S_{\text{х.р}} = 204{,}56 - 130{,}52\cdot 2 - 18 = -75{,}31 \text{ Дж/(моль·К)}.$$

Тепловой эффект химической реакции равен 34 кДж.

Поскольку температура по срезу пламени вдоль оси варьируется в диапазоне 2700...3000 °С, то для всех расчетов общую движущую силу процесса ΔG определяют для двух предельных значений этого диапазона, т. е. ΔG_1 при 2700 °С (2923 К) и ΔG_2 при 3000 °С (3273 К):

$$\Delta G_1 = 34{,}73 - 2923(-0{,}07531) = 254{,}9 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = 34{,}73 - 3273(-0{,}07531) = 281{,}2 \text{ кДж}.$$

Так как ΔG – изобарно-изотермический потенциал (энергия Гиббса), то при $\Delta G < 0$ процесс принципиально осуществим; при $\Delta G > 0$ процесс самопроизвольно протекать не может; при $\Delta G = 0$ система находится в состоянии равновесия.

В данном случае $\Delta G > 0$, следовательно, при указанных температурах реакция протекать не может.

Вторая стадия

$$2H_2O + 2H_2 + O_2 \rightarrow 4H_2O. \quad (12)$$

В ходе реакции используется кислород воздуха, который является окислителем металлов и неметаллов.

Определим роль кислорода и возможность протекания следующих процессов:

$$Si + O_2\,{}^{t}\!\rightarrow SiO_2; \quad (13)$$

$$4B + 3O_2\,{}^{t}\!\rightarrow 2B_2O_3; \quad (14)$$

$$4Cr + 3O_2\,{}^{t}\!\rightarrow 2Cr_2O_3; \quad (15)$$

$$2Ni + O_2\,{}^{t}\!\rightarrow 2NiO. \quad (16)$$

Значение ΔH и ΔS для различных химических соединений, а также ΔS для различных веществ приведены в табл. 1 и 2.

Таблица 1

Значения ΔH и ΔS для различных химических соединений

Соединение	ΔH, кДж/моль	ΔS, Дж/(моль·К)
SiO_2	–910,94	41,84
B_2O_3	–1270,43	53,84
Cr_2O_3	–1140,56	81,17
NiO	–239,74	37,99
CB_4	79,5	230,12
SiC	–66,8	16,62
CrC_4	–41,0	5,6

Таблица 2

Значения ΔS для различных веществ

Вещество	ΔS, Дж/(моль·К)
O_2	205,04
B	5,86
Ni	29,87
Si	18,83

Учитывая уравнение $\Delta G = \Delta H - T\Delta S$, можно определить самопроизвольно протекающие при данных условиях процессы:

1) $Si + O_2\,{}^{t}\!\rightarrow SiO_2$.

Для этого процесса

$\Delta H_{\text{х.р}} = \Delta H_{SiO_2} - (\Delta H_{Si} + \Delta H_{O_2}) = \Delta H_{SiO_2} = -910{,}94$ кДж/моль, так как теплота образования простых веществ равна нулю;

$$\Delta S_{\text{х.р}} = \Delta S_{SiO_2} - (\Delta S_{Si} + \Delta S_{O_2}) = 41{,}81 - 18{,}83 - 205{,}04 = -182{,}06 = -0{,}18206 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -910{,}94 - 2923(-0{,}18206) = -378{,}78 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -910{,}94 - 3273(-0{,}18206) = -315{,}03 \text{ кДж};$$

2) $4B + 3O_2\,{}^{t}\!\rightarrow 2B_2O_3$.

Для этого процесса

$$\Delta H_{\text{х.р}} = 2\Delta H_{B_2O_3} - (4\Delta H_B + 3\Delta H_{O_2}) = 2\,(-1270{,}43) = -2540{,}86 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{\text{х.р}} = 2\Delta S_{B_2O_3} - (4\Delta S_B + 3\Delta S_{O_2}) = 2\cdot 53{,}84 - 4\cdot 5{,}86 - 3\cdot 205{,}04 = -530{,}58 = -0{,}53 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -2540{,}86 - 2923(-0{,}53) = -991{,}67 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -2540{,}86 - 3273(-0{,}53) = -806{,}15 \text{ кДж};$$

3) $4Cr + 3O_2 \xrightarrow{t} 2Cr_2O_3$.

Для этого процесса

$$\Delta H_{х.р} = 2\Delta H_{Cr_2O_3} - (4\Delta H_{Cr} + 3\Delta H_{O_2}) = 2(-1140{,}56) = -2281{,}12 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{х.р} = 2\Delta S_{B_2O_3} - (4\Delta S_B + 3\Delta S_{O_2}) = 2\cdot 81{,}17 - 4\cdot 23{,}64 - 3\cdot 205{,}04 = -547{,}34 = -0{,}547 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -2281{,}12 - 2923(-0{,}547) = -677{,}32 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -2281{,}12 - 3273(-0{,}547) = -490{,}79 \text{ кДж};$$

4) $2Ni + O_2 \xrightarrow{t} 2NiO$.

Для этого процесса

$$\Delta H_{х.р} = 2\Delta H_{NiO} - (2\Delta H_{Ni} + \Delta H_{O_2}) = 2(-239{,}74) = -479{,}5 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{х.р} = 2\Delta S_{NiO} - (2\Delta S_{Ni} + \Delta S_{O_2}) = 2\cdot 37{,}99 - 2\cdot 29{,}87 - 205{,}04 = -188{,}8 = -0{,}189 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -479{,}5 - 2923(-0{,}189) = 74{,}65 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -479{,}5 - 3273(-0{,}189) = 139{,}01 \text{ кДж}.$$

В данном случае $\Delta G > 0$, следовательно, при рассматриваемых температурах реакция протекать не может.

При горении кислородно-водородной смеси активно протекают процессы окисления металлов, приводящие к образованию оксидов соответствующих металлов и неметаллов (ΔG имеет значение от –500 до –300 кДж).

При использовании примеси пропана и бутана в пламени необходимо выяснить роль углерода в окислительно-восстановительных процессах, протекающих при рассматриваемых температурах. При горении смеси углеводородов образуется углекислый газ, который может быть восстановлен водородом до свободного углерода. Углерод, в свою очередь, может образовывать карбиды металлов, улучшающие свойства сплавов.

Для реакций

1) $C + 4B \rightarrow CB_4$, (17)

2) $C + Si \rightarrow SiC$, (18)

3) $C + Cr \rightarrow Cr_4C$ (19)

рассчитаем изобарно-изотермический потенциал:

1) $C + 4B \rightarrow CB_4$.

Для этой реакции

$$\Delta H_{х.р} = \Delta H_{CB_4} - \Delta H_C - 4\Delta H_B = 79{,}5 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{х.р} = \Delta S_{CB_4} - \Delta S_C - 4\Delta S_B = 230{,}12 - 5{,}7 - 4\cdot 5{,}8 = 201{,}22 = 0{,}201 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = 79{,}5 - 2923\cdot(0{,}201) = -508{,}02 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = 79{,}5 - 3273\cdot(0{,}201) = -578{,}8 \text{ кДж};$$

2) $C + Si \rightarrow SiC$.

Для этой рекции

$$\Delta H_{х.р} = \Delta H_{SiC} - \Delta H_C - \Delta H_{Si} = -66{,}8 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{х.р} = \Delta S_{SiC} - \Delta S_C - \Delta S_{Si} = 16{,}62 - 18{,}8 - 5{,}74 = -7{,}92 = -0{,}008 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -66{,}8 - 2923(-0{,}008) = -43{,}416 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -66{,}8 - 3273(-0{,}008) = -40{,}62 \text{ кДж};$$

3) $C + Cr \rightarrow Cr_4C$.

Для этой реакции

$$\Delta H_{х.р} = \Delta H_{Cr_4C} - \Delta H_C - \Delta H_{Cr} = -41{,}0 \text{ кДж/моль};$$

$$\Delta S_{х.р} = \Delta S_{Cr_4C} - \Delta S_C - \Delta S_{Cr} = 5{,}6 - 18{,}8 - 23{,}6 = -36{,}8 = -0{,}0368 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_1 = -41{,}0 - 2923(-0{,}0368) = 66{,}6 \text{ кДж};$$

$$\Delta G_2 = -41{,}0 - 3273(-0{,}0368) = 79{,}45 \text{ кДж}.$$

Поскольку изобарно-изотермический потенциал больше нуля, реакция 3 неосуществима.

Анализируя изменение изобарно-изотермического потенциала в зависимости от температуры, необходимо отметить, что в данном температурном интервале образуются оксиды кремния, хрома, бора, карбиды кремния и бора, что увеличивает микротвердость напыленных покрытий.

Результаты исследований

Для выявления особенностей соединения напыленного металла и основного металла детали, а также для анализа структурных изменений и распределения температур в поверхностном слое детали были проведены металлографические исследования и измерение микротвердости поверхностного слоя. Металлографическому анализу подвергались обработанные газопламенным напылением порошковых материалов участки.

Для исследования покрытия с неоднородной по сечению структурой использовался поперечный шлиф, его плоскость перпендикулярна продольной оси. Для изготов-

Рис. 1. Общий вид образцов для исследования микротвердости и покрытий

Рис. 2. Схема измерения микротвердости

ления шлифов использовались образцы с покрытиями, нанесенными газопламенным напылением, с последующим оплавлением с использованием различных (по составу) горючих газов. Микрошлифы использовали при анализе микротвердости покрытия. В качестве образцов использовали образцы из стали 15ХГН2ТА с нанесенными на них покрытиями толщиной 0,6 мм. Для оценки механических свойств границы соединения и напыленного слоя на исследуемых образцах (рис. 1) измерялась микротвердость.

Микротвердость измерялась на микротвердомере ПМТ-3 в соответствии с ГОСТ 9450–76 «Измерение микротвердости вдавливанием алмазных наконечников». Для оценки распределения микротвердости по длине окружности и по глубине измерения производились согласно схеме, приведенной на рис. 2. При измерении микротвердости расстояние от центра отпечатка до края слоя или между центрами соседних отпечатков должно быть не менее трех длин диагоналей отпечатка, минимальная толщина слоя должна превышать глубину отпечатка не менее чем в 10 раз.

Измерение микротвердости покрытия (рис. 3) показало, что средние значения микротвердости у покрытий, полученных напылением водородно-кислородным пламенем с 5%-ной добавкой пропан-бутановой смеси, составили 1043 HV против 796 HV при использовании чистой водородно-кислородной смеси и 534 HV – при использовании ацетилено-кислородного пламени (рис. 4).

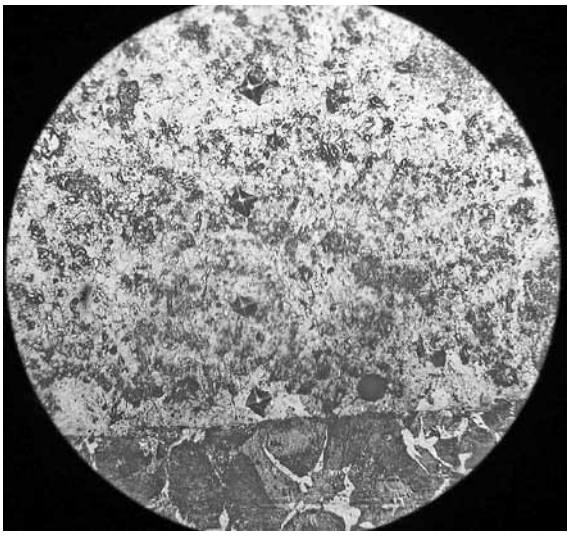


Рис. 3. Контроль микротвердости покрытия по высоте (× 600)

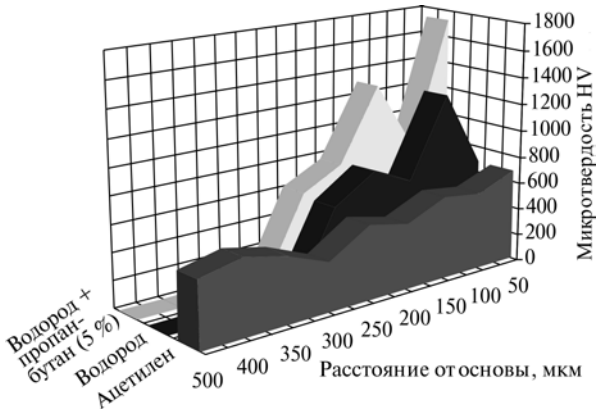


Рис. 4. Распределение микротвердости в поверхностном слое газопламенных покрытий, полученных напылением порошка ПР-НХ17С4Р4 с использованием пламени различных горючих газов

Выводы

Применение добавки пропан-бутана к водородно-кислородной смеси для газопламенного напыления позволяет повысить микротвердость получаемых покрытий на 24 % в сравнении с покрытиями, получаемыми на чистой водородно-кислородной смеси, и на 49 % в сравнении с покрытиями, получаемыми на традиционной ацетилено-кислородной смеси.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Коренев В.Н.** Технология и горелка для газопламенного напыления порошковыми материалами водородно-кислородным пламенем // Упрочняющие технологии и покрытия. № 4 (76), 2011. С. 44–47.

УДК 621.9.047

В.П. Смоленцев, С.В. Сафонов, В.Г. Грицюк
(Воронежский государственный технический университет)
E-mail: vsmolen@inbox.ru

Проектирование технологического процесса электроискрового легирования и покрытия металлических изделий

Рассмотрены особенности проектирования технологических процессов легирования металлических материалов, получения покрытий различной толщины, в том числе достаточных для восстановления размеров изношенных поверхностей. Показано, что при этом процесс обработки не вызывает значительного нагрева детали, что позволяет устранить деформацию изделий. Приведены технические характеристики оборудования для электроэрозионного легирования и покрытия различными металлами.

Ключевые слова: *технология, режимы, способы нанесения покрытий, оборудование, построение технологического процесса.*

Features of technical processes designing of metal materials doping and receiving of different coating thickness including such coating thickness which allows to recover the size of worn-out surfaces are viewed. At the same time machining process does not cause high heating of the item and it allows to eliminate items deformation. Technical characteristics of the equipment for electric discharge doping and coating with different metals are indicated.

Keywords: *technology, regimes, coating methods, equipment, technical process structure.*

Введение

При проектировании процессов электроискрового легирования, покрытия и упрочнения (ЭИЛ) следует учитывать, что эта технология является, как правило, частью общего процесса изготовления детали и захватывает 1–2 операции. Исключение представляют восстановление геометрии и ремонт изделий, где технологический процесс ЭИЛ рассматривается как автономный документ. Это обусловливает специфические требования к проектированию процесса: изменяются условия базирования заготовки, так как установочной базой становится опорная поверхность, служившая базой на предшествующей технологической операции; в ряде случаев требуется предусмотреть последующую чистовую обработку покрытия (как правило, шлифование); изменяются требования к автоматизации операции; необходимо технико-экономическое обоснование целесообразности применения ЭИЛ.

Построение технологического процесса

В качестве автономного процесса или в составе технологического процесса изготовления всей детали технология ЭИЛ включает следующие этапы:

анализ комплектации и содержания исходной документации: геометрии, материалов и технических требований к изделию (из чертежа детали); предшествующей операции (из технологического процесса изготовления детали); соответствия технических возможностей ЭИЛ требованиям к изделию; годовой программы выпуска объектов обработки (с учетом запасных частей);

проектирование документации для предварительного этапа процесса: оценка вида производства для ЭИЛ; выбор и обоснование технологической схемы ЭИЛ, технико-экономическое обоснование целесообразности применения ЭИЛ с учетом условий эксплуатации изделия; отработка технологичности детали под ЭИЛ; расчет и назначение технологических режимов с учетом возможностей процесса; обоснование и назначение объема и содержания технического контроля;

испытание и отработка процесса в производственных условиях; оценка назначенных действий контроля и испытаний процесса ЭИЛ; переход к серийному выполнению операции ЭИЛ;

заключительный этап: сушка, обдувка, промывка, консервация детали; подготовка к транспортировке (при необходимости), оформление документации.

Методика технико-экономического обоснования применения ЭИЛ [1]

ЭИЛ используют в следующих случаях:

1. Когда это единственный способ выполнения операции (например, нанесение твердого сплава). В этом случае нет необходимости в экономическом обосновании целесообразности использования нетрадиционной обработки, а эффект от внедрения *Э* рассчитывается через себестоимость $C_с$ всего изделия:

$$Э = K_н C_с, \quad (1)$$

где $K_н$ – доля прибыли, получаемой от использования ЭИЛ. С учетом затрат укрупненно можно принять $K_н = 0{,}15...0{,}2$.

2. Если использование ранее принятых методов возможно, но технологические показатели операции чрезвычайно низкие. В технике используются критерии оценки технологических показателей различных методов $K_м$, представляющих собой, например, отношение скорости нанесения покрытия оцениваемым методом V к скорости нанесения покрытия аналогичным известным приемом V_0:

$$K_м = V/V_0. \quad (2)$$

Здесь обоснование использования ЭИЛ выполняется путем обоснования использования наиболее эффективного известного процесса.

Выбор выполняют в следующей последовательности:

сравнивают экономически достижимые экономические показатели (точность, качество поверхностного слоя, производительность) схем ЭИЛ и выбирают наиболее эффективный;

если это единственный из известных методов, обеспечивающий выполнение требований технологического процесса, то его принимают без дальнейшего обоснования. В случае когда таких методов несколько, выбирают наиболее эффективный. Если ни один из методов не обеспечивает достижения всех показателей, требуемых технологическим процессом, то проводят вариантные расчеты себестоимости ($C_{с1}$, $C_{с2}$) обработки детали с учетом затрат на последующие операции, позволяющие обеспечить требования технологического процесса:

$$C_{с1} = З_1(1 + H) + K_1 + A_{то1} + З_{д1};$$
$$C_{с2} = З_2(1 + H) + K_2 + A_{то2} + З_{д2}. \quad (3)$$

Здесь $З_1$, $З_2$ – заработная плата сравниваемых вариантов нанесения покрытий;

H – накладные расходы;

K_1, K_2 – затраты на изготовление инструмента сравниваемых вариантов обработки,

$$K_1 = \frac{Ц_{и1} t_{штк1}}{T_{слто1}};$$
$$K_2 = \frac{Ц_{и2} t_{штк2}}{T_{слто2}}, \quad (4)$$

где $Ц_{и1}$, $Ц_{и2}$ – цены (или стоимость) инструмента для сравниваемых вариантов обработки; $t_{штк1}$, $t_{штк2}$ – штучно-калькуляционное время изготовления инструмента для сравниваемых вариантов; $T_{слто1}$, $T_{слто2}$ – средний срок службы инструмента для сравниваемых вариантов;

$З_{д1}$, $З_{д2}$ – дополнительная заработная плата;

$A_{то1}$, $A_{то2}$ – амортизация инструмента для сравниваемых вариантов обработки;

$$A_{то1} = K_A Ц_{и1} \frac{t_{штк1}}{T_{слто1}};$$
$$A_{то2} = K_A Ц_{и2} \frac{t_{штк2}}{T_{слто2}}, \quad (5)$$

где K_A – коэффициент, учитывающий долю затрат на амортизацию инструмента, для ЭИЛ K_A = 0,15...0,2.

Строят графики функций

$$З_1(1+H) + A_{то1} + Э_{д1} + \frac{K_1}{N} = f(N);$$
$$З_2(1+H) + A_{то2} + Э_{д2} + \frac{K_2}{N} = f(N), \quad (6)$$

где $Э_{д1}$, $Э_{д2}$ – дополнительные затраты на повышение технологических показателей рассматриваемых вариантов до требований чертежа. Для этого могут использоваться дополнительные технологические операции, позволяющие повысить параметры качества поверхностного слоя (снизить шероховатость, глубину измененного слоя и др.), точность (например, повторением прохода новым электродом-инструментом).

Далее находят экономический эффект $Э_{он}$ от использования ЭИЛ относительно ранее применяемого известного:

$$Э_{он} = (C_{с1} - C_{со2})N + E_н(\overline{K_1} - \overline{K_2}), \quad (7)$$

где $C_{с1}$ – себестоимость операции при известном методе покрытия; $C_{со2}$ – себестоимость операции при ЭИЛ (минимальное значение среди $C_{с1}$ и $C_{с2}$); N – программа выпуска деталей с ЭИЛ; $\overline{K_1}$, $\overline{K_2}$ – капитальные затраты в сравниваемых вариантах; $E_н$ – нормативный показатель эффективности использования капитальных вложений.

Режимы ЭИЛ

Режимы ЭИЛ выбираются в следующей последовательности:

технологическая рабочая среда для проведения ЭИЛ;

число проходов инструмента для обеспечения заданной толщины покрытия (с учетом последующей обработки);

ширина полос упрочнения на заготовке и шаг между ними. Ширина выбирается не более 1,5...3 мм; отношение шага полос к просвету 3:1;

кинематическая схема процесса и ее параметры.

Для выбранного вида ЭИЛ выбирают рабочее напряжение $U_р$, силу рабочего тока $I_р$, длительность импульса $\tau_и$ и находят энергию импульса $A_и$, Дж, по формуле

$$A_и = U_р I_р \tau_и. \quad (8)$$

Если генератор имеет RC-схему, то рассчитывается основной настроечный параметр процесса – емкость конденсаторов C, мкФ:

$$C = 2A_и / U_{2р}. \quad (9)$$

Полученный результат округляют до ближайшего значения параметра для имеющегося оборудования. Далее находят настроечные параметры: напряжение холостого хода (по $U_р$), силу тока короткого замыкания (по $I_р$). Величина тока в импульсе необходима, если применена бесконтактная схема обработки и требуется установить межэлектродный зазор, при котором импульс не гаснет (особенно при использовании длительных импульсов).

Для получения требуемой длительности импульса находят сопротивление R электрической цепи:

$$R = \frac{U_р}{I_р}. \quad (10)$$

Изменением сопротивления можно корректировать длительность импульса и его энергию, что бывает необходимо для получения покрытий большой толщины (например, при восстановлении геометрии деталей).

Перед обработкой заготовки на установке требуется провести контроль оснастки, инструмента (размеры, вид и состав материала и др.), плотности контакта в токопроводах, правильности установки полярности, подготовки заготовки под ЭИЛ (чистоты поверхности, отсутствия нетокопроводящих элементов и др.). Далее устанавливают режимы обработки (включая при необходимости охлаждение инструмента, например, потоком воздуха).

После проведения ЭИЛ назначается контроль поверхностного слоя и покрытия: толщины и качества, сплошности, шероховатости, эксплуатационных показателей (выборочно или путем сплошного контроля и испытаний).

Далее решается вопрос о необходимости проведения последующей обработки заготовки и изменениях, вносимых в технологический процесс, после чего материал отправляется в архив или базу (банк) данных.

Режимы ЭИЛ рассчитываются или назначаются в зависимости от результатов выбора схемы обработки [2]: нанесение тонких (до 0,1...0,12 мм) и толстых (до 1,3 мм и более) покрытий с использованием стержневого электрода-инструмента; с нанесением покрытий из ферромагнитных порошков; с применением химического легирования поверхностного слоя.

Для тонких покрытий: рабочая среда – преимущественно воздух; материал покрытия: малоуглеродистые стали, цветные, твердые сплавы. Для чистовой обработки Rz = 40...60 мкм; напряжение – 65...80 В; сила тока короткого замыкания – 5...10 А; энергия импульса – до 0,2 Дж; емкость конденсаторов – 5...200 мкФ; время нанесения покрытия – 0,3...1,2 с/мм^2. При черновой обработке: Rz – до 80 мм; напряжение – до 100 В; сила тока – 10...50 А; энергия импульса – 0,2...6 Дж; емкость конденсаторов – до 1000 мкФ; скорость нанесения покрытия – 1...2 мг/мм^2.

Для толстых покрытий: рабочая среда – кроме воздуха аргон, водород; напряжение – 60...100 В; сила тока – до 1000 А; энергия импульса – до 12 Дж, емкость конденсаторов – до 1500 мкФ; скорость нанесения покрытия – до 1,5...2 мг/мм^2.

При использовании для покрытия ферромагнитных порошков требуются перемещение (вращение) детали со скоростью 30...40 м/мин; вибрация одного из электродов с частотой 50...120 Гц; длительность импульса 1...10 мкс, напряжение 50...300 В; сила тока 100...150 А; зазор между порошком и деталью 0,3... 1,5 мм; размер порошков до 0,2 мм; время контакта частиц с деталью 0,04...0,05 с. При таких режимах плотность тока для легкоплавких порошков составляет 2... 3,5 А/мм^2; тугоплавких – 3,5...5 А/мм^2, шероховатость – от Rz = 40 мкм до Ra = 1,5...2,0 мкм (после механического выглаживания). Возможно использование нескольких видов порошков, дозированно подаваемых в зону обработки из различных емкостей.

При химическом легировании процесс протекает внутри микротрещин, выходящих на поверхность зоны упрочнения. Используется титановый стержень. Процесс протекает в среде жидкого азота. Режим обработки: энергия импульса – 0,2...0,6 Дж; скорость перемещения инструмента – 0,8...1,2 мм/с. Расход азота: для ванн с малым объемом – 2...2,5 л/мин, с большим – 2...4 л/мин. Для сохранения геометрии режущей кромки смещение контура инструмента составляет от 0,1 до 0,15 мм.

Отработка технологичности конструкций под ЭИЛ

ЭИЛ позволяет придать требуемые эксплуатационные свойства деталям из недорогих недефицитных материалов. Так, нанесение тонких покрытий из серебра на металлические контакты позволяет значительно снизить переходные сопротивления в контактных парах, защищает эти детали от коррозии. Это открывает возможность удешевить продукцию без ухудшения эксплуатационных характеристик изделий. Нанесение твердых сплавов на режущий инструмент позволяет адекватно

заменять твердосплавный инструмент на инструмент из углеродистых сталей, что представляет значительный интерес для предприятий малого и среднего бизнеса.

Нанесение толстых покрытий на стали и чугуны позволяет восстанавливать геометрические размеры деталей без нагрева материала до температур, вызывающих фазовые превращения, что технологично для ремонтных работ.

Химическое легирование экономически выгодно для улучшения стерилизации медицинского инструмента, что технологично для замены части одноразового инструмента на многоразовый.

Особенности проектирования технологического процесса ЭИЛ в жидком азоте [3]

На подготовительном этапе устанавливают зону упрочнения, выбирают материал стержневого инструмента (например, титановый сплав ОТ0), предлагают ванну для сбора жидкого азота (открытую или закрытую), ее объем, схему обработки, рассчитывают технологические режимы, уточняют требования техники безопасности при работе с жидкими газами. Если требуется упрочнить участок заготовки с четко заданными границами, то перемещение инструмента-анода задают при помощи программы, вводимой в установку с чертежа детали. Такие программы предусмотрены, в частности, в установке ЭЛФА 731 (рис. 1).

Технические параметры установки ЭЛФА 731 (см. табл.)

Настроечные перемещения, мм, по координатам:
- *X* 500
- *Y* 300
- *Z* 250

Расстояние от торца электрода до поверхности рабочего стола, мм ..... 50...200

Рабочая скорость по осям *X* и *Y*, мм/мин ..... 1...2000

Скорость при настройке по осям *X* и *Y*, мм/мин ..... 1...4000

Поворот головки в плоскости *XY*, ° 90

Частота вращения электрода, об/мин ..... 600...4000

Габариты, мм:
- механической части ..... 700 × 1090 × 1630
- управляющего модуля ..... 500 × 690 × 1620

Оборудование для ЭИЛ

Марка	Изготовитель	Технические возможности		Скорость легирования и покрытия, мм²/мин	Мощность, кВт	Число режимов	Масса, кг	Примечание
		Толщина покрытия, мкм	Шероховатость, *Ra*, мкм					
ЭЛФА 541 (см. рис. 2)	Болгария	До 10	1,25	48...76	2	Плавная настройка режимов	350	Обеспечивает микротвердость покрытия до 32 000 МПа
ЭЛФА 731 (см. рис. 1)	Болгария	4...10	1,25	До 60	5		500	Имеет блок автоматики с самообучением. Вращение шпинделя с частотой 600... 4000 об/мин
«Элитрон 50»	СССР (РФ)	10...200	2,5...100 (сплошность 80 %)	До 1000	2	6	140	Имеет два блока, работающих раздельно и совместно. Имеется вибратор
«Электром 25»	СССР (РФ)	До 300	До 100	600...800	6	6	130	Имеется вибратор
ЭФИ 81	Молдова	До 100	10...40	До 100	1,5	2	10	Частота следования импульсов 100 Гц
ЭФИ54	Молдова	До 240	25...160	400	1,5	6	40	
«Элитрон 52Б»	Молдова	До 750	До 65	1000	4,5	12	150	
ЭФИ 666 автоматизированный	Молдова	До 300	До 160	До 2500	4,0	3	200	Устанавливается на токарном станке. Размеры заготовки: диаметр 15...250 мм, длина до 500 мм
«Элитрон 354»	Молдова	100...200	6...25	19	3,0	5	190	Имеет вибратор с частотой 100 Гц. Вращение инструмента с частотой 5...27 об/мин

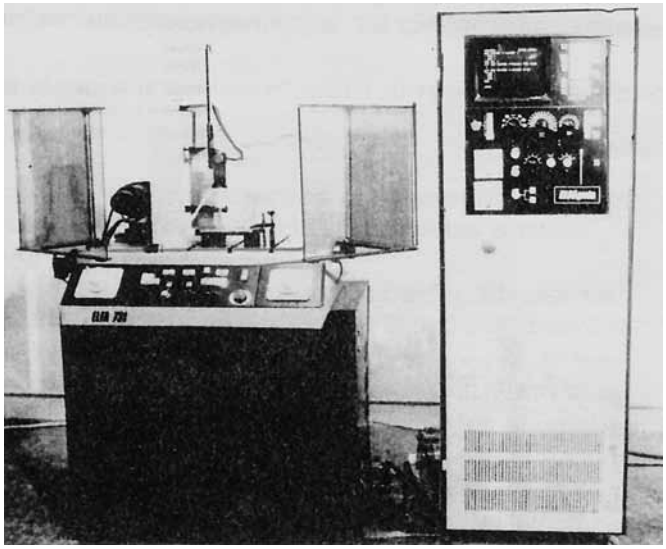


Рис. 1. Установка ЭЛФА 731 с трехкоординатным ЧПУ и самообучением

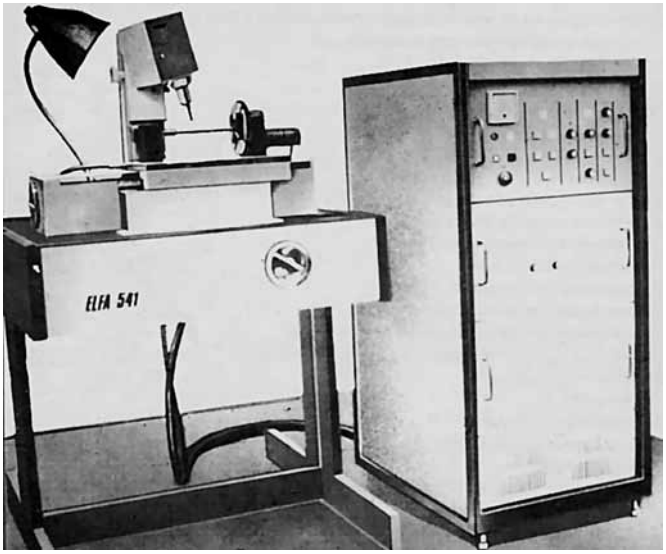


Рис. 2. Установка ЭЛФА 541 для локального электроискрового нанесения тонких покрытий

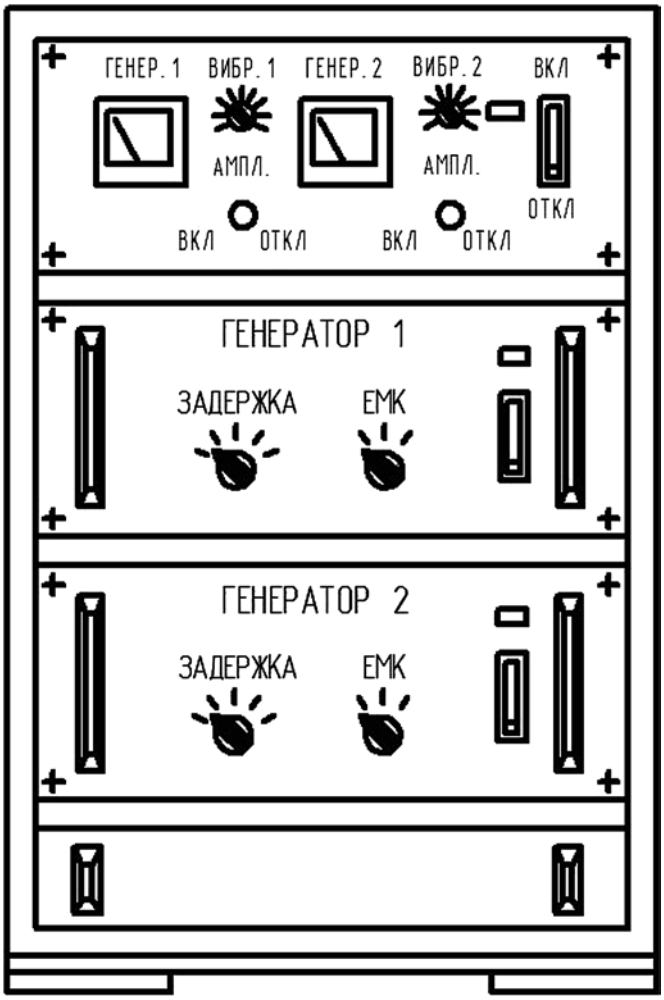


Рис. 3. Генератор установки «Элитрон 50»

При упрочнении режущей части инструментов контур лезвия имеет оригинальную форму, поэтому для предохранения лезвия от разрушения под действием электрических разрядов необходимо переместить вершину инструмента-анода вдоль кромки в нерабочем режиме, записать в память установки геометрические параметры и траектории перемещения лезвия, сместить вершину титанового стержня (анода) от режущей кромки внутрь упрочняемого инструмента и в таком положении выполнять ЭИЛ, перемещая стержень вдоль кромки.

Оборудование для ЭИЛ

Большинство станков, используемых для ЭИЛ, создавалось российскими учеными [4; 5]. Часть установок была передана в страны СЭВ, где были разработаны современные автоматизированные станки, получившие признание во всем мире. Технические характеристики наиболее известного оборудования приведены в таблице.

На рис. 2 показана установка ЭЛФА 541, предназначенная для нанесения твердосплавных тонких покрытий на штампы, резцы, фрезы, сверла, протяжки, детали, работающие в условиях трения, что обеспечивает возрастание износостойкости от 2 до 5 раз.

Технические параметры установки

Габариты рабочего стола, мм	350 × 350
Расстояние от торца электрода до поверхности рабочего стола, мм	До ± 80
Ход стола по оси *X*, мм	250
Ход колонны с рабочей головкой по оси *Y*, мм	260
Вертикальное перемещение головки (ось *Z*), мм	20

Наклон оси головки относительно оси *Z*, °.....± 40
Габариты, мм:
механической части.....820 × 930 × 1230
модуля электроники и
автоматики (ЭА-2).....580 × 750 × 1250

На рис. 3 показан генератор отечественной серийной передвижной установки «Элитрон 50» (см. табл.), предназначенной для повышения твердости и износостойкости режущего инструмента, стойкости технологической оснастки. Операции ЭИЛ выполняются вручную на одном из имеющихся режимов. Установка позволяет получать покрытия из твердых сплавов, графитом марок МПГ, ЭЭПГ, железом, чугуном, цветными сплавами. Возможно покрытие титаном, чугуном черных и цветных сплавов. Микротвердость покрытия может достигать 25 000 МПа. Генератор имеет стабилизирующие и контрольные блоки, удобные для наблюдения приборы на лицевой панели.

Заключение

В работе приведены особенности проектирования технологического процесса для электроискрового легирования металлических деталей, получения покрытий, упрочнения изделий. Обобщены результаты исследований по выбору рациональных режимов ЭИЛ, что позволяет повысить технологические показатели процесса ЭИЛ. Приведена информация об оборудовании, выпускавшемся ранее в странах СЭВ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Организационные** и экономические исследования в машиностроении / В.П. Смоленцев и др. Воронеж, ВГТУ, 2006. 72 с.

2. **Пат. 2333823** (RU). Криогенно-эрозионный способ упрочнения поверхностного слоя / Смоленцев В.П., Сухочев А.Ю., Лунев Е.В., Гренькова А.М. Бюл. № 26, 2008.

3. **Смоленцев В.П.** Наукоемкие электрофизикохимические технологии в машиностроении // Наукоемкие технологии в машиностроении / Под ред. А.Г. Суслова. М.: Машиностроение, 2012. 528 с.

4. **Технология** машиностроения. Восстановление качества и сборка деталей машин / В.П. Смоленцев и др. Воронеж, ВГТУ, 2008.

5. **Фатыхова Г.М., Смоленцев В.П., Уваров М.А.** Динамическая модель формирования покрытий при комбинированной обработке // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 6. С. 43–47.

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка
на научно-технический и производственный журнал
«УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ»

Подписные индексы по каталогам:
«Роспечать» – **85159**,
«Пресса России» – **39269**,
«Почта России» – **60252**.

Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи или непосредственно в издательстве по адресу:

Россия, 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4,
ООО «Издательство Машиностроение»
Тел.: (499) 269-66-00 (отдел реализации), (499) 268-40-77 (редакция);
e-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

УДК 621.793

М.А. Леванцевич, М.А. Белоцерковский, В.А. Кукареко
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск),
А.В. Белый *(Физико-технический институт НАН Беларуси, г. Минск)*
E-mail: levancev@mail.ru

Ионно-лучевое азотирование газотермических покрытий с плакированными слоями

Исследовано влияние комбинированной упрочняющей обработки газотермических покрытий методами деформационного плакирования гибким инструментом и ионно-лучевого азотирования на структуру, фазовый состав, микротвердость, триботехнические свойства и коррозионную стойкость сформированных слоев покрытия. Показано, что деформационное плакирование гибким инструментом газотермического покрытия из стали 40Х13 аустенитной сталью 10Х18Н10Т приводит к увеличению микротвердости сформированного слоя покрытия из стали 40Х13 на 40 %, износостойкости на 25...28 %, коррозионной стойкости в среде 10%-ного водного раствора NaCl на 13...15 %, а также к возрастанию количества аустенита. Последующее ионно-лучевое азотирование способствует выделению в поверхностных слоях двухслойного покрытия нитридных фаз α"-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ'-Fe_4N и CrN, а также увеличению его микротвердости до 16000 HV 0,049. Установлено, что износостойкость азотированного покрытия с плакирующим слоем возрастает в 5,5...6 раз по сравнению с исходным состоянием. Коррозионная стойкость покрытия, обработанного ионами азота при температуре 670 К, возрастает на 75...78 % по сравнению с исходным состоянием.

Ключевые слова: *упрочнение, покрытие, газотермическое напыление, деформационное плакирование, гибкий инструмент, ионное легирование, ионно-лучевое азотирование, испытание, трение, изнашивание.*

The in fluence of combined hardening treatment thermal spray coatings by means of methods of deformation cladding flexible tool and ion-beam nitriding on the structure, phase composition, microhardness, tribological and corrosion properties of the coating layers are study. It is shown, that after deformation cladding flexible tool of austenitic steel 10H18N10T microhardness of layer thermal spray coating from steel 40X13 increases up to 40 % and rise austenite content. In this wear resistance increases up to 25...28 % and corrosion resistance rise up to 13...15 % in an environment of 10 % aqueous NaCl. Subsequent ion-beam nitriding promotes the release of the surface layers of two-layer coating of nitride phases α"-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ'-Fe_4N и CrN as well as an increase in its microhardness up to 16000 HV 0.049. It has been established that the wear resistance of the nitrided layer with plating coating increases up to 5.5...6 times as compared with the initial state.

Keywords: *hardening, coating, thermal spraying, deformation cladding, flexible tool, ion implantation, ion-beam nitriding, test, friction, wear.*

Введение

Одним из наиболее перспективных и интенсивно развивающихся современных технологических способов защиты изделий от износа и коррозии является упрочнение и восстановление деталей машин методами газотермического напыления (ГТН) [1]. В частности, метод гиперзвуковой металлизации является высокопроизводительным и экономичным способом получения покрытий [2]. К отличительным особенностям гиперзвукового напыления можно отнести высокую скорость распыляемых частиц (~ 600 м/с), низкую пористость получаемого покрытия (~ 2...5 %) и высокий коэффициент использования напыляемого материала (0,85) [2]. Вместе с тем, несмотря на доступность используемых материалов, а также высокую плотность, адгезию и минимальную удельную стоимость покрытий [1, 2], их износостойкость существенно ниже, чем у монолитных материалов и напыленных композиционных порошковых слоев, что ограничивает эффективность и область применения методов ГТН. Для повышения триботехнических и дюрометрических свойств поверхностных слоев конструкционных материалов широко используются методы ионного легирования [3, 4] и деформационного плакирования [5]. В частности, одним из перспективных способов повышения прочности и износостойкости газотермических покрытий может выступать технология низкоэнергетического

ионно-лучевого азотирования поверхностных слоев [4], основанная на обработке материалов пучками заряженных частиц с энергией ~ 10^3 эВ и с большими плотностями ионного тока (~ 1...10 мА/см^2). При этом в поверхностном слое обрабатываемой детали развиваются процессы радиационно-стимулированной диффузии, что обеспечивает высокую скорость и глубину насыщения поверхности ~ 10...150 мкм ионами атомов внедрения, придающими ей высокую твердость, а также износо- и коррозионную стойкость. Деформационное плакирование гибким инструментом, при котором в качестве гибкого инструмента используется вращающаяся металлическая щетка с проволочным ворсом, а слой покрытия на поверхности обрабатываемой детали формируется за счет переноса ворсинками щетки микрочастичек из компактированного материала (донора) в процессе фрикционного взаимодействия щетки с донором и деталью, обеспечивает возможность формирования композиционных покрытий различного функционального назначения [5]. Представляло интерес исследовать влияние на свойства газотермических покрытий комбинированного упрочнения их поверхностного слоя посредством деформационного плакирования покрытия высоколегированной аустенитной сталью с последующим ионно-лучевым модифицированием плакированного покрытия интенсивными потоками ионов азота.

Цель исследований заключалась в оценке влияния ионно-лучевого азотирования гиперзвуковых газотермических покрытий, плакированных высоколегированной сталью 10Х18Н10Т, на структуру, триботехнические и коррозионные свойства их поверхностных слоев.

Методика исследований

Испытания проводились на стальных образцах с газотермическим покрытием, сформированным из высокохромистой стали мартенситного класса 40Х13 с плакированными слоями из высоколегированной стали 10Х18Н10Т. В качестве материала для формирования покрытия использовалась проволока из стали 40Х13, обеспечивающая при формировании ГТН-покрытий относительно высокие физико-механические характеристики [6].

Образцы для триботехнических и структурно-фазовых исследований (10 × 6 × 5 мм) вырезались из пластин (100 × 50 × 6 мм), изготовленных из стали 45 с напыленным слоем покрытия из проволочной стали 40Х13. В целях повышения прочности сцепления покрытия с основой на поверхности пластин предварительно формировался подслой из проволоки Х20Н80. Для формирования подслоя и слоя покрытия использовалась установка АДМ-10, разработанная в ОИМ НАН Беларуси [2]. Скорость полета напыляемых частиц проволоки составляла 400...500 м/с, размер частиц – 5...40 мкм. После газотермического напыления проводилось деформационное плакирование нанесенного покрытия нержавеющей сталью 10Х18Н10Т, а затем – ионно-лучевая обработка азотом при температуре 670...870 К. Деформационное плакирование осуществлялось вращающейся металлической щеткой с ворсом из гофрированной проволоки [7]. Диаметр и ширина щетки составляли соответственно 150 и 15 мм, линейная скорость вращения – 35,0...37,0 м/с, диаметр и вылет ворса – 0,25 и 20 мм соответственно. После обработки толщина сформированного слоя покрытия, измеренная с помощью прибора МТЦ-3, составила 3...5 мкм. Параметр шероховатости поверхности *Ra* покрытия – 0,5...0,6 мкм.

Ионно-лучевая обработка осуществлялась на экспериментальной установке ФТИ НАН Беларуси с помощью ионного источника УВН-2М. Температуры азотирования: 650, 700, 750, 800, 850 и 870 К. Плотность тока ионного пучка составляла 2 мА/см^2, время обработки – 3 ч.

Для металлографического анализа поверхностных слоев газотермических покрытий, подвергнутых деформационному плакированию и ионно-лучевой обработке, использовался инвертированный микроскоп «Альтами» МЕТ 1МТ. Травление микроструктуры шлифов проводилось с использованием реактива «Куррана» (50 мл HCl, 10 г $CuSO_4$, 50 мл H_2O), а также «Марбле» (50 мл HCl, 2 г $CuSO_4$, 50 мл C_2H_5OH, 50 мл H_2O).

Рентгеноструктурный анализ исследуемых образцов выполняли на дифрактометре ДРОН-3.0 в монохроматизированном CoKα-излучении при ускоряющем напряжении 30 кВ и анодном токе 15 мА. Рентгеновская съемка осуществлялась с фокусировкой по Бреггу–Брентано в режиме сканирования (по точкам) с шагом 0,1° и временем набора импульсов на точку, равным 10 с. В целях исследования фазового состава тонких поверхностных слоев был применен метод скользящего пучка (ψ = 6°). Для расшифровки фазового состава использовалась картотека стандартных спектров PDF. Обработку данных рентгеноструктурного анализа осуществляли с помощью автоматизированного программного комплекса DiffracPlus EVA.

Измерения микротвердости по Виккерсу проводились на твердомере DuraScan 20 при нагрузке на индентор *P*, равной 25 и 50 г.

Триботехнические испытания образцов модифицированных газотермических покрытий проводились в режиме трения без смазки на автоматизированном трибометре АТВП, работающем по схеме возвратно-поступательного перемещения призматического образца (8 × 6 × 6 мм) по контртелу (90 × 30 × 3 мм) и

оснащенном устройством для регистрации коэффициента трения в процессе испытаний. В качестве контртела использовалась пластина, изготовленная из закаленной углеродистой стали У8, с твердостью 810 HV 10. Средняя скорость перемещения образца относительно контртела в процессе трибоиспытаний составляла 0,1 м/с. Номинальное контактное давление испытаний составляло 1,5 МПа. В качестве триботехнических характеристик, подлежащих оценке в процессе испытаний, были выбраны коэффициент трения и износ. Перед испытаниями рабочие поверхности контактирующих тел обезжиривались спиртом и ацетоном и высушивались. Определение износа призматических образцов осуществлялось по потере массы при испытаниях. Испытания проводились до достижения 20 000 циклов (≈ 1200 м) с промежуточными взвешиваниями. Перед взвешиванием с поверхности образцов тщательно удалялись продукты изнашивания, затем образцы промывались, протирались спиртом и просушивались в сушильном шкафу при температуре 370 К. После сушки образцы взвешивались на аналитических весах АДВ-200М. Взвешивание каждого образца производилось не менее 2–3 раз. Погрешность измерения массы составляла 0,05 мг.

Коррозионные испытания проводились в среде 10%-ного водного раствора NaCl. В качестве основного метода определения коррозионной стойкости исследуемых материалов был выбран весовой метод. Образец выдерживался при комнатной температуре в растворе в течение 50, 70 и 160 ч, после чего проводилась оценка убыли массы в результате воздействия коррозии и по полученным данным рассчитывалась скорость коррозии *K*.

Результаты исследований и их обсуждение

Металлографический анализ исследуемых образцов с комбинированным покрытием показал, что на поверхности стали 40Х13 после плакирования сталью 10Х18Н10Т (рис. 1, *б*) регистрируются сглаживание микронеровностей и «заволакивание» микропор материалом покрытия.

Результаты рентгеновского фазового анализа образцов газотермических покрытий из стали 40Х13 приведены на рис. 2 и систематизированы в таблице.

Из представленных данных видно, что газотермическое покрытие из стали 40Х13 в исходном состоянии имеет следующий фазовый состав (рис. 2, *а*, таблица): α-Fe (ОЦК кристаллическая решетка, пространственная группа (п. г.) Im-3m, a = 0,28664 нм, карточка PDF 06-0696), γ-Fe (ГЦК, п.г. Fm-3m, a = 0,36599 нм, PDF 52-0513), оксиды Fe_3O_4 (ГЦК, Fd-3m, a = 0,8396 нм, PDF 19-0629) и FeO (ГЦК, п.г. Fm-3m, a = 0,4307 нм, PDF 06-0615).

Деформационное плакирование нержавеющей сталью 10Х18Н10Т исследуемого покрытия не изменяет его фазовый состав (рис. 2, *б*), однако при этом увеличивается содержание аустенитной γ-фазы, что связано с присутствием на поверхности покрытия тонкого слоя аустенитной стали 10Х18Н10Т. Кроме этого, регистрируется существенное возрастание микротвердости покрытия (на ≈ 40 %), что связано с его деформационным упрочнением в процессе обработки металлической щеткой.

Ионно-лучевая обработка азотом приводит к существенному изменению фазового состава газотермических покрытий и возрастанию их микротвердости. Так, модифицированное ионами азота при температуре 670 К покрытие из стали 40Х13 помимо фаз α-Fe, γ-Fe, оксидов Fe_3O_4 и FeO, входящих в его состав в исходном состоянии и после плакирования, дополни-

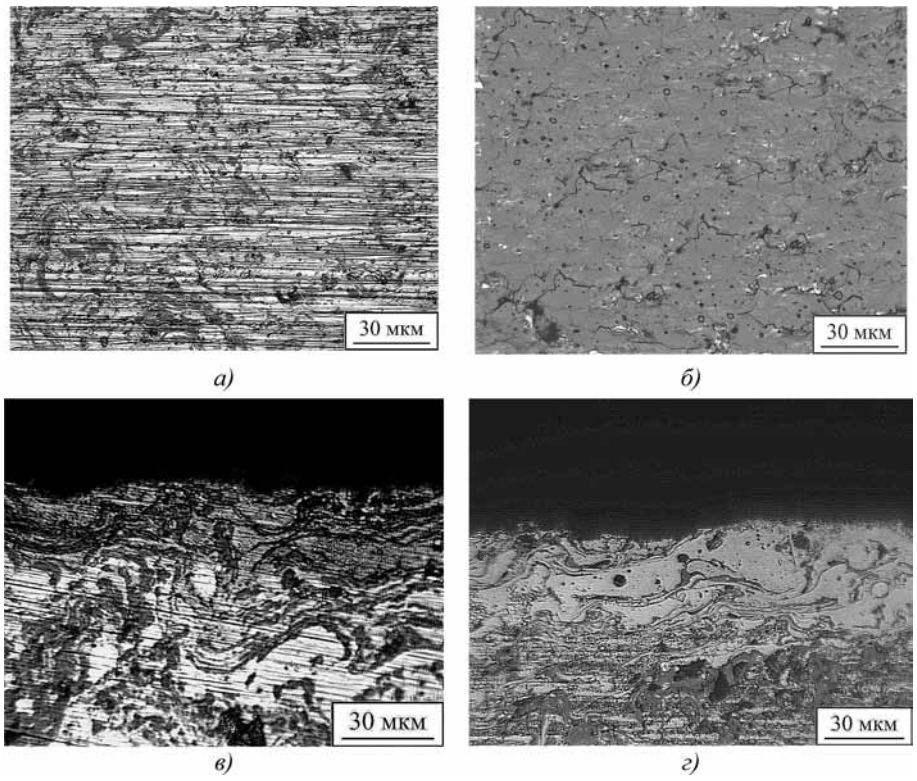


Рис. 1. Фото поверхности (*а, б*) и микроструктуры (*в, г*) образцов с покрытием из стали 40Х13, плакированным сталью 10Х18Н10Т:
а – после газотермического напыления; *б* – после деформационного плакирования сталью 10Х18Н10Т; *в*, *г* – после ионно-лучевого азотирования при температурах 770 и 870 К соответственно

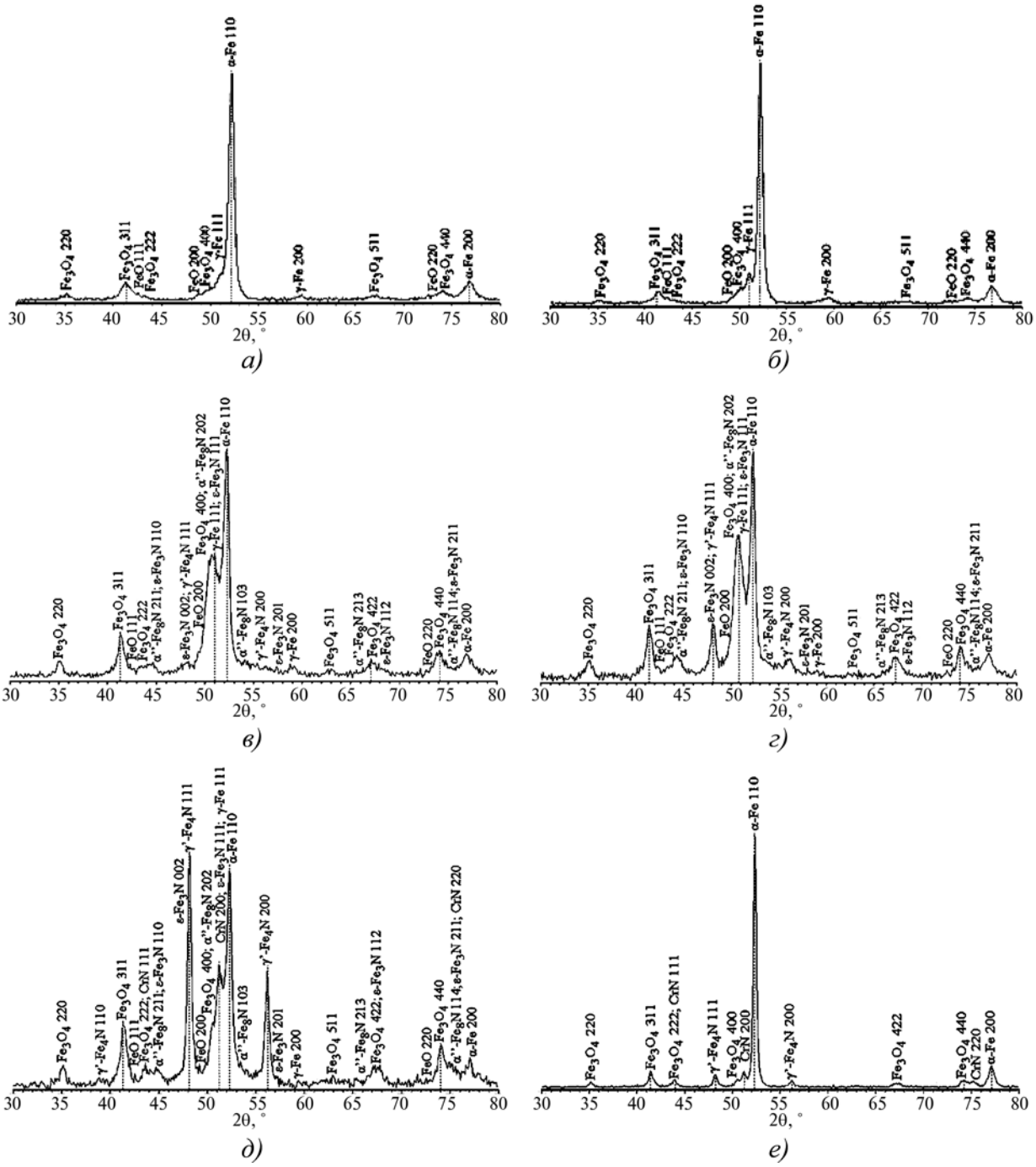


Рис. 2. Фрагменты рентгеновских дифрактограмм (CoKα) газотермического покрытия из стали 40Х13:
а – в исходном состоянии; *б* – после деформационного плакирования сталью 10Х18Н10Т; *в–е* – после плакирования и ионно-лучевого азотирования при температурах 670, 720, 770, 870 К соответственно

тельно содержит нитриды α″-Fe_8N (ОЦК, п.г. I4/mmm, a = 0,572 нм, c = 0,6292 нм, PDF 65-1587), ε-Fe_3N (ГПУ, п.г. P6322, a = 0,46982 нм, c = 0,43789 нм, PDF 49-1663) и незначительное количество нитрида γ′-Fe_4N (ГЦК, п.г. Pm-3m, a = 0,3795 нм, PDF 06-0627) (рис. 2, *в*). Повышение температуры ионной обработки покрытия из стали 40Х13 до 720 К приводит к увеличению объемной доли формирующихся в модифицированном слое нитридов α″-Fe_8N, ε-Fe_3N и γ′-Fe_4N (рис. 2, *г*) и увеличению микротвердости до уровня максимальных значений (16000 HV 0,49). Кроме того, в результате ионно-лучевой обработки газотермического покрытия из стали 40Х13 при температуре 720 К в нем начинают протекать процессы растворения высокотемпературного оксида FeO, о чем свидетельствует снижение интенсивности дифракционных линий от этой фазы (рис. 2, *г*).

Фазовый состав и микротвердость газотермических покрытий из стали 40Х13 после различных режимов обработки

Режим обработки	Фазовый состав	Микротвердость HV 0,49, Н/мм²	Скорость коррозии К, мг/(см²·ч)
Исходное состояние (ИС)	α, γ, Fe_3O_4, FeO	6000	0,0096
ИС + плакирование (П)	α, γ, Fe_3O_4, FeO	8350	0,0081
П + N^+ при 670 К	α, γ, Fe_3O_4, FeO, α″-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ′-Fe_4N	12750	0,0021
П + N^+ при 720 К	α, γ, Fe_3O_4, FeO, α″-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ′-Fe_4N	16000	0,0069
П + N^+ при 770 К	α, γ, Fe_3O_4, FeO, α″-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ′-Fe_4N, CrN	15400	0,0075
П + N^+ при 820 К	α, γ, Fe_3O_4, FeO, γ′-Fe_4N, CrN	12150	0,0081
П + N^+ при 870 К	α, γ, Fe_3O_4, γ′-Fe_4N, CrN	11000	0,0082

Основной фазой в модифицированном азотом слое покрытия из стали 40Х13, подвергнутого ионно-лучевой обработке при 770 К, является нитрид γ′-Fe_4N. При этом также регистрируется выделение частиц CrN (ГЦК, п.г. Fm-3m, a = 0,414 нм, PDF 11-0065) (рис. 2, *д*) и нитридов α″-Fe_8N и ε-Fe_3N.

Повышение температуры ионно-лучевой обработки покрытия до 820 К приводит к понижению микротвердости азотированного слоя и увеличению содержания в нем нитрида CrN, а также снижению объемной доли нитрида и γ′-Fe_4N. Образование нитридов α″-Fe_8N и ε-Fe_3N в результате ионного азотирования при 820 К покрытия из стали 40Х13 не регистрируется.

В результате высокотемпературной ионной обработки покрытия при 870 К происходят дальнейшее увеличение содержания нитрида CrN в модифицированном поверхностном слое (рис. 2, *е*) и формирование в нем незначительного количества нитрида γ′-Fe_4N. Кроме того, при высокотемпературном ионном азотировании покрытия происходит полное растворение оксида FeO.

Результаты триботехнических испытаний показали, что газотермическое покрытие из стали 40Х13 в исходном состоянии обладает сравнительно низкой износостойкостью (рис. 3, кривая *1*). Средняя интенсивность массового изнашивания $I_q = 22{,}1 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Плакирование указанного покрытия сталью 10Х18Н10Т способствует увеличению износостойкости (рис. 3, кривая *2*). В частности, значение интенсивности массового изнашивания покрытия после плакирования снижется на 28 %, до уровня $I_q = 15{,}9 \cdot 10^{-3}$ мг/м. Ионно-лучевая обработка сформированных слоев покрытия при температурах 770, 820 и 870 К приводит к значительному повышению его износостойкости. При этом средняя интенсивность массового изнашивания покрытия уменьшается до значений 3,9; 3,6 и 4,1 · 10^{-3} мг/м соответственно, а износостойкость возрастает в 5,5–6 раз по сравнению с покрытием в исходном состоянии.

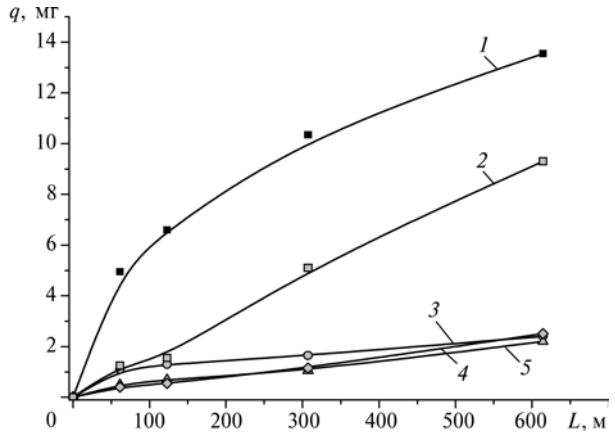


Рис. 3. Зависимость массового износа *q* от пути трения *L* для газотермического покрытия из мартенситной стали 40Х13, плакированного аустенитной сталью 10Х18Н10Т и обработанного ионами азота по различным режимам:

1 – исходное состояние; *2* – плакирование сталью 10Х18Н10Т; *3–5* – ионно-лучевое азотирование при температурах 770, 820, 870 К соответственно

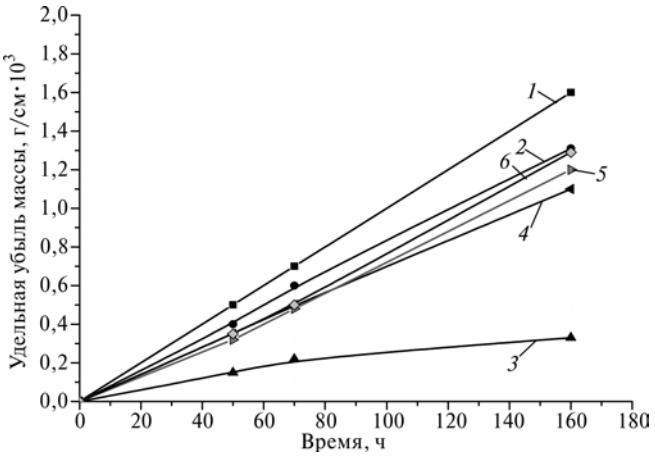


Рис. 4. Зависимости удельной убыли массы образцов при коррозионных испытаниях в 10%-ном водном растворе NaCl покрытия из стали 40Х13 от режима обработки:

1 – исходное состояние; *2* – плакирование сталью 10Х18Н10Т; *3–6* – ионно-лучевое азотирование плакированной стали 40Х13 при температурах 670, 720, 770 и 820 К соответственно

Данные по коррозионным испытаниям представлены на рис. 4.

В ходе исследований установлено, что плакирование газотермического покрытия из стали 40Х13 сталью 10Х18Н10Т способствует снижению скорости коррозионного растворения поверхностного слоя (рис. 4, кривая *2*). При этом значение скорости коррозии *K* уменьшается на 15 % (от 0,0096 до 0,0081 мг/(см^2 · ч)). Последующая ионно-лучевая обработка слоев покрытия при температуре 670 К приводит к еще большему снижению скорости коррозии (рис. 4, кривая *3*). В частности, значение величины *K* уменьшается в 4,6 раза по сравнению со значением для исходного покрытия из стали 40Х13. Однако дальнейшее повышение температуры ионно-лучевой обработки сформированных слоев покрытия выше температуры 670 К приводит к росту скорости его коррозионного растворения (рис. 4, кривые *4*–*6*).

Можно предположить, что увеличение скорости коррозионного растворения связано с фазовыми превращениями, протекающими в процессе ионно-лучевого азотирования при повышенных температурах. В частности, образование нитридных фаз α''-Fe_8N и ε-Fe_3N способствует повышению стойкости покрытия к коррозионному растворению в водном солевом растворе [8], а выделение частиц CrN, напротив, снижает коррозионную стойкость поверхностного слоя покрытия из стали 40Х13.

Выводы

1. Исследовано влияние деформационного плакирования газотермического покрытия из стали 40Х13 аустенитной сталью 10Х18Н10Т, а также последующего ионно-лучевого азотирования сформированных слоев покрытия на его структуру, фазовый состав, микротвердость, триботехнические свойства и стойкость к коррозионному растворению.

2. Установлено, что плакирование приводит к увеличению микротвердости покрытия из стали 40Х13 на 40 % и возрастанию содержания аустенита в его поверхностном слое. Регистрируются повышение износостойкости плакированного покрытия на 28 % и возрастание коррозионной стойкости в среде 10%-ного водного раствора NaCl на 15 %.

3. Ионно-лучевое азотирование способствует выделению в поверхностном слое деформационно-плакированного покрытия из стали 40Х3 нитридных фаз α''-Fe_8N, ε-Fe_3N, γ'-Fe_4N и CrN, а также повышению микротвердости покрытия до 16000 HV 0,49. Установлено, что износостойкость азотированного покрытия с плакирующим слоем возрастает в 5,5–6 раз по сравнению с исходным состоянием. Коррозионная стойкость обработанного ионами азота при 670 К плакированного покрытия возрастает на 78 % по сравнению с исходным состоянием.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Повышение** ресурса трибосопряжений активированными методами инженерии поверхности. П.А. Витязь и др. / Минск: Белорус. навука, 2012. 452 с.

2. **Белоцерковский М.А.** Триботехнические характеристики газопламенных покрытий // Трение и износ. 2000. Т. 21. № 5. С. 534–539.

3. **Комаров Ф.Ф.** Ионная имплантация в металлы. М.: Металлургия, 1990. 216 с.

4. **Белый А.В., Кукареко В.А., Патеюк А.** Инженерия поверхностей конструкционных материалов концентрированными потоками ионов азота // Минск: Белорус. навука, 2007. 244 с.

5. **Витязь П.А., Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н. и др.** Триботехнические свойства тонких металлических покрытий с наноразмерными наполнителями // Трение и износ. 2004. Т. 25. № 6. С. 593–601.

6. **Vityaz P.A.** Ways of Improving the Tribological Properties of Steel Gas-Flame Coatings / P.A. Vityaz, M.A. Belotserkovskii, V.A. Kukareko et al. // Journal of Friction and Wear. 2011. V. 32. No. 6. P. 395–403.

7. **Леванцевич М.А., Максимченко Н.Н., Зольников В.Г.** Повышение эксплуатационных свойств трибосопряжений нанесением покрытий металлическими щетками // Весці НАН Беларусі. Сер. Фіз.-тэхн. навук. 2005. № 1. С. 67–72.

8. **Byeli A.V., Kukareko V.A., Choi K.I.** Structure and Properties of Tool Maraging Fe–Co–W Steel Processed with Concentrated Flows of Nitrogen Ions // Inorganic Materials: Applied Research. 2012. Vol. 3. P. 309–313.

Поздравляем замечательный коллектив с 60-летием вуза

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс» (Госуниверситет — УНПК) основан в 1954 г. В этом году в г. Орле открылся учебно-консультационный пункт Всесоюзного заочного машиностроительного института. В 1961 г. на базе УКП открылся общетехнический факультет, который в 1964 г. был преобразован в Орловский филиал ВЗМИ. В этом статусе вуз развивался до 17 мая 1993 г., когда филиал был преобразован в самостоятельный государственный политехнический институт (ОрелГПИ). В 1995 г. ОрелГПИ был преобразован в Орловский государственный технический университет (ОрелГТУ).

ОрелГТУ — первый вуз России, разработавший и реализовавший концепцию глубокой интеграции образования, науки и производства в форме учебно-научно-производственного комплекса, ставшего основой развития образования, экономики и социальной сферы региона. Этот статус был официально закреплен 25 ноября 2010 г., когда ОрелГТУ был переименован в федеральное государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Государственный университет — учебно-научно-производственный комплекс».

Желаем всем преподавателям, ученым, студентам вуза плодотворной работы и учебы, сохранения лучших традиций российской высшей школы, дальнейших успехов, благополучия и процветания!

Редакция и редсовет журнала

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru.
Web-site: www.mashin.ru.
Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Беликова Е.И.* Корректор *Сажина Л.И.*
Сдано в набор 03.09.2014 г. Подписано в печать 21.10.14 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Адвансед солюшнз".
Отпечатано в ООО "Канцлер", 15008, г. Ярославль, ул. Клубная, д. 4, кв. 49