ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 3 (87)
март
2012

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р техн. наук,
Ю.В. ПАНФИЛОВ

Председатель редакционного совета
д-р техн. наук, заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

Заместитель главного редактора
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

Заместители председателя редакционного совета:
д-р техн. наук
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д-р техн. наук
А.В. КИРИЧЕК
д-р техн. наук
О.В. ЧУДИНА

Редакционный совет:
Ю.П. АНКУДИМОВ
А.П. БАБИЧЕВ
В.П. БАЛКОВ
В.М. БАШКОВ
А.И. БЕЛИКОВ
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Х.М. РАХИМЯНОВ
Б.П. САУШКИН
В.П. СМОЛЕНЦЕВ
А.М. СМЫСЛОВ
Г.А. СУХОЧЕВ
В.П. ТАБАКОВ
В.А. ШУЛОВ
М.Л. ХЕЙФЕЦ

Редакция:
Е.П. ЗЕМСКОВА
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

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Бабичев А.П., Мотренко П.Д., Коваль Н.С. Влияние режимов виброударной обработки на параметры качества поверхности деталей сложной формы, установленных в приспособление 3

Гуров Р.В. Учет упругого восстановления в процессе отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием 5

Киселёв Е.С., Благовский О.В. Технологические возможности ультразвуковой релаксации остаточных напряжений полосовым твердосплавным индентором 9

ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Бровер А.В., Пустовойт В.Н., Бровер Г.И. Структурная организация и свойства композиции покрытие–металлическая основа при импульсном лазерном воздействии 15

Карпов А.В. Повышение качества поверхностного слоя и увеличение долговечности лопаток второй ступени газоперекачивающего агрегата ГТК-10 на основе совершенствования технологического процесса термопластического упрочнения 19

Стручков Н.Ф., Винокуров Г.Г., Гаврильева А.А. Влияние термической обработки на характеристики поверхности трения покрытий из порошковых проволок с тугоплавкими добавками 23

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Агеев Е.В. Плазменно-порошковая наплавка с применением твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, – перспективный метод реновации деталей автотракторной техники 27

Каменева А.Л., Караваев Д.М., Сошина Т.О. Улучшение износостойких и антифрикционных свойств пленок на основе TiN путем оптимизации технологии их формирования методом магнетронного распыления 34

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Иванов А.М., Сыромятникова А.С., Петрова Н.Д. Упрочнение интенсивной пластической деформацией и разрушение конструкционной стали 38

Мокрицкий Б.Я., Бурков А.А. Архитектурирование покрытий как один из факторов концепции многостадийного упрочняющего воздействия на металлорежущий инструмент 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", 2012**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 3 (87)
March
2012

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 Assistants
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
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
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:
E.P. ZEMSKOVA
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

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Babichev A.P., Motrenko P.D., Koval N.S. Influence of vibro-impact treatment processing on surface quality's parameters of complex shape's parts, installed in device . . . 3

Gurov R.V. Accounting for the elastic recovery in the building-hardening treatment of surface plastic deformation . . . 5

Kiselev E.S., Blagovsky O.V. Technological capabilities of ultrasonic relaxation of residual stresses by bandpass hardmetal indenter . . . 9

THERMAL PROCESSING

Brover A.V., Pustovoyt B.N., Brover G.I. Structural organization and properties of composition coating–metal base at pulse laser action . . . 15

Karpov A.V. Improving the quality of the surface layer and increase reliability second stage bladepumping unit of ГТК-10 based on the improvement process thermoplastic reinforcement . . . 19

Struchkov N.F., Vinokurov G.G., Gavrileva A.A. Influence of thermal processing on characteristics of friction surface of coatings from powder wires with refractory additives . . . 23

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Ageev E.V. Plasma-powder overmelting with by application of hard-alloy powders obtained electroerosive dispersion of scraps of hard alloys perspective method of renovation of details of autotractor engineering . . . 27

Kameneva A.L., Karavaev D.M., Soshina T.O. Improvement of tribological and antifrictional properties of TiN-based films by optimization of technology of their formation by magnetron sputtering . . . 34

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Ivanov A.M., Syromyatnikova A.S., Petrova N.D. Hardening of severe plastic deformation and fracture of structural steel . . . 38

Mokritskiy B.Ya., Burkov A.A. Architectural shaping of coatings as one of the factors of a concept of multistage reinforcing action on a metal-cutting tool . . . 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", 2012**

УДК 621.787.6

А.П. Бабичев, П.Д. Мотренко, Н.С. Коваль *(Донской государственный технический университет, г. Ростов-на-Дону)*
E-mail: vibrotech@mail.ru

Влияние режимов виброударной обработки на параметры качества поверхности деталей сложной формы, установленных в приспособление

Рассмотрены вопросы, связанные с обеспечением качества и эксплуатационных свойств длинномерных деталей сложной формы на примере лонжерона рулевого винта вертолета. Представлены результаты экспериментальных исследований влияния режимов виброударной упрочняющей обработки, осуществляемой по разработанным схемам, на параметры качества поверхности.

Ключевые слова: *виброударная упрочняющая обработка, приспособление, детали сложной формы.*

Issues related to quality insuring and performance properties of long parts of complex shape by the example of the tail screw helicopter spar are considered. The results of experimental researches on the influence of vibro-impact hardening treatment process on the surface quality's parameters are carried out by the developed schemes and presented in the work.

Keywords: *vibro-impact hardening treatment, accommodation, parts of complex shape.*

Влияние режимов виброударной упрочняющей обработки на формирование показателей качества поверхности и эксплуатационные свойства описано в работах многих авторов [1–3]. Однако исследования в области обработки длинномерных деталей сложной формы в приспособлениях весьма ограничены.

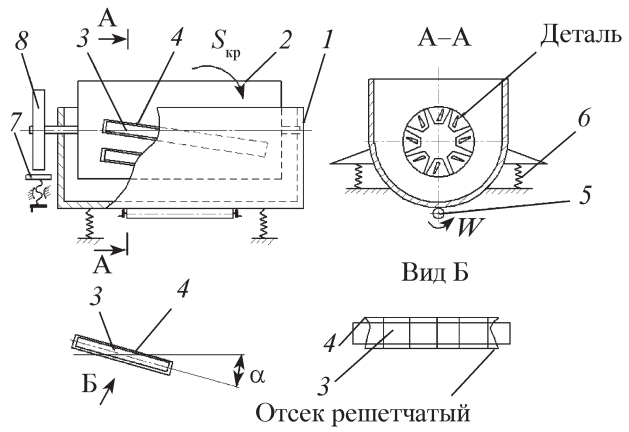


Рис. 1. Технологическая схема виброударной упрочняющей обработки длинномерных деталей:
1 – рабочая камера; *2* – приспособление; *3* – обрабатываемая деталь; *4* – отсек решетчатый; *5* – вибратор; *6* – пружина спиральная; *7* – тормозной башмак; *8* – барабан приводной

Экспериментальные исследования проводили для технологической схемы (рис. 1), при которой детали *3* (фрагменты лонжерона) с закрепленными на них образцами-свидетелями фиксировали в решетчатых отсеках *4* приспособления *2*. В качестве рабочей среды использовали полированные закаленные шары из стали ШХ15.

На рис. 2 приведены результаты исследований, характеризующие изменение параметра шероховатости поверхности образцов в зависимости от амплитуды

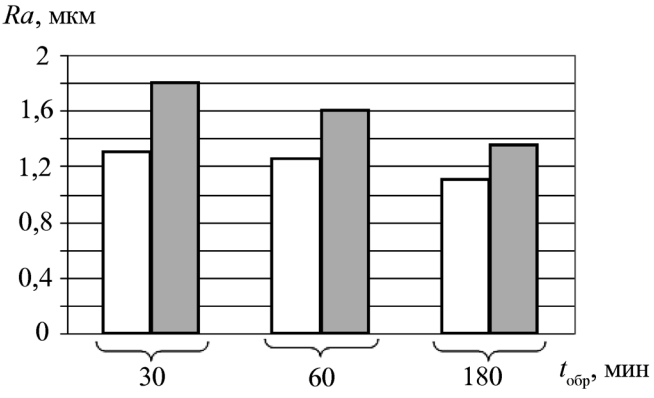


Рис. 2. Изменение параметра шероховатости поверхности образцов-свидетелей в зависимости от амплитуды колебаний:
□ – A = 3,5 мм; ▨ – A = 2,5 мм

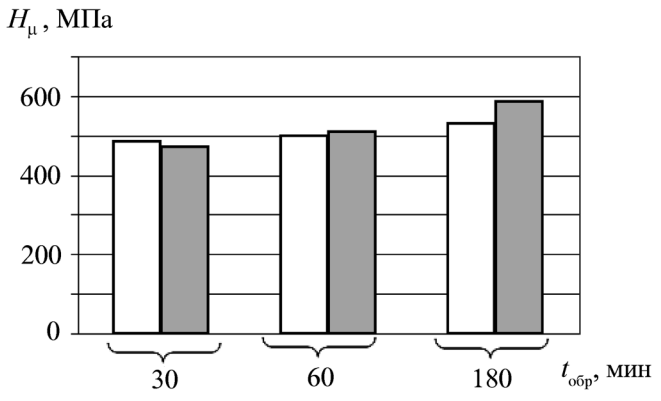


Рис. 3. Изменение микротвердости поверхностного слоя образцов-свидетелей в зависимости от амплитуды колебаний:
□ – A = 3,5 мм; ▨ – A = 2,5 мм

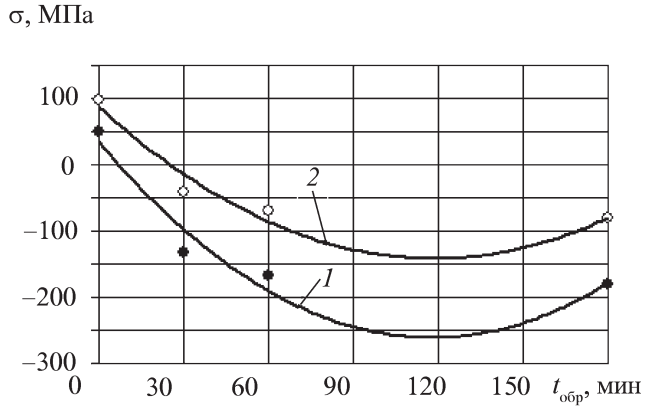


Рис. 4. Изменение остаточных сжимающих напряжений образцов-свидетелей в зависимости от амплитуды колебаний
1 – A = 3,5 мм; *2* – A = 2,5 мм

колебаний. Анализ полученных результатов показывает, что с увеличением амплитуды колебаний наблюдается снижение параметра шероховатости поверхности при продолжительности процесса 30, 60, 180 мин. Обработка при амплитуде колебаний, равной A = 2,5 мм, в течение 180 мин приводила к максимальному снижению исследуемого параметра до 1,39 мкм при исходном значении 1,75 мкм.

Наибольшее снижение микронеровностей наблюдается у образцов, обработанных при амплитуде, равной A = 3,5 мм, что объясняется более высокой скоростью проворачивания приспособления и циркуляции рабочей среды. Увеличение режима обработки приводит к повышению интенсивности транспортирования рабочей среды через внутреннюю полость фрагмента лонжерона и возрастанию сил соударения рабочей среды с поверхностями лонжерона. Таким образом, происходит более интенсивное сглаживание микронеровностей.

На рис. 3 показано изменение микротвердости поверхностного слоя в зависимости от амплитуды колебаний. Значительное увеличение $H_ц$ отмечается при обработке в интервале 60...180 мин, причем значения исследуемого параметра выше у образцов, обработанных при амплитуде колебаний A = 2,5 мм.

Виброударная упрочняющая обработка образцов-свидетелей при различных амплитудах колебаний обеспечивает постоянное возрастание остаточных сжимающих напряжений с увеличением продолжительности процесса. Из рис. 4 видно, что для формирования остаточных напряжений целесообразно производить обработку при амплитуде, равной A = 3,5 мм, обеспечивающей формирование остаточных напряжений 127...176 МПа.

Значение исследуемой величины при амплитуде, равной A = 2,5 мм, в среднем на 78...108 МПа ниже. Это объясняется тем, что увеличение режима обработки приводит к возрастанию энергетических характеристик взаимодействия рабочей среды и обрабатываемой поверхности.

Выводы

Наиболее интенсивное формирование исследуемых параметров ($H_ц$, Ra, σ) при виброударной обработке, осуществляемой по рассматриваемой схеме [4], наблюдается при амплитуде колебаний, равной A = 3,5 мм, что объясняется более высоким значением сил соударения рабочей среды и обрабатываемой поверхности.

Обработка на данном режиме характеризуется высокой интенсивностью транспортирования рабочей среды через внутреннюю полость фрагмента лонжерона и оптимальной скоростью взаимодействия рабочей среды с поверхностью лонжерона.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бабичев А.П., Бабичев И.А.** Основы вибрационной технологии. Ростов-н/Д: ДГТУ, 1999. 620 с.

2. **Бабичев А.П., Мотренко П.Д.** Применение вибрационных технологий для повышения качества и эксплуатационных свойств деталей. Ростов-н/Д: ДГТУ, 2005. 215 с.

3. **Копылов Ю.Р.** Виброударное упрочнение. Воронеж: Ин-т МВД России, 1999. 386 с.

4. **Коваль Н.С.** Разработка и исследование технологической системы "адресной" виброударной обработки деталей сложной формы (на примере использования вибрационных станков с прямоугольной формой рабочей камеры): дис. ... магистра. Ростов-н/Д, 2010. 142 с.

УДК 621.787

Р.В. Гуров *(Брянский государственный технический университет)*
E-mail: msi@tu-bryansk.ru

Учет упругого восстановления в процессе отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием

Разработана математическая модель процесса упругого восстановления обрабатываемой поверхности при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием. Проведен анализ влияния различных параметров процесса на упругую составляющую рабочего усилия при отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием.

Ключевые слова: *поверхностное пластическое деформирование, шероховатость, упругие деформации, рабочее усилие.*

In this article a mathematical model of elastic recovery in the treated surface finishing and hardening processing of surface plastic deformation. The effect of various process parameters on the elastic component of the work force at surface finishing and hardening processing of surface plastic deformation.

Keywords: *surface plastic deformation, surface roughness, elastic deformation, an operating force.*

Процесс взаимодействия инструмента и обрабатываемой поверхности при *отделочно-упрочняющей обработке поверхностным пластическим деформированием* (ОУО ППД) носит упругопластический характер [1]. Однако степень влияния упругих деформаций при различных видах обработки отличается. Как правило, при упрочняющей обработке ППД в связи с развитыми пластическими деформациями доля упругих деформаций достаточно мала, поэтому ими пренебрегают [2]. При отделочной и отделочно-упрочняющей обработке доля упругих деформаций будет выше, а следовательно, больше и степень их влияния.

Существующие методики расчета влияния упругих деформаций позволяют весьма приближенно ее оценить [1]. Поэтому представляет интерес разработка модели, позволяющей количественно учесть ряд факторов.

Суммарное контактное сближение $y_к$ определяется по зависимости [1]:

$$y_к = y_{пл} + y_{уп},$$

где $y_{пл}$, $y_{уп}$ – соответственно пластическая и упругая составляющие контактного сближения.

Для определения доли упругой составляющей $K_{уп}$ в суммарном контактном сближении можно воспользоваться зависимостями из [1], определяющими соотношение между $y_{пл}$ и $y_{уп}$, и выразить из них отношение $y_{уп} / y_к$. После ряда математических преобразований получим выражение

$$K_{уп} = \frac{2K}{K + \sqrt{K^2 + 4y_к}}, \qquad (1)$$

где K – коэффициент, учитывающий механические свойства материала и параметры шероховатости поверхности. Он определяется выражением [1]:

$$K = \sqrt{2}\,\frac{(1-\mu^2)}{E}\,c'\,k\,\sigma_т\,\rho_{ср}^{0,5},$$

где μ – коэффициент Пуассона;

E – модуль упругости;

c' – коэффициент стеснения;

k – степень упрочнения;

$\sigma_т$ – предел текучести материала;

$\rho_{ср}$ – средний радиус неровностей шероховатости.

Графики зависимости (1) для контактных сближений до 10 мкм и ряда значений среднего радиуса неровности представлены на рис. 1, *а*, а на рис. 1, *б* – графики абсолютной величины упругого восстановления $y_{уп}$ для тех же диапазонов контактных сближений и радиусов неровностей. В качестве материала принималась условная сталь с $\sigma_т$ = 950 МПа.

Как видно из графиков, при возрастании средних радиусов закругления вершин шероховатости существенно растет доля упругой составляющей при той же величине контактного сближения. Также наблюдается экспоненциальный рост доли упругой составляющей при уменьшении контактного сближения.

Так как различные методы обработки при одинаковых значениях высотных параметров дают отличающиеся величины средних радиусов неровностей, то влияние метода предшествующей обработки на упругое восстановление очевидно. Так, например, при получении одного и того же параметра шероховатости Rz = 3,5 мкм точением и шлифованием величина упругой составляющей будет отличаться. При контакт-

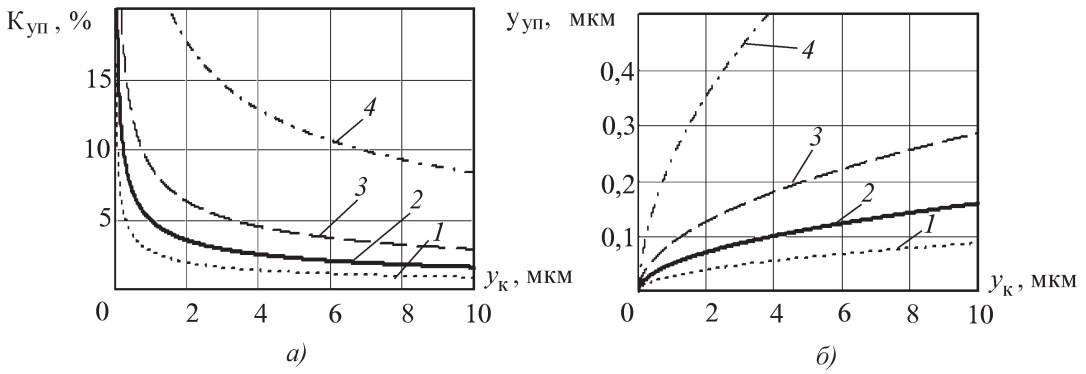


Рис. 1. Зависимости доли (*а*) и абсолютного значения (*б*) упругой составляющей в контактном сближении при $\rho_{ср}$, мкм: *1* – 9; *2* – 30; *3* – 100; *4* – 900

ном сближении 1,5 мкм, соответствующем отделочно-упрочняющим режимам ОУО ППД, при предварительной обработке шлифованием она составит около 3 % (0,05 мкм), а при предварительной обработке точением – около 8 % (0,12 мкм) от величины контактного сближения.

При деформировании неровностей шероховатости различные точки неровности испытывают отличающиеся деформации. Наибольшей контактной деформации подвергаются точки, расположенные у вершины, наименьшей – близкие к впадине. В связи с этим очевидно, что и упругое восстановление в разных точках неровности будет отличаться.

В результате упругого восстановления происходит изменение профиля шероховатости. Кроме того, при обработке оно оказывает влияние на величину рабочего усилия, поскольку приводит к увеличению площади контакта.

Максимальная величина упругого восстановления относительно невелика (например, для параметра

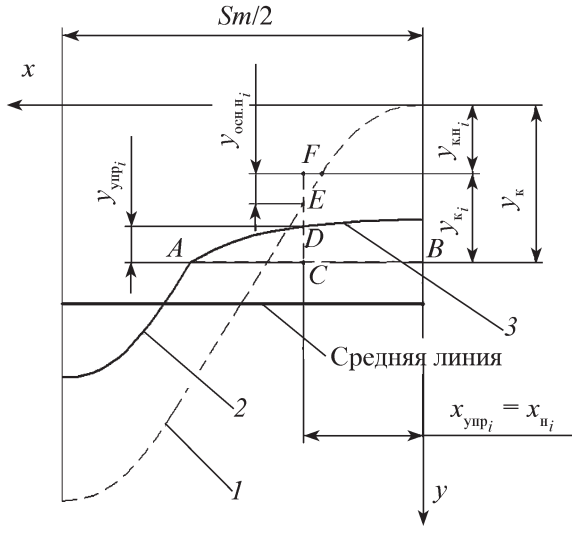


Рис. 2. Схема расчета упругого восстановления неровности: *1* – исходный профиль; *2* – профиль после деформации; *3* – профиль после упругого восстановления

шероховатости Rz = 5,5 мкм и при контактном сближении $y_к$ = 2,5 мкм упругое восстановление составит порядка 0,25 мкм), поэтому заметного повышения точности описания профиля неровности при ОУО ППД ожидать не следует. Однако влияние упругого восстановления на усилия при обработке может быть существенным, поэтому представляется целесообразным исследование формирования относительной опорной длины при упругом восстановлении, а также изменение контактных напряжений.

Для определения профиля неровности, полученного в результате упругого восстановления, предлагается следующая схема (рис. 2).

В процессе деформирования неровности точка E исходного профиля за счет перераспределения материала, вытесняемого из вершины неровности, к моменту вступления в контакт с инструментом поднимается на величину $y_{осн.н_i}$. Контактное сближение инструмента и обрабатываемой поверхности при этом $y_{к.н_i}$ – начальное контактное сближение. Начиная с этого момента, рассматриваемая точка испытывает упругопластические деформации вдоль прямой FC.

Контактная деформация $y_{к_i}$ для данной точки равна длине отрезка CF, а общее контактное сближение – $y_к$. После снятия нагрузки рассматриваемая точка неровности упруго восстанавливается на величину $y_{упр_i}$, равную длине отрезка CD. В результате упругого восстановления формируется относительная опорная длина профиля $tp_{упр_i}$. Поскольку в данной модели принято перемещение i-й точки по вертикали, то $tp_{упр_i}$ численно равно начальной относительной опорной длине $tp_{н_i}$ при начальном контактном сближении $y_{к.н_i}$.

Упругое восстановление точки профиля неровности $y_{упр_i}$ определяется по зависимости

$$y_{упр_i} = \frac{-1 + \sqrt{1 + \dfrac{4\,(y_к - y_{к.н_i})}{K^2}}}{\dfrac{2}{K^2}}. \qquad (2)$$

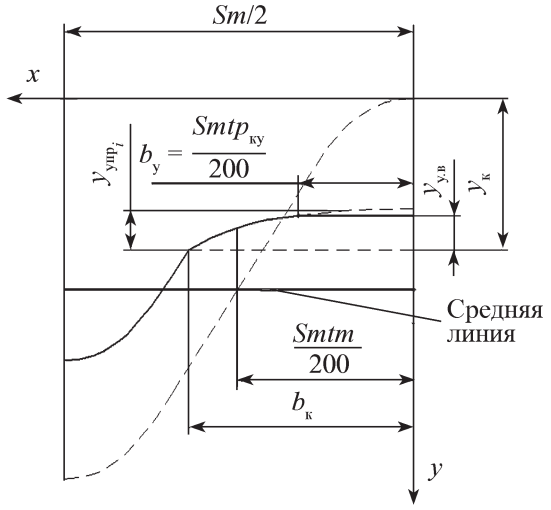


Рис. 3. Определение размеров площадки контакта при упругом восстановлении

Начальное контактное сближение $y_{к.н_i}$ определяется решением уравнений, представленных в [3], при подстановке в них координаты x рассматриваемой точки.

Усилие обработки при упругом восстановлении единичной неровности определяется фактической площадью контакта и контактным давлением. Фактическая площадь контакта с единичной неровностью зависит от ширины контакта при упругом восстановлении b_y (рис. 3).

При упругопластической деформации контактное давление принято постоянным по всей площадке контакта. При упругом восстановлении разные точки неровности восстанавливаются на различную величину, следовательно, при одинаковом упругом восстановлении $y_{у.в}$ (см. рис. 3) контактное давление в них будет отличаться. Величина $y_{у.в}$ определяется положением инструмента относительно максимального достигнутого контактного сближения $y_к$.

В каждой точке площадки контакта давление будет определяться по зависимости

$$P_{к_i} = c' k \sigma_т \left(1 - \frac{y_{у.в}}{y_{упр_i}}\right),$$

где $y_{упр_i}$ определяется по зависимости (2).

Усилие при упругом восстановлении единичной неровности P_{y_1} будет определяться интегралом

$$P_{y_1} = \int_0^{b_y} P_к(x)\,dx = \int_0^{b_y} c' k \sigma_т \left(1 - \frac{y_{у.в}}{y_{упр}(x)}\right) dx,$$

где x – координата рассматриваемой точки в пределах ширины контакта b_y, мкм.

Размеры контактной площадки инструмента и неровности b_y при упругом восстановлении определяются по зависимости

$$b_y = 5\,Smtp_{ку},$$

где Sm – средний шаг неровностей, мм;

$tp_{ку}$ определяется по зависимостям

– при $b_к \le 5\,Smtm$ или при $b_к > 5\,Smtm$ и $x \le 5\,Smtm$:

$$tp_{ку} = tm\left(\frac{y_{к.н_i} + y_{осн.н_i}}{Rp}\right)^{\nu},$$

– при $b_к > 5\,Smtm$ и $x > 5\,Smtm$:

$$tp_{ку} = 100 - (100 - tm)\left(\frac{R\max - (y_{к.н_i} + y_{осн.н_i})}{R\max - Rp}\right)^{\nu в}.$$

В приведенных зависимостях $R\max$ – максимальная высота шероховатости, мкм;

Rp – высота сглаживания выступов шероховатости, мкм;

tm – относительная опорная длина профиля на уровне средней линии, %;

ν и $\nu в$ – показатели степени в зависимостях, описывающих соответственно выступ и впадину профиля шероховатости, определяемые по [1].

Наличие границы $x = 5\,Smtm$ обусловлено кусочным описанием профиля шероховатости, т.е. выступ описывается одной зависимостью, а впадина – другой. Соответственно, если рассматриваемая точка находится правее $x = 5\,Smtm$ (см. рис. 3), то используется зависимость для описания выступа, иначе – зависимость для описания впадины.

При обработке различные точки в пределах номинальной площадки упругого контакта подвергаются как различной величине упругопластической деформации, так и различному упругому восстановлению, определяемому профилем и положением инструмента в данный момент времени. Поэтому для расчета упругой составляющей рабочего усилия P_y необходимо знать номинальное давление в любом месте площадки контакта, которое численно равно номинальному давлению при упругом восстановлении единичной неровности $P_{к\,пот}$, МПа, при заданных контактной деформации $y_к$ и упругом восстановлении $y_{у.в}$, и определяемому как

$$P_{к\,пот} = 2 \cdot 10^{-6} P_{y_1} / Sm.$$

Зная номинальное давление и величину элементарной площадки, легко определить элементарное усилие на ней. Расчет P_y производится суммированием элементарных усилий по всей номинальной пло-

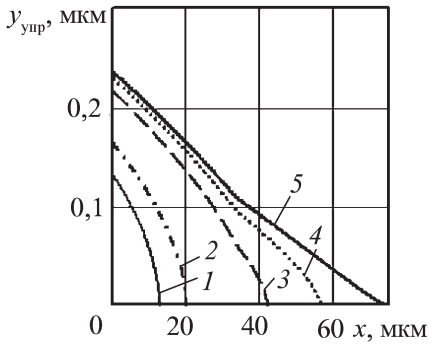


Рис. 4. Зависимости упругого восстановления неровности от положения рассматриваемой точки по оси *x* при контактных сближениях:
1 – 0,33*Rp*; *2* – 0,5*Rp*; *3* – 0,85*Rp*; *4* – 0,95*Rp*; *5* – *Rp*

щадке или интегрированием при возможности аналитического описания.

Для анализа полученной модели была разработана программа в среде MathCad. Программа позволяет провести анализ шероховатости и моделирование обработки по схеме шарик–плоская поверхность. Начальными данными являются параметры исходной шероховатости, механические характеристики обрабатываемого материала, геометрия инструмента (радиус шарика) и некоторые параметры режима обработки (подача, контактное сближение). По этим исходным данным программа определяет упругопластическую и упругую составляющие рабочего усилия.

Некоторые результаты расчетов с помощью данной программы представлены ниже.

На рис. 4 приведены зависимости упругого восстановления от положения точки в пределах контакта с единичной неровностью по оси *x* для ряда условий нагружения. Практически данные кривые являются профилями упруго восстановленной части вершины неровности. Графики построены для поверхности с параметрами шероховатости *Rz* = 5 мкм; *Ra* = = 1,25 мкм; *Rp* = 2,7 мкм; *Sm* = 0,15 мм; *tm* = 45 %; материал – сталь с $\sigma_т$ = 950 МПа.

Для той же поверхности на рис. 5 представлены графики распределения контактного давления $P_к$ между плоской гладкой абсолютно жесткой поверхностью и единичным выступом шероховатости. Приведен ряд кривых, построенных при различных положениях поверхности при упругом восстановлении от $y_{у.в}$ = 0 до максимального упругого восстановления. Рисунки отличаются величиной достигнутой контактной упругопластической деформации $y_к$.

На рис. 6 показаны графики зависимости номинального давления в контакте от упругого восстановления $y_{у.в}$ при некоторых значениях контактного сближения $y_к$.

Также были проанализированы составляющие рабочего усилия при следующих условиях. Принимались два набора параметров шероховатости поверхности:

1) *Rz* = 5 мкм; *Ra* = 1,25 мкм; *Rp* = 2,7 мкм; *Sm* = 0,15 мм; *tm* = 45 %;

2) *Rz* = 2,6 мкм; *Ra* = 0,83 мкм; *Rp* = 1,9 мкм; *Sm* = 0,1 мм; *tm* = 48 %.

Материал – сталь с $\sigma_т$ = = 950 МПа.

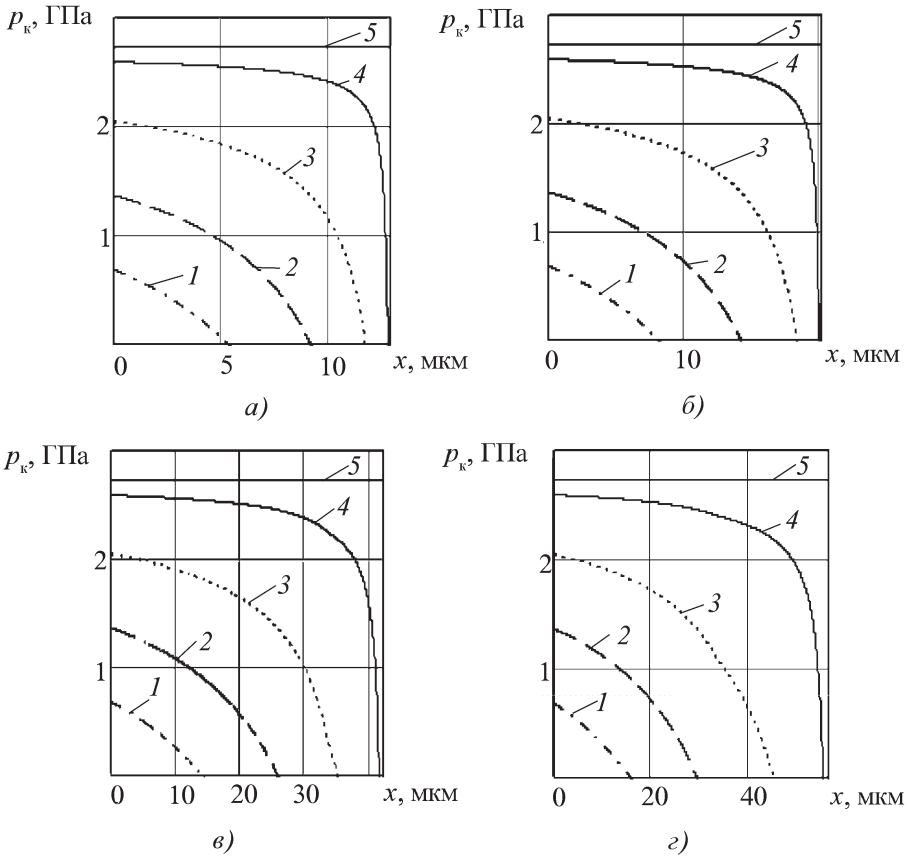


Рис. 5. Распределение контактного давления при упругом восстановлении вершины неровности в пределах ширины площадки контакта неровности и инструмента при величинах восстановления 75 % (*1*), 50 % (*2*) 25 % (*3*), 5 % (*4*) и 0 % (*5*) от максимального упругого восстановления, получаемого при максимальном контактном сближении, равном:
а – 0,33*Rp*; *б* – 0,5*Rp*; *в* – 0,85*Rp*; *г* – 0,95*Rp*

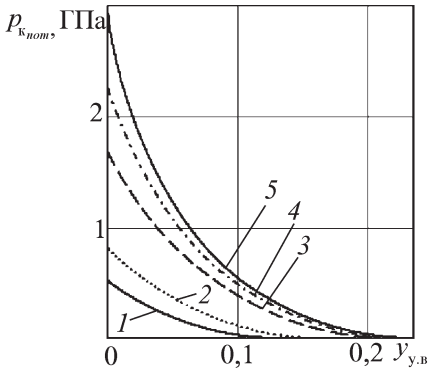


Рис. 6. Зависимости номинального контактного давления от упругого восстановления при достигнутых контактных сближениях:
1 – 0,33*Rp; 2* – 0,5*Rp*; *3* – 0,85*Rp*; *4* – 0,95*Rp*; *5* – *Rp*

Диапазон варьирования подачи S = 0,1... 0,4 мм/ход, радиус шарика R = 2,5; 5; 10 мм, контактное сближение было принято в долях от высотных параметров шероховатости и составило 0,33*Rp*; 0,5*Rp* и 0,85*Rp*.

В результате расчетов были выявлены следующие основные закономерности:

1. Доля упругой составляющей колеблется от 19 до 29 % от рабочего усилия.

2. С уменьшением подачи доля упругой составляющей растет, но прирост не превышает 1,5...3 %.

3. С увеличением радиуса инструмента в указанном диапазоне доля упругой составляющей увеличивается на 1,5...3 %.

4. С уменьшением контактного сближения доля упругой составляющей растет, причем при меньших значениях радиуса инструмента рост более интенсивный: при R = 10 мм прирост около 2...2,5 %, а при R = 2,5 мм – уже около 5...6 %.

5. С уменьшением шероховатости поверхности доля упругой составляющей растет на 1,5...2 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

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

2. **Смелянский В.М.** Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.

3. **Гуров Р.В.** Методология проектирования операций отделочно-упрочняющей обработки деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Вестник БГТУ. 2010. № 4. С. 17.

УДК 621.923

Е.С. Киселёв, О.В. Благовский *(Ульяновский государственный технический университет)*
E-mail: kec@ulstu.ru

Технологические возможности ультразвуковой релаксации остаточных напряжений полосовым твердосплавным индентором*

Представлены результаты теоретико-экспериментального исследования эффективности ультразвукового атермического снятия технологических остаточных напряжений полосовым твердосплавным индентором. Показано, что изменение параметров ультразвуковой релаксации напряжений в заготовках из коррозионно-стойкой стали позволяет существенно увеличить эффективность снижения их абсолютной величины.
Ключевые слова: *остаточные напряжения, ультразвук, релаксация.*

The results of theoretical and experimental research of the effectiveness of ultrasonic technology of athermal removal of residual stresses by bandpass hardmetal indenter are represented. These data show that changing the parameters of ultrasonic stress relaxation in the blanks of a corrosion-resistant steel can significantly increase efficiency of reducing their magnitude.
Keywords: *residual stresses, ultrasonic, relaxation.*

В настоящее время широкое распространение при изготовлении узлов и механизмов летательных аппаратов и высокоскоростного наземного транспорта получило использование ответственных деталей из труднообрабатываемых материалов, для которых обеспечение заданных значений эксплуатационных характеристик сопряжено с определенными технологическими трудностями [1].

Известно, что наибольшее влияние на важнейшие эксплуатационные характеристики (сопротивление

* Исследования выполнены при поддержке гранта РФФИ 08-00-00200-а.

усталости, долговечность, износостойкость, точность сопряжения и др.) деталей машин оказывают параметры качества их *поверхностных слоев* (ПС). Одними из важнейших параметров качества являются величина, глубина залегания и знак *технологических остаточных напряжений* (ТОН).

Все это, с учетом конструктивных особенностей и условий эксплуатации обрабатываемых деталей, может существенно повлиять на надежность работы и долговечность машины в целом. Так, для стабилизации точности маложестких и тонкостенных деталей, увеличения прочности сцепления металлопокрытий целесообразно уменьшать абсолютную величину остаточных напряжений и их градиента. Для увеличения сопротивления усталости деталей машин, работающих в условиях динамических нагрузок, в ПС обрабатываемых заготовок стремятся сформировать сжимающие остаточные напряжения. Как правило, во всех случаях формирование растягивающих ТОН в ПС ответственных деталей машин нежелательно.

Наибольшая вероятность образования растягивающих остаточных напряжений в ПС заготовок характерна для высокоскоростных операций механической обработки, в том числе окончательных, выполняемых в условиях интенсивной тепловой нагрузки. Основная причина – доминирующее воздействие теплового фактора, проявляющееся в мгновенном локальном нагреве и охлаждении тонких поверхностных слоев заготовки под зоной резания.

Для обеспечения заданного качества ПС деталей машин, изготавливаемых в процессе выполнения теплонапряженных операций, необходимо тем или иным способом снимать растягивающие остаточные напряжения. Реализация существующих технологий и традиционных способов снятия (релаксации) остаточных напряжений, таких как низкотемпературный отпуск, естественное и искусственное старение, сопряжена со значительными материальными, временными и энергетическими затратами, а часто и с потерей полученного качества.

Гораздо более выгодно в технологических процессах изготовления деталей вводить дополнительные операции *ультразвуковой* (УЗ) обработки, снимающие растягивающие ТОН. Наиболее простым по техническому исполнению средством для этой цели является *ультразвуковая релаксация* (УЗР) полосовым твердосплавным индентором.

Применение ультразвука для этой цели связывают с обнаруженным Л. Бергманом в середине прошлого века эффектом "расшатывания под действием механических колебаний ультразвуковой частоты кристаллической структуры металлов и сплавов", что, в свою очередь, приводит к релаксации остаточных напряжений [1].

Более поздние исследования, связанные с развитием теории дислокаций и дислокационных представлений в теории резания металлов, показали, что при воздействии ультразвука на металл энергия механических колебаний ультразвуковой частоты поглощается дислокациями и преобразуется в энергию их перемещений. Это вызывает развитие деформационных сдвигов и деформации зерен, уменьшающих величину остаточных напряжений.

Устройства для УЗР с шаровым (точечным) контактом с заготовкой известны уже достаточно давно. Однако их основными недостатками считаются относительно длительное время обработки и трудность внедрения операции в технологический процесс изготовления деталей.

Преимущество релаксации полосовым индентором как раз заключается в снижении технологического времени на обработку. Это обеспечивается за счет увеличения длины контакта индентора с заготовкой и, как следствие, сохранения постоянным времени "озвучивания" единичного объема заготовки при снижении общего времени релаксации.

Главным недостатком этого вида релаксации является некоторое уменьшение эффективности снятия растягивающих ТОН в связи с существенным снижением удельной силы прижима волновода (к длине контакта индентора с заготовкой) и связанная с этим необходимость пропорционального увеличения прикладываемого усилия.

В данной статье приведены результаты теоретико-экспериментальных исследований влияния режимов ультразвукового снятия ТОН на эффективность релаксации.

УЗР представляет собой совокупность двух протекающих одновременно процессов различного рода – перемещения дислокаций под воздействием энергии УЗ-поля и упругого деформирования ПС индентором. Причем силовое взаимодействие релаксатора с заготовкой играет далеко не последнюю роль.

Как известно [2], распространяющиеся в любой среде упругие волны испытывают поглощение (при этом энергия звуковых волн переходит в тепловую энергию) и рассеяние звуковой энергии, обусловленные свойствами среды и наличием упругих неоднородностей в ней. Для снижения данных потерь необходимо уменьшать силы упругого сопротивления обрабатываемого материала. Одним из методов реализации этого является увеличение работы, связанной с упругим деформированием ПС заготовки при УЗР.

Работа, затрачиваемая на совершение индентором упругого деформирования ПС заготовки, определяется из уравнения баланса энергии при выглаживании [1]:

$$E_з = E_{тр} + E_д \pm E_{вн},$$

где $E_{тр}$ – работа трения в зоне контакта инструмента с заготовкой, определяемая преимущественно касательной и осевой составляющими силы выглаживания, Дж;

$E_д$ – работа, связанная с упругим и пластическим деформированием ПС заготовки и определяемая преимущественно радиальной составляющей силы выглаживания, Дж;

$E_{вн}$ – внутренняя энергия, накапливаемая ПС в процессе деформационного упрочнения или теряемая им в процессе разупрочнения (перенаклепа), Дж,

$$E_з = P v_з \tau, \quad (1)$$

где P – усилие прижима индентора, Н;

$v_з$ – окружная скорость заготовки, м/с;

τ – время обработки, с,

$$v_з = \pi D n / 60, \quad (2)$$

где D – диаметр обрабатываемой заготовки, м;

n – частота вращения заготовки, об/мин.

Так как пластическая деформация ПС при УЗР отсутствует, т.е. $E_{вн} = 0$, а силы трения пренебрежимо малы по причине небольшого значения усилия прижима индентора, то можно принять $E_д = E_з$.

Таким образом, выражения (1) и (2) показывают, что на увеличение количества энергии, используемой для упругого деформирования ПС заготовки, наибольшее влияние оказывают усилие прижима волновода P, окружная скорость заготовки $v_з$ и время обработки τ.

Предположим, что при воздействии УЗ-волновода на обрабатываемую заготовку в ее ПС образуется область объемом V, в которой затрачиваемая на деформирование энергия используется в наибольшей степени (рис. 1). Соответственно, силы упругого сопротивления в данной области максимально снижены, а следовательно, потери звуковой энергии минимальны.

В общем виде энергия звукового поля W, заключенная в некотором объеме V, определяется по формуле [2]:

$$W = \langle w \rangle V,$$

где ‹w› – средняя объемная плотность энергии звукового поля, Дж/м^3,

$$\langle w \rangle = 0{,}5 \rho A^2 \omega^2, \quad (3)$$

где ρ – плотность среды, кг/м^3;

A – амплитуда колебаний частиц среды, м;

ω – угловая частота звуковых волн, с$^{-1}$,

$$\omega = 2 \pi f, \quad (4)$$

где f – частота колебаний звуковых волн, Гц,

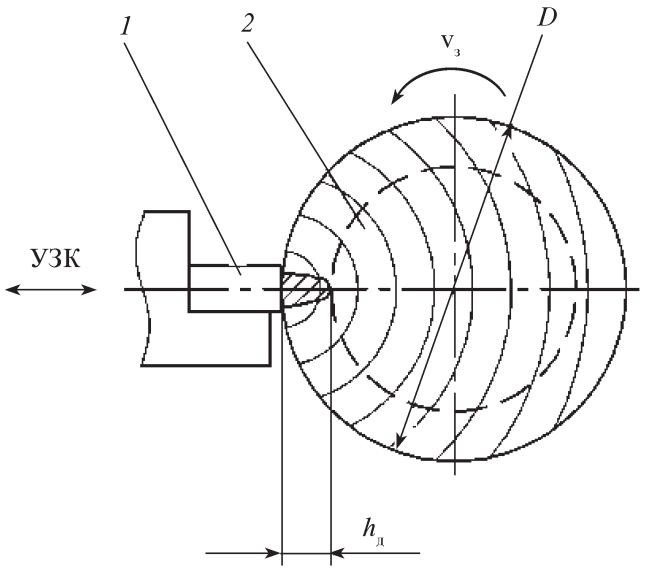


Рис. 1. Схема воздействия индентора на заготовку:
1 – полосовой индентор; *2* – обрабатываемая заготовка; $h_д$ – глубина упругодеформированного слоя, м

$$V = S l,$$

где S – площадь поперечного сечения области, подвергаемой упругому деформированию, м^2;

l – длина контакта индентора с заготовкой, м.

За один оборот обрабатываемой заготовки воздействию ультразвуковых колебаний подвергается объем, равный

$$V_{об} = \pi l h_д (D - h_д). \quad (5)$$

Следовательно, объем, обработанный за некоторое время τ, равен

$$V_{вр} = \tau n V_{об} / 60. \quad (6)$$

Если при УЗР происходит перемещение индентора вдоль заготовки, время обработки определяется по формуле

$$\tau = 60\,000\, l / v_с, \quad (7)$$

где $v_с$ – скорость продольной подачи стола, мм/мин.

Схема обработки УЗР представлена на рис. 2.

Таким образом, затраченная при УЗР полосовым индентором звуковая энергия за время τ будет определяться формулой:

$$W_{УЗР} = \langle w \rangle V_{вр}. \quad (8)$$

Подставив выражения (3)–(7) в формулу (8), получим

$$W_{УЗР} = \frac{1000 \rho \pi^3 A^2 f^2 n l^2 h_д (D - h_д)}{v_с}. \quad (9)$$

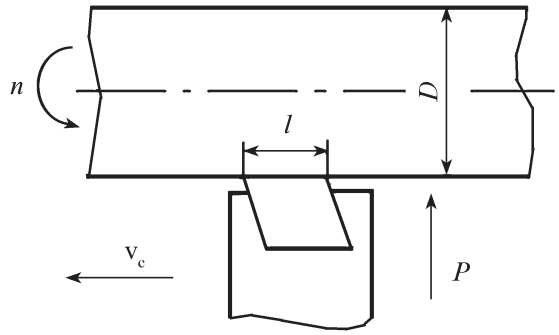


Рис. 2. Схема обработки УЗР полосовым индентором

Из выражения (9) видно, что увеличение амплитуды и частоты звукового сигнала, длины контакта, частоты вращения заготовки и глубины упругодеформированного слоя ведет к росту энергии звукового поля, а следовательно, и к эффективности снятия ТОН. Увеличение продольной подачи, наоборот, способствует уменьшению энергии и снижению эффективности.

Образцами для исследований служили валики из коррозионно-стойкой стали 95Х18 диаметром 45 мм и длиной 250 мм. В ходе экспериментальных исследований измеряли ТОН в касательном и осевом направлениях с помощью аппаратуры СИТОН-АРМ. Ультразвуковые колебания (f = 19,6 кГц, A = 5...7 мкм) накладывали на релаксатор от УЗ-генератора "Техма-2М" [1].

Операции УЗР ТОН полосовым индентором выполняли непосредственно на круглошлифовальном станке 3М151В после шлифования с продольной подачей (круг 24А25НС17К26 1-600×25×305; скорость вращения заготовки $v_з$ = 40 м/мин; скорость подачи стола v_c = 30 мм/мин; глубина шлифования t = 0,05 мм) с помощью оригинальной УЗ-техники [1]. В качестве индентора использовали твердосплавную пластину Korloy CNMG 120408-HS NC9025.

Обработку УЗР выполняли с подачей в зону контакта УЗ-волновода с заготовкой 100 %-ного концентрата СОЖ Велс-1 с расходом 5 г/ч путем нанесения на контактирующие объекты кистью.

Для исследования процесса обработки заготовок УЗР было использовано устройство (рис. 3), состоящее из корпуса *1*, в котором размещен стакан *2*, имеющий возможность возвратно-поступательного движения. Пьезокерамический преобразователь (два пьезокерамических кольца *7*) закреплен на волноводе при помощи шпильки *5* и гаек *6*. Твердосплавная пластина *9* жестко закреплена в волноводе *4*. Усилие прижима создается пружиной *10*. Ход пьезокерамического преобразователя ограничивает винт *11*.

Варьируемыми факторами при релаксации являлись длина контакта l, усилие прижима индентора P, скорость подачи стола v_c и частота вращения заготовки n (см. рис. 2).

Эффективность релаксации E определяли по формуле [1]:

$$E = \frac{\sigma_{ост\,о} - \sigma_{ост}}{\sigma_{ост\,о}} \cdot 100,$$

где $\sigma_{ост\,о}$, $\sigma_{ост}$ – соответственно исходные и текущие (максимальные) остаточные напряжения в ПС, МПа.

На рис. 4, 5 представлены результаты экспериментального исследования зависимости эффективности УЗР от различных технологических параметров режима обработки.

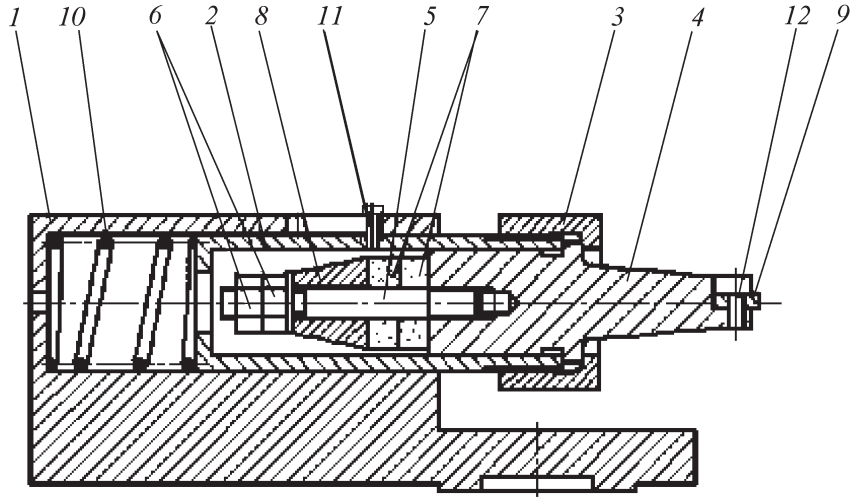


Рис. 3. Устройство для УЗР полосовым индентором:
1 – корпус; *2* – стакан; *3*, *6* – гайки; *4* – волновод; *5* – шпилька; *7* – пьезокерамические кольца; *8* – отражающая шайба; *9* – индентор; *10* – пружина; *11* – винт; *12* – штифт

Как видно из рис. 4, увеличение длины контакта полосового индентора с заготовкой приводит к росту эффективности процесса снятия остаточных напряжений. Исходя из выражения (9), увеличение l должно приводить к существенному повышению E. Однако этот рост несколько меньше ожидаемого.

Данное явление объясняется главным недостатком УЗР полосовым индентором – снижением удельной величины P/l с возрастанием длины контакта l и при неизменном значении силы P. При этом уменьшается энергия, затрачиваемая на упругое деформирование ПС заготовки и область этой деформации, в которой потери энергии звукового поля минималь-

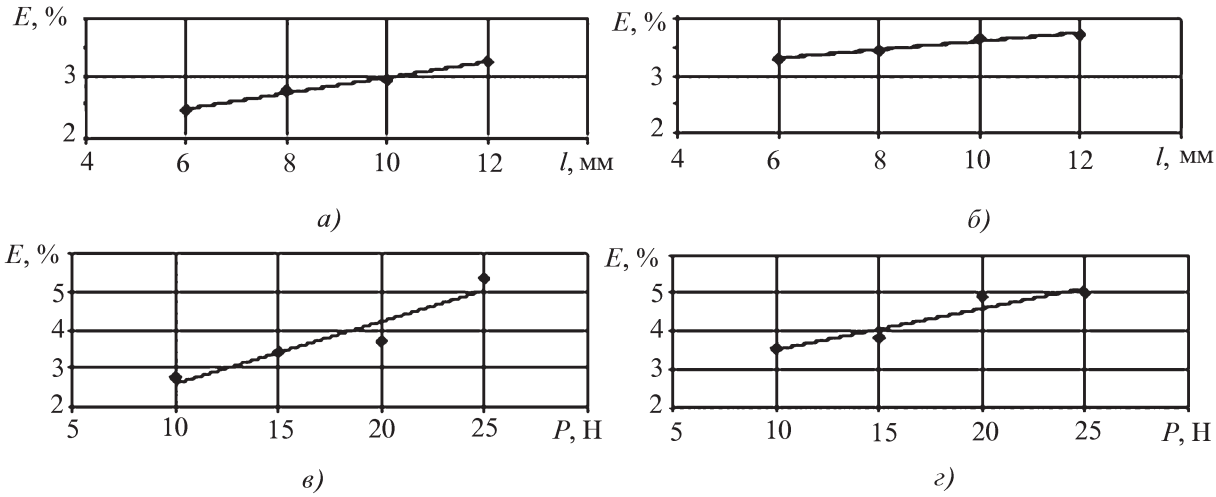


Рис. 4. Зависимости эффективности УЗР касательных (*а*, *в*) и осевых (*б*, *г*) остаточных напряжений от длины контакта (*а*, *б*) и усилия прижима волновода (*в*, *г*):
а, *б* – P = 10 Н, v_c = 12 мм/мин; n = 125 об/мин; *в*, *г* – l = 12 мм, v_c = 12 мм/мин, n = 125 об/мин

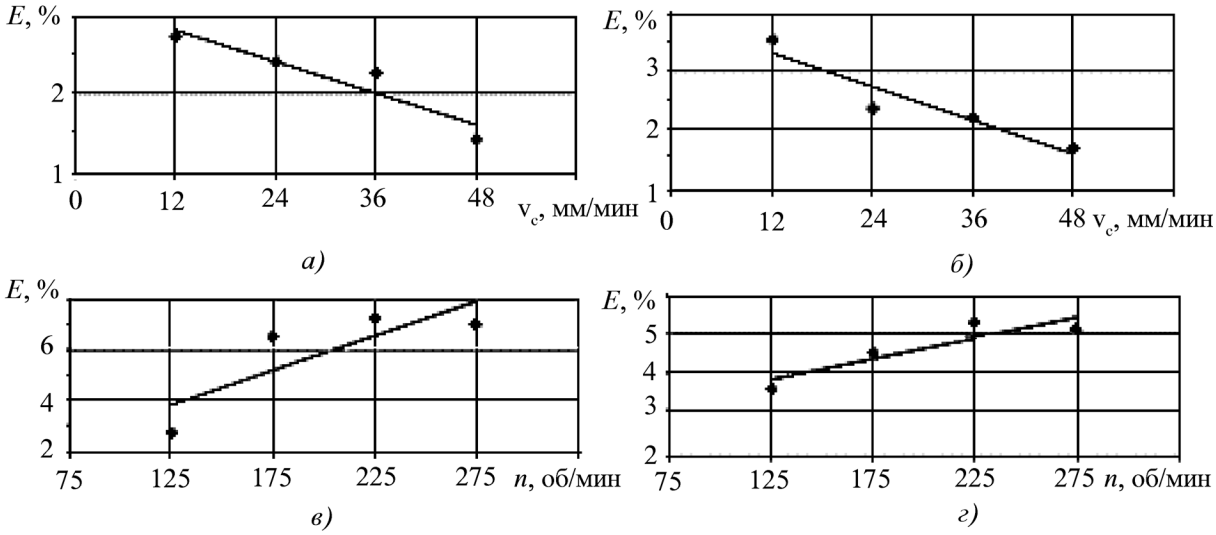


Рис. 5. Зависимости эффективности УЗР касательных (*а*, *в*) и осевых (*б*, *г*) остаточных напряжений от скорости подачи стола (*а*, *б*) и частоты вращения заготовки (*в*, *г*):
а, *б* – l = 12 мм, P = 10 Н, n = 125 об/мин; *в*, *г* – l = 12 мм, P = 10 Н, v_c = 12 мм/мин

ны и, соответственно, происходит снижение эффективности УЗР.

Рост усилия прижима волновода к заготовке приводит к ожидаемому возрастанию эффективности релаксации ТОН. Объяснением этому также может служить приведенное выше утверждение о зависимости эффективности УЗР от силы прижима, приведенной к длине контакта.

Проанализировав экспериментальные данные, представленные на рис. 5, можно сделать вывод, что эффективность атермического снятия остаточных напряжений снижается с ростом скорости продольной подачи стола v_c и увеличивается с ростом частоты вращения заготовки n. Это полностью согласуется с выражением (9).

Кроме того, из выражений (1) и (2) видно, что уменьшение времени обработки τ, которое неизменно происходит при увеличении скорости подачи стола, ведет к снижению энергии $E_з$, затрачиваемой на деформирование; рост параметра n, напротив, приводит к увеличению скорости вращения заготовки, а вследствие этого, к увеличению $E_з$.

Выводы

УЗР является сложным видом физико-механической обработки, требующим учета не только явлений, протекающих в ПС заготовки под воздействием ультразвука, но и его упругого деформирования, происходящего в результате прижима индентора к заготовке.

Для увеличения эффективности снижения уровня нежелательных растягивающих остаточных напряжений при УЗР имеется возможность управлять как параметрами самого УЗ-сигнала (амплитуда A, частота f), так и технологическими параметрами режима обработки (частота вращения заготовки n, усилие прижима волновода P, время обработки τ и др.).

УЗР остаточных напряжений полосовым инденторм является эффективным методом снижения их абсолютного значения и позволяет снизить временные затраты на обработку, особенно если приблизить или приравнять длину контакта l к длине обрабатываемой поверхности заготовки (при сохранении постоянным отношения P/l).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Киселёв Е.С., Ковальногов В.Н.** Механическая обработка заготовок в условиях критического тепломассопереноса. М.: РАН, 2008. 250 с.

2. **Киселёв Е.С.** Интенсификация процессов механической обработки использованием энергии ультразвукового поля: учеб. пособие. Ульяновск: УлГТУ, 2003. 186 с.

Поздравляем с юбилеем

Фоминского Вячеслава Юрьевича

доктора физ.-мат. наук, профессора,
лауреата премии Правительства РФ в области науки и техники,
заместителя главного редактора нашего журнала

Саушкина Бориса Петровича

доктора техн. наук, профессора,
члена редакционного совета нашего журнала

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

Редакционный совет и редакция журнала "Упрочняющие технологии и покрытия"

УДК 669.295

А.В. Бровер, В.Н. Пустовойт, Г.И. Бровер
(Донской государственный технический университет)
E-mail: brover@mail.ru

Структурная организация и свойства композиции покрытие–металлическая основа при импульсном лазерном воздействии

Рассмотрена структурная картина химических покрытий на сталях после импульсной лазерной обработки с оплавлением поверхности. Показаны особенности аномального ускоренного массопереноса в покрытиях в процессе кристаллизации с проявлением термоэффекта (термодиффузии Соре). Установлено, что текстура кристаллизации покрытий в зоне лазерной обработки уменьшает трещинообразование при деформации, способствует интенсификации режимов эксплуатации пар трения.

Ключевые слова: *лазерное облучение, металлические материалы, химические покрытия, повышение эксплуатационных свойств.*

The structure of chemical coatings on steels after pulse laser processing with surface fusion is considered. The features of anomalous accelerated mass transfer in the coatings during the crystallization process with the appearance of thermo-effect (thermal diffusion of Sore). It is established that the texture of the crystallization of coatings formed in the zone of laser-processing reduces cracking during deformation and contributes to the intensification of modes of operation of the friction pairs.

Keywords: *laser irradiation, metallic materials, chemical coatings, improving exploitation properties.*

Введение

Существующие и промышленно освоенные методы нанесения покрытий на стальные детали имеют как достоинства, так и недостатки (низкая прочность сцепления покрытия с основой, пористость покрытия, высокий уровень остаточных напряжений и др.), которые существенно снижают возможность их применения. При объемной термической обработке покрытий в структуре стальной основы может укрупняться зерно, при длительном термическом воздействии выгорают легирующие элементы покрытия. Это приводит к уменьшению твердости покрытий и снижению трещиностойкости изделия в целом.

Проведение термической обработки покрытий без деградации структуры и ухудшения основных свойств металлической основы изделий возможно при воздействии на поверхность *концентрированных потоков энергии* (КПЭ), в частности импульсного лазерного излучения.

В данной статье рассматриваются вопросы влияния энергетических характеристик и условий лазерного облучения на эффективность термической обработки покрытий различного состава, а также изучены особенности организации структуры химических покрытий в условиях гипернеравновесных фазовых переходов и ее влияние на основные свойства упрочненных изделий.

Методика проведения исследований

Материалами для исследований служили стали: 45, У8, У10А, У12, Х12М, Х12Ф1.

Импульсное лазерное облучение проводили на технологических установках "Квант-16" и ГОС-30М. Изменение энергии излучения (10...30 Дж), степени дефокусировки луча (3...6 мм), длительности излучения $(1...6)\cdot10^{-3}$ с позволили варьировать плотность мощности излучения в широких пределах.

Участок необходимых для исследований размеров создавали последовательным перемещением образца относительно оси пучка. Поверхностной обработке подвергали не менее семи образцов размером 10×10×15 мм для каждого варианта упрочнения.

Металлографические исследования осуществляли на поперечных шлифах. Съемку микроструктур проводили на микроскопах МИМ-8 и "Neophot-21". Скани-

рующую зондовую микроскопию выполняли с использованием научно-учебного комплекса "Nanoeducator" (производство компании НТ-МДТ, г. Зеленоград) в режиме атомно-силовой микроскопии.

Измерения микротвердости осуществляли на приборе ПМТ-3 с нагрузкой 0,49 Н. При этом придерживались стандартных правил размещения отпечатков, согласно которым минимально допускаемое расстояние между центрами соседних отпечатков составляло 30 мкм, от центра отпечатка до края образца – 20 мкм.

Идентификацию фазового состава в зонах термовлияния производили методом дифракционного рентгеновского анализа по глубине после электролитического полирования образцов и металлографического контроля структуры изучаемой поверхности. Исследования осуществляли на дифрактометре ДРОН-0,5 в фильтрованном FeK_α-излучении с регистрацией интенсивности сцинтилляционными счетчиками. Съемку профилей рентгеновских линий вели в режиме непрерывной записи со скоростью 1 град/мин.

Результаты исследований и их обсуждение

Общим требованием к условиям формирования структуры материалов композиции покрытие–несущая основа при лазерной обработке является одновременное формирование структуры материала покрытия в виде твердых фаз в высоколегированной матрице, несущей основы изделий с заданным уровнем свойств и создание в контактной зоне основного металла и покрытия условий для протекания взаимной диффузии компонентов покрытия и подложки, что обеспечивает высокую адгезию и снижает пики внутренних напряжений. Кроме того, в процессе скоростного лазерного облучения коагулируют и завариваются поры, происходит релаксация внутренних напряжений в покрытиях с одновременным отпуском или неполной закалкой тонкого, прилежащего к покрытию, слоя металлической основы.

Исходя из теплофизического анализа процесса лазерного облучения материалов и результатов экспериментов определена зависимость глубины оплавленного слоя покрытий разного состава от плотности мощности излучения. Это позволило обоснованно выбирать оптимальные режимы лазерной обработки для достижения в зоне контакта покрытия с металлической подложкой температуры плавления основного элемента покрытия, что является необходимым условием ускоренной взаимной диффузии компонентов покрытия и подложки и приводит к повышению прочности сцепления в композиции покрытие–основа.

Установлено и экспериментально подтверждено, что рекомендуемая плотность мощности излучения при лазерной обработке никелевых покрытий составляет 100 МВт/м^2 [1].

Непосредственно после осаждения химические покрытия на никелевой основе имеют недостаточно высокую прочность сцепления с подложкой, в связи с чем появляется необходимость в проведении их термической обработки. Лазерная поверхностная термообработка имеет преимущества перед объемным нагревом, что объясняется сокращением времени распада твердых растворов, уменьшением возможности выгорания легирующих элементов из поверхностных слоев образцов, в том числе уменьшением окисляемости поверхности, формированием текстуры в поверхностных слоях материалов, что в совокупности приводит к повышению твердости и износостойкости упрочненных покрытий [2, 3].

Рассмотрим строение зон лазерной обработки никелевых покрытий на стальной подложке. Установлено, что облученные участки имеют гетерогенное строение. В общем случае они состоят из трех структурных зон, различающихся температурным интервалом образования, фазовым составом, степенью травимости и твердостью. В центральной части пятна поглощается максимальное количество энергии, достигается максимальная температура нагрева, формируется зона лазерной закалки из жидкого состояния.

При лазерном облучении стальной подложки в объемно-закаленном состоянии в тонком, прилежащем к покрытию, слое формируется зона высокотемпературного кратковременного отпуска или закалки (полной или неполной) в зависимости от марки стали.

В процессе лазерной обработки химическое Ni–P-покрытие разогревается до таких температур, что переходит в жидкое состояние, а после прекращения нагрева затвердевает с очень высокой скоростью охлаждения из-за быстрого теплоотвода в глубь холодного объема образца. При такой термической обработке формируются длинные (в направлении теплоотвода) и тонкие дендриты α-твердого раствора фосфора в никеле и химических соединений Ni_3P, Ni_5P_4, Ni_2P и др. [4]. Подтверждением сказанному являются результаты исследования лазерно-оплавленного химического Ni–P-покрытия с использованием атомно-силового микроскопа (рис. 1, см. с. 2 обложки), а также микроструктурный оптический анализ (рис. 2, *а*, см. с. 2 обложки).

Кроме того, проводили рентгеноструктурный анализ Ni–P-покрытий, содержащих ~ 10 % P, который показал, что до облучения покрытия имеют мелкокристаллическую структуру, дающую на дифрактограммах диффузное гало (рис. 3, кривая *1*). Однако

после лазерной обработки с плотностью мощности $q > 90$ МВт/м^2 на его фоне появляются достаточно четкие линии кристаллических фаз (рис. 3, кривая *2*).

При анализе результатов металлографических и рентгеноструктурных исследований никелевых покрытий на сталях учитывался тот факт, что система поверхностного легирования Ni–Fe относится к диаграммам с неограниченной растворимостью компонентов в жидком состоянии, но ограниченной растворимостью в твердом состоянии. При лазерной обработке с разными режимами существует возможность получения широкого диапазона химических и структурных состояний вследствие фиксирования при быстрой закалке твердых растворов различного состава.

Достаточно большое количество выделившихся дисперсных соединений типа Ni_3P, Ni_5P_4 в сочетании с незначительным тепловым влиянием на основу изделий позволяет достичь повышения качества химических покрытий за счет увеличения адгезии покрытий к подложке, улучшения морфологии поверхности; приводит к увеличению их твердости и к минимизации износа.

Подтверждением высокой трещиностойкости переходной зоны являются результаты, представленные на рис. 2 (см. с. 2 обложки), полученные при металлографических исследованиях лазерно-облученного покрытия с использованием оптического и сканирующего зондового микроскопов. Как видно, несмотря на значительную величину изгибающих напряжений от воздействия индентора микротвердомера на покрытие, трещин около отпечатков не наблюдается. В то же время при аналогичных исследованиях покрытий после объемной термообработки явно фиксируются сколы и подобные дефекты. Данный эффект служит косвенным свидетельством ускоренной взаимной диффузии железа и никеля в переходной зоне между никелевым покрытием и стальной подложкой при лазерной обработке.

Оценку коэффициента взаимной диффузии D никеля и железа в переходной зоне покрытие–стальная основа при лазерной обработке проводили по выражению [5]:

$$L \sim (D / \tau)^{1/2},$$

где L – ширина диффузионной зоны ~ 2 мкм;

τ – время действия лазерного импульса ~ 10^{-3} с.

В результате установлена величина $D_{Ni} \approx 4 \cdot 10^{-9}$ м^2/с, что на несколько порядков превышает соответствующее значение коэффициента диффузии никеля в железе при печном нагреве ($D = 0{,}77 \cdot 10^{-13}$ м^2/с), т.е. при лазерной обработке действуют дополнительные движущие силы и факторы, увеличивающие интенсивность диффузионных процессов.

Можно сделать вывод, что ускоренный массоперенос в композиции покрытие–стальная подложка при скоростном лазерном нагреве носит кооперативный характер и в первую очередь связан с конвективным перемешиванием расплава. Растворимость многих элементов в жидкой фазе выше, чем в твердой, и на границе жидкой и твердой фаз образуется диффузионный слой. Особое значение для ускорения массопереноса в зонах лазерной обработки имеют градиенты температур, достигающие огромных величин 10^5 К/м и приводящие к явлению термодиффузии (эффект Соре).

Из результатов металлографического и рентгеноструктурного анализа (см. рис. 2, *а*, с. 2 обложки, рис. 3) следует, что в зоне лазерной закалки из жидкого состояния формируется текстура кристаллизации. Установлено, что наличие текстуры приводит к анизотропии свойств облученного металла: уменьшает трещинообразование при деформации; повышает коррозионную стойкость упрочненных зон; снижает коэффициент трения трибосистем, повышает стационарность процессов в зоне трения, что способствует интенсификации режимов эксплуатации пар трения при резании металлов.

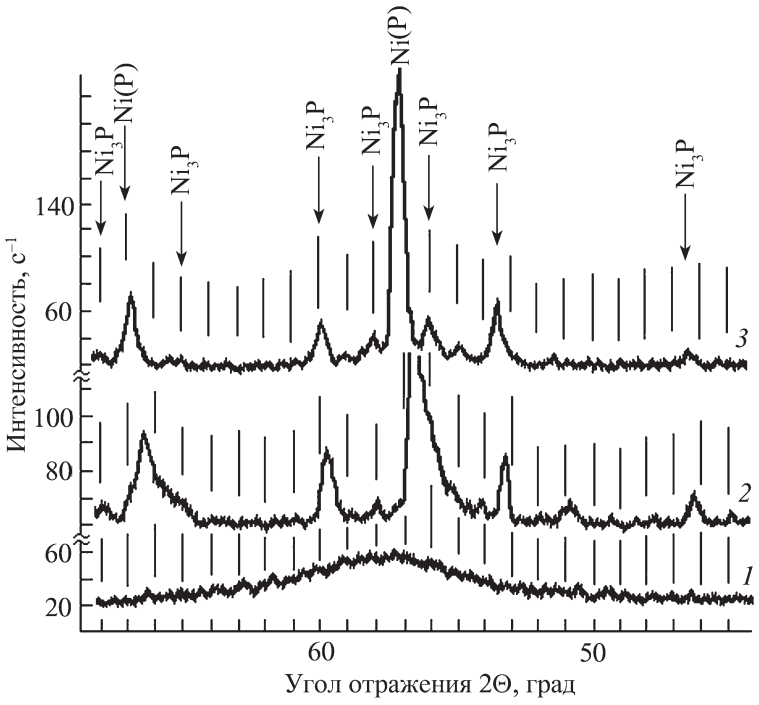


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм Ni–P-покрытий на стали Х12М: *1* – без термообработки; *2* – после лазерной обработки с q = 100 МВт/м^2; *3* – после объемной термообработки при 400 °С

С целью прогнозирования степени упрочнения и износостойкости химических покрытий после лазерной обработки на разных режимах и выбора оптимального режима облучения для разных условий эксплуатации изделий в работе использовали статистическое моделирование – строили номограммы распределения значений искомого параметра с помощью программы статистической обработки ограниченного массива данных, представленные на рис. 4, 5 (см. с. 2 обложки).

Объемную долю дендритов в облученном покрытии определяли металлографическим способом. Исследования износостойкости оценивали по потере массы образцов в условиях сухого трения по схеме диск–колодка на машине трения МИ-1М при различном давлении P в паре образец–контртело (см. рис. 5, с. 2 обложки). Белые точки на рисунках – результат экспериментальной проверки результатов моделирования.

В результате моделирования сформирована система значений твердости и коэффициента трения в широком диапазоне варьирования режимами облучения. Для подтверждения достоверности полученных результатов проводили серию контрольных экспериментов, показавшую отличное совпадение данных.

На основании выявленных закономерностей структурных превращений в поверхностных слоях химических покрытий на сталях и сплавах при лазерном воздействии и определения степени их влияния на эксплуатационные свойства облученных изделий разработаны и опробованы технологические приемы лазерного поверхностного упрочнения и легирования деталей машин и инструмента различного функционального назначения, включающие рекомендации по выбору схем облучения рабочей части изделий в зависимости от условий эксплуатации; оптимизации режимов легирования для получения требуемой глубины и твердости облученного покрытия при возможно меньшем нарушении исходной микрогеометрии поверхности.

Показано, что применение технологий лазерной обработки покрытий разного состава существенно улучшает основные свойства сталей и сплавов, что позволяет: повысить ресурс работы упрочненных изделий в 1,5–3 раза; сократить затраты на их производство и приобретение; увеличить производительность труда; уменьшить расход сталей.

Выводы

1. Варьируя параметрами энергетического лазерного воздействия на химическое покрытие, необходимо достигать такого распределения температур по сечению, при котором в процессе кристаллизации оплавленного слоя покрытия образуется упрочняющий каркас из химических соединений с одновременным образованием переходной зоны от покрытия к металлической подложке за счет протекания взаимной диффузии компонентов и образования твердых растворов переменной концентрации, что обеспечивает высокую адгезию покрытий к основе, а также повышает трещиностойкость и конструктивную прочность облученных деталей машин и инструмента.

2. Установлено, что аномальный ускоренный массоперенос в покрытиях на сталях и сплавах при скоростном лазерном нагреве носит кооперативный характер и в первую очередь связан с выраженным влиянием присутствия на поверхности жидкой фазы, а в процессе кристаллизации – с проявлением термоэффекта (термодиффузии Соре).

3. Текстура кристаллизации в зоне лазерной обработки из жидкого состояния приводит к анизотропии основных эксплуатационных свойств облученных покрытий; уменьшает трещинообразование при деформации; снижает коэффициент трения трибосистем; повышает стационарность процессов в зоне трения; способствует интенсификации режимов эксплуатации пар трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Бровер А.В., Пустовойт В.Н., Крейнин С.В.** Влияние режимов лазерной обработки на структуру и свойства инструментальных сталей // Металлообработка. 2008. № 2 (43). С. 28–32.

2. **Бровер Г.И., Крейнин С.В.** Повышение качества никель-фосфорных покрытий лазерной обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 2009. № 7 (649). С. 33–36.

3. **Бровер А.В., Крейнин С.В., Приймак А.В.** Сопротивление разрушению инструментальных сталей, обработанных лазером // СТИН. 2010. № 8. С. 19–21.

4. **Бровер Г.И., Крейнин С.В.** Структурные особенности лазерного легирования сталей и сплавов из покрытий разного состава // Современные проблемы науки и образования. 2008. № 6. С. 9.

5. **Крапошин В.С.** Связь особенностей микроструктуры и характеристик тепло- и массопереноса в железе технической чистоты при лазерном нагреве // Физика и химия обработки материалов. 1989. № 1. С. 32–37.

УДК 621.892

А.В. Карпов *(Самарский государственный технический университет)*
E-mail: rusalexa@mail.ru

Повышение качества поверхностного слоя и увеличение долговечности лопаток второй ступени газоперекачивающего агрегата ГТК-10 на основе совершенствования технологического процесса термопластического упрочнения

Приведены результаты исследования остаточных напряжений, усталостных испытаний и микроструктуры образцов из сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893), вырезанных электроискровым способом из пера лопатки второй ступени газоперекачивающего агрегата ГТК-10, предварительно подвергнутой термопластическому упрочнению на установке с регулируемой системой охлаждения.

Ключевые слова: *термопластическое упрочнение, остаточные напряжения, усталостные испытания, металлографическое исследование, лопатка второй ступени газоперекачивающего агрегата ГТК-10.*

In this study results of a study of residual stresses, fatigue testing and microstructure of samples of alloy ХН65ВМТЮ (ЭИ893) cut electric spark method from the blade the second stage gas compressor unit of ГТК-10, previously subjected to thermoplastic reinforcement at the facility with controlled cooling system.

Keywords: *thermoplastic hardening, residual stress, fatigue tests, metallographic examination, blade the second stage gas compressor unit of ГТК-10.*

Рабочие лопатки второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10 имеют существенные геометрические размеры: рабочая длина составляет 243,4 мм, ширина лопатки в корневом сечении – 70 мм, и, как следствие, имеют большую массу порядка 1,5 кг, замер которой проводили на электронных весах модели "ENERGY EN-405".

Поэтому для упрочнения таких деталей, как лопатки второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10, была разработана новая конструкция установки для *термопластического упрочнения* (ТПУ) [1], принципиальная схема которой показана на рис. 1.

Основной отличительной особенностью новой конструкции установки для ТПУ является камера охлаждения, в которой установлены четыре регулируемые спрейерные решетки охлаждения с насадками, при этом две верхние спрейерные решетки охлаждения выполнены с возможностью перемещения в горизонтальной плоскости, две нижние – с возможностью изменения угла наклона от 0 до 75°, а насадки выполнены с возможностью изменения размеров отверстий спейерных решеток охлаждения. Отверстия спрейерных решеток охлаждения могут иметь различную форму (треугольную, трапециевидную, круглую, и т.д.).

Насадка, регулирующая размеры отверстий спрейерных решеток охлаждения (в данном случае форма отверстия решетки охлаждения треугольная), изображена на рис. 2. Размеры отверстий решеток охлаждения, регулируемые насадкой, изменяются в зависимости от формы, габаритных размеров, массы упрочняемых лопаток.

Режим упрочнения лопаток определяли исходя из опыта работы [2] и с учетом конструктивных требований спроектированной установки для ТПУ, формы и размеров упрочняемых деталей. Таким образом, был обоснован выбор доверительного интервала температуры нагрева упрочняемых деталей, который варьируется от 600 до 800 °С (как наиболее оптимальный при упрочнении деталей из жаропрочных сплавов согласно [2]), а также Б.А. Кравченко [3] был определен оптимальный интервал давления охлаждающей жидкости (воды) 0,5...0,6 МПа.

Как показали экспериментальные исследования, для лопаток второй ступени турбины газоперекачивающего агрегата ГТК-10, изготовленных из сплава ХН65ВМТЮ (ЭИ893), при ТПУ оптимальная температура нагрева составляет 700...750 °С, а давление охлаждающей жидкости, в вихревой поток которой падает лопатка, необходимо было увеличить до 1...1,5 МПа [1] в зависимости от размеров отверстий спейерных решеток, которые регулируются по высоте.

В лаборатории кафедры ИССА СамГТУ из верхней и нижней части пера упрочненных лопаток электроискровым способом на электроэрозионном станке мод. 4В721 вырезали образцы в зоне выходной кромки лопатки, являющейся самым слабым местом, и определяли величину и знак остаточных напряжений в осе-

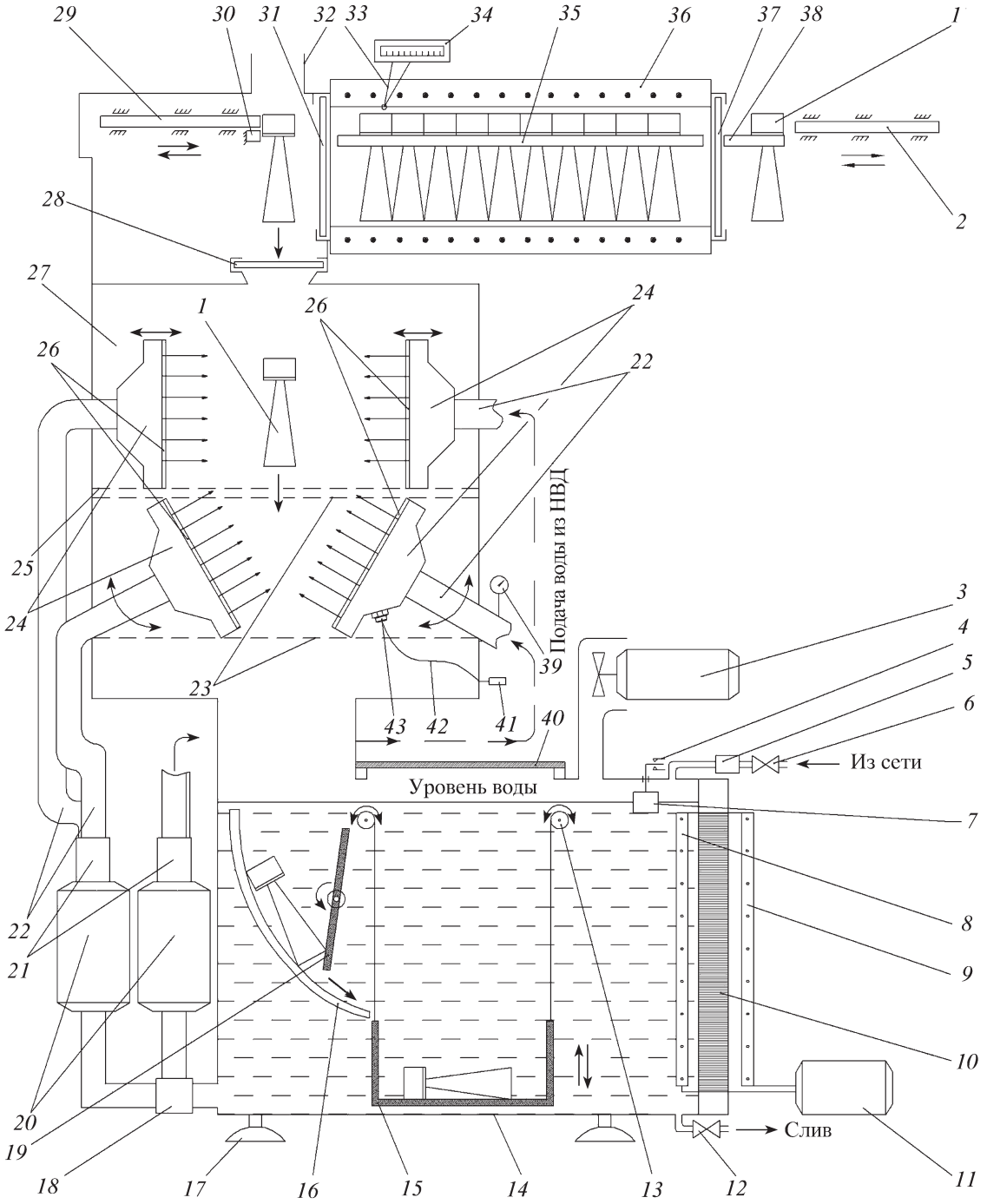


Рис. 1. Схема установки для ТПУ:
1 – деталь; *2* – толкатель; *3* – вентилятор; *4* – конечный выключатель; *5* – фильтр; *6*, *12* – краны; *7* – поплавок; *8* – испаритель; *9* – конденсатор; *10* – теплоизоляция; *11* – компрессор; *13* – блок; *14* – емкость; *15* – контейнер; *16* – эластичный склиз; *17* – виброопора; *18* – фильтр; *19* – эластичный толкатель; *20* – насосы высокого давления (НВД); *21* – переходник для шлангов; *22* – шланги для подачи воды; *23* – направляющие для фиксации угла наклона нижних спрейерных решеток охлаждения; *24* – спрейерные решетки охлаждения; *25* – салазки для горизонтального перемещения верхних спрейерных решеток охлаждения; *26* – насадки, регулирующие размеры отверстий спрейерных решеток охлаждения; *27* – камера охлаждения; *28* – задвижка камеры охлаждения; *29* – захват; *30* – неподвижный упор; *31*, *37* – задвижки печи; *32* – отводная труба; *33* – термопара; *34* – температурное реле; *35*, *38* – направляющие; *36* – электропечь; *39* – манометр; *40* – крышка люка; *41* – прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости; *42* – изолированный провод, соединяющий датчик температуры охлаждающей жидкости и прибор, регистрирующий температуру охлаждающей жидкости; *43* – датчик температуры охлаждающей жидкости

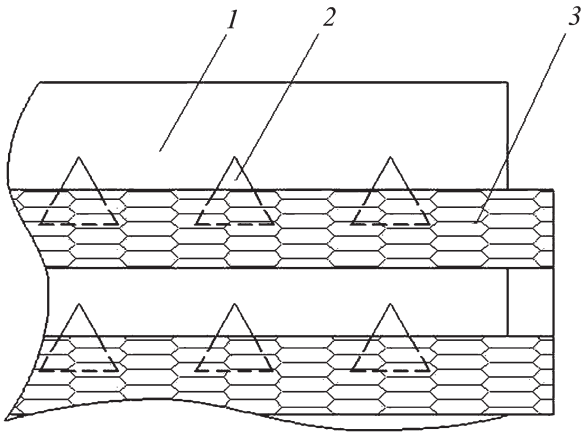


Рис. 2. Схема регулировки отверстий спрейерной решетки охлаждения с помощью насадки:
1 – решетка спрейера; *2* – отверстия спрейерной решетки; *3* – насадка

вом направлении образца σ_z^{res}. После чего проводили исследование остаточных напряжений образцов толщиной 4 мм на установке ПИОН-2 методом академика Н.Н. Давиденкова. Результаты исследования приведены на рис. 3.

Усталостные испытания упрочненных лопаток проводили в лаборатории Самарского научно-инженерного центра АПИДМ в соответствии с "Едиными техническими условиями на усталостные испытания лопаток газотурбинных установок" НД 631.301.0216-03–98 на электромагнитном вибростенде ЭМВС-1 с указанной ранее наработкой. База испытаний $N = 10^7$ циклов, температура 20 °С. Результаты усталостных испытаний лопаток, упрочненных на установках с регулируемой и с нерегулируемой системами охлаждения, и без упрочнения, приведены на рис. 4.

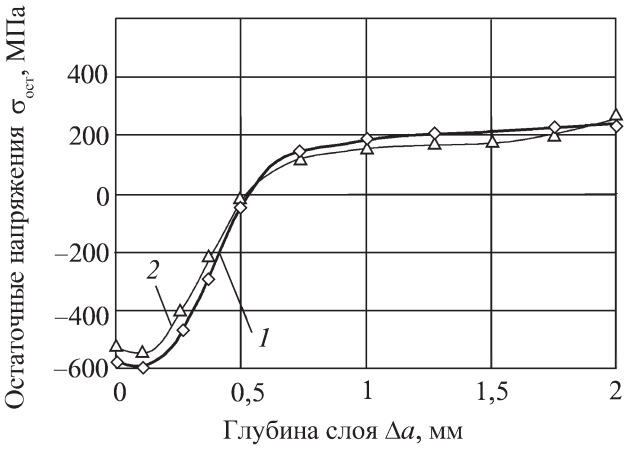


Рис. 3. Эпюры остаточных напряжений после ТПУ:
1, *2* – ТПУ на установке соответственно с регулируемой и нерегулируемой системой охлаждения

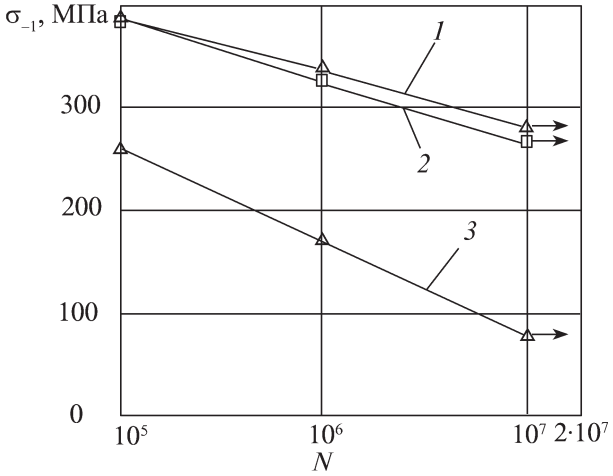


Рис. 4. Пределы выносливости рабочих лопаток турбины из сплава ХН65ВМТЮ:
1, *2* – ТПУ на установке соответственно с регулируемой и нерегулируемой системой охлаждения; *3* – без упрочнения

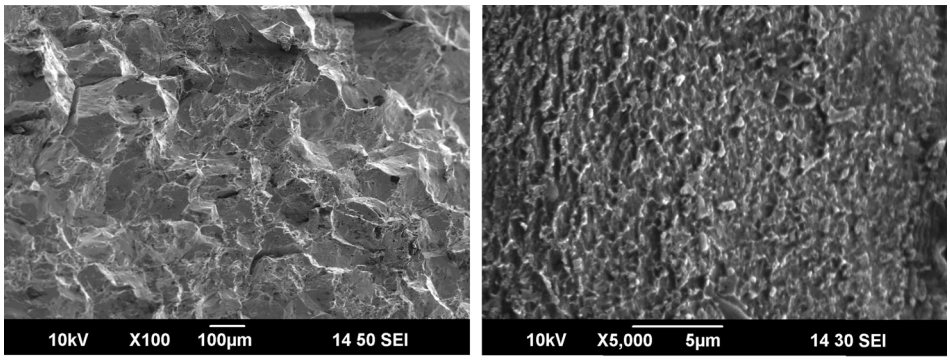
Металлографические исследования образцов проводили в лаборатории кафедры металловедения, порошковой металлургии, наноматериалов СамГТУ на электронном микроскопе JEOL JSM-6510 со встроенным энергодисперсионным рентгеновским спектрометром JED-2300.

Перед проверкой на микроскопе исследуемую поверхность образцов полировали алмазной пастой АСМ 2/1 НВОМЛ (ГОСТ 25593–83), после чего протравливали. В качестве травителя использовали раствор: 106 мл ледяной уксусной кислоты; 382 мл HNO_3; 100 мл H_2O, подбор травителя основывался из рекомендаций, приведенных в справочном издании [4] для исследования микроструктуры образцов из жаропрочных сплавов на основе никеля.

Изучение формы и строения усталостных изломов образцов после ТПУ и без него позволило установить, что характер излома имеет определенную закономерность. На образцах, не подвергнувшихся нагреву с последующим быстрым охлаждением, очаг разрушения расположен на поверхности, а зона усталостного разрушения чрезвычайно мала, излом можно отнести к хрупким.

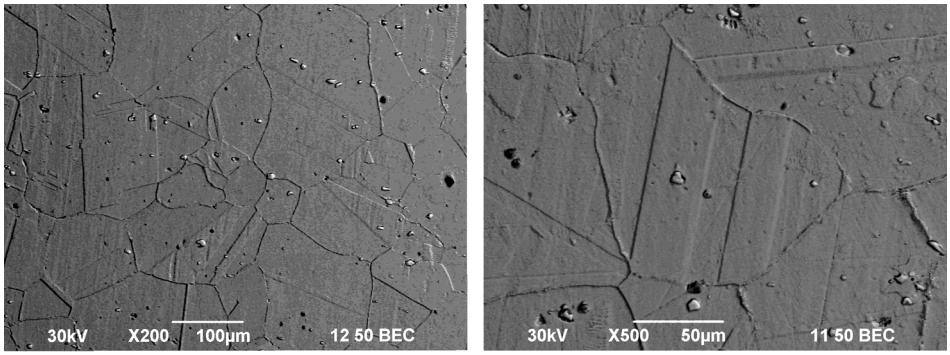
Усталостные изломы образцов, прошедших ТПУ, характеризуются более волокнистым строением, что свойственно для пластичного характера разрушения (рис. 5). Кроме того, в последнем случае заметно смещение очага разрушения под поверхность.

При изучении макроизломов (см. рис. 5) можно заметить, что зона усталостного разрушения у образцов после ТПУ занимает значительно большую площадь, чем у исходных образцов, что свойственно для более пластичных изломов. Это является свидетельством то-



а) *б)*

Рис. 5. Усталостные изломы образцов после ТПУ:
а – ×100; *б* – ×500



а) *б)*

Рис. 6. Микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после ТПУ:
а – ×200; *б* – ×500

го, что образец после зарождения усталостной трещины работал еще довольно длительное время.

Повышение предела выносливости и его относительное возрастание с повышением базы испытаний, наблюдаемое на исследованных образцах из жаропрочных сплавов после ТПУ, связано с определенным механизмом положительного воздействия сжимающих остаточных напряжений и их проявлением в процессе эксплуатации.

На рис. 6 показана микроструктура сплава ХН65ВМТЮ после ТПУ. При ТПУ в микроструктуре сплава ХН65ВМТЮ появляется обогащенная алюминием и титаном интерметаллидная γ'-фаза с когерентной связью с гранецентрированной кубической решеткой. Когерентная связь вызывает дробление блоков твердого раствора, при этом упрочненные образцы из сплава ХН65ВМТЮ имеют малую скорость разупрочнения, которая связана с незначительной диффузионной подвижностью атомов алюминия и титана при высоких температурах вследствие высоких значений сил межатомных связей в решетке γ'-фазы.

Таким образом, при ТПУ проявляется благоприятное влияние двух факторов: сжимающих остаточных напряжений и появления в поверхностном слое структуры с наличием субграниц за счет динамики термоупрочнения. Причем если остаточные напряжения выполняют свою роль прежде всего на первом этапе циклического нагружения, когда вероятность появления микротрещин наибольшая, то по мере релаксации этих напряжений все большее значение приобретает второй фактор, закрепляющийся деформационным старением. Этим обстоятельством можно объяснить наблюдаемое повышение выносливости после наработки, что приводит к значительному увеличению долговечности лопаток и повышению их ресурса.

Выводы

1. Разработана новая конструкция установки для ТПУ лопаток газоперекачивающих агрегатов.

2. Экспериментально установлены оптимальные режимы упрочнения.

3. Представлены результаты исследования остаточных напряжений.

4. Приведены результаты усталостных испытаний образцов из сплава ХН65ВМТЮ.

5. Показаны результаты металлографических исследований усталостных изломов образцов из сплава ХН65ВМТЮ после ТПУ.

6. Изложены результаты исследования микроструктуры сплава ХН65ВМТЮ после ТПУ.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Пат. 101447 РФ,** (51) МПК C 21 D 9/00. Установка для термопластического упрочнения деталей / Карпов А.В., Папчихин С.А. № 2010126356; опубл. 20.01.11, Бюл. № 2.

2. **Кравченко Б.А., Круцило В.Г., Гутман Г.Н.** Термопластическое упрочнение – резерв повышения прочности и надежности деталей машин. Самара: Самарский ГТУ, 2000. 216 с.

3. **Пат. 2143011 РФ,** (51) МПК[6] C 22 F 1/10. Способ повышения циклической прочности деталей газотурбинных двигателей из жаропрочных сплавов на основе никеля / Кравченко Б.А. № 96113810/02; опубл. 20.12.99.

4. **Способы** металлографического травления: справ. изд. / Перевод с нем. М. Беккерт, Х. Клемм. М.: Металлургия, 1988. 400 с.

УДК 621.793.722

Н.Ф. Стручков, Г.Г. Винокуров, А.А. Гаврильева
(Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН, г. Якутск)
E-mail: struchkov_n@rambler.ru

Влияние термической обработки на характеристики поверхности трения покрытий из порошковых проволок с тугоплавкими добавками

Проведены исследования поверхности трения исходного и термообработанного покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками и изучено влияние термической обработки на корреляционные характеристики поверхности трения. Описан процесс изнашивания газотермического покрытия, наблюдается различие ширины борозд по направлению трения. Показано, что термическая обработка газотермических покрытий приводит к общему снижению автокорреляционной функции профиля со снижением и относительной стабилизацией радиуса корреляции профиля поверхности трения, которая отражает среднюю ширину борозд на поверхности трения.

Ключевые слова: *электрометаллизационное покрытие, поверхность трения, автокорреляционная функция, радиус корреляции.*

Researches of a surface of a friction initial and heat-treated coating from a powder wire with refractory additives are conducted and influence heat-treated processings on correlation characteristics of a surface of a friction are studied. On the received photos is described wear process gas-thermal coatings, time-lichie of width of furrows in a friction direction is observed. It is shown that thermal processing of gas-thermal coatings leads to the general decrease in autocorrelation function about-filja with decrease and relative stabilization of radius of correlation of a profile over-nosti a friction which reflects average width of furrows in a friction surface.

Keywords: *electroarc metallization coating, friction surface, autocorrelation function, radius of correlation.*

Введение

Газотермическое нанесение покрытий из порошковых материалов является одним из перспективных методов повышения износостойкости деталей машин и механизмов [1–3]. Как показывает анализ работ, по технико-экономическим показателям технология электродуговой металлизации порошковых проволок наиболее эффективна как способ восстановления изношенных деталей техники в ремонтном производстве.

С целью повышения износостойкости для обеспечения однородности структуры и необходимой прочности сцепления с основой порошковые покрытия подвергают оплавлению различными способами: в термических и индукционных печах, в высокотемпературной газовой струе, электрической дугой, лазерной обработкой и т.д.

Физико-механические свойства упрочняющих фаз при изменении структуры термообработанных покрытий из порошковых проволок существенно влияют на эксплуатационные характеристики обработанной поверхности деталей машин и механизмов. При этом следует выявить, как особенности структуры термообработанного покрытия из порошковой проволоки будут проявляться в процессе изнашивания его поверхности трения.

Цель работы – исследование поверхности трения покрытий из порошковых проволок с тугоплавкими добавками и установление влияния термообработки на корреляционные характеристики поверхности трения.

Методика проведения исследований

Были исследованы поверхности трения исходного и термообработанного покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками Al_2O_3 разработки Института физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН (ИФТПС, г. Якутск) [4, 5].

Покрытия наносили на боковую поверхность дисков для испытаний на износ (диаметр 50 мм, высота 10 мм) с помощью промышленной установки электродуговой металлизации ЭДУ-500С при следующих технологических режимах: сила тока $I = 280$ А, напряжение $U = 38$ В, дистанция напыления $L = 130$ мм.

На основе анализа данных по дополнительной термообработке газотермических покрытий были выбраны режимы термообработки для повышения износостойкости: температура нагрева 840 °С, закалка в масле и низкий отпуск при температуре 250 °С в течение 1 ч.

Металлографические исследования проводили на микроскопе "Neophot-32" и "Axio Observer" (увеличение 100...1000).

Испытания на износ осуществляли на машине трения СМЦ-2, износ определяли весовым методом

по схеме трения диск–колодка; режимы испытаний: нагрузка 735 Н, частота вращения вала 5 об/с, контртело – колодка из закаленной стали ШХ15, сухое трение.

Поверхность трения исследовали с помощью профилометра "Surftest SJ-201P" фирмы Mitutoyo; для измерения профиля поверхности трения на каждом образце были промаркированы четыре диаметрально противоположные участка покрытия. Измеряли поперечный к пути трения профиль поверхности покрытия на каждом из четырех участков с базой 4 мм по 8000 точкам.

Автокорреляционные функции профиля были получены обработкой профилограмм в электронных таблицах Excel с усреднением данных по всей поверхности покрытия.

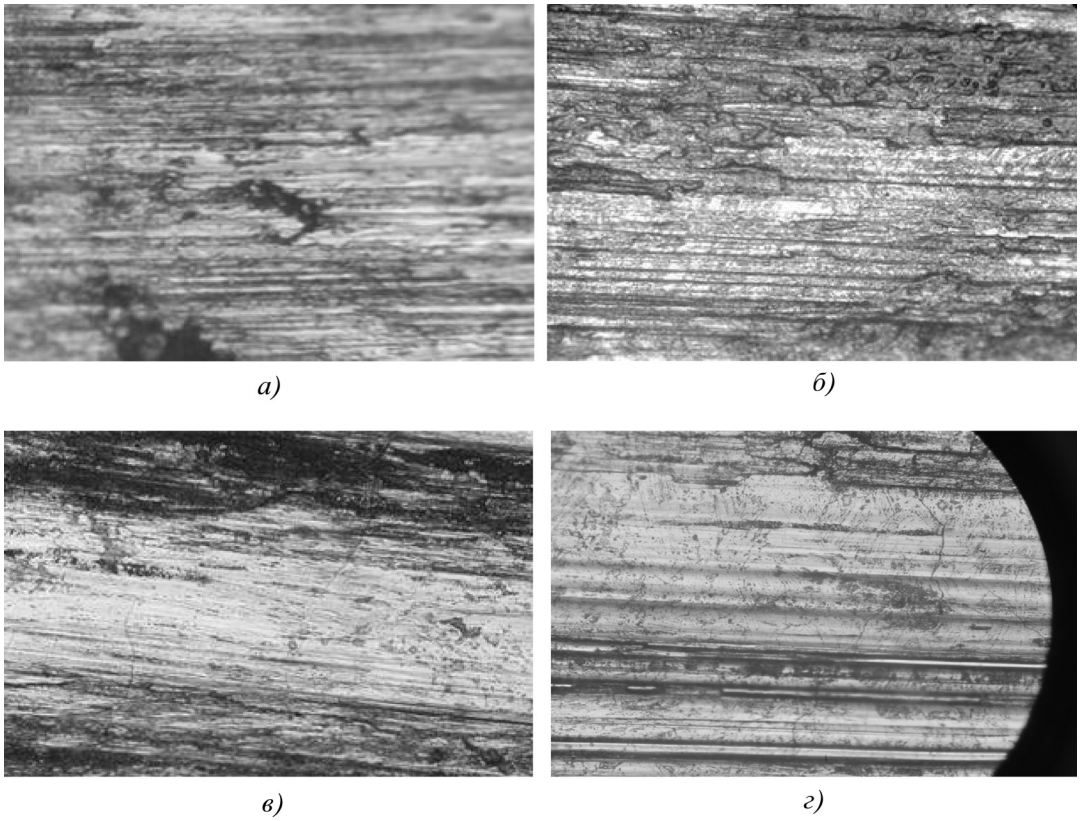
Результаты исследований и их обсуждение

Износ покрытия при трении скольжения происходит под комплексным влиянием различных механизмов разрушения поверхности трения: перенос металла, процесс схватывания, износ со снятием стружки и т.д.

На рис. 1, 2 показаны поверхности трения исходного и термообработанного покрытий из проволоки с тугоплавкими добавками. В исходном состоянии (см. рис. 1, *а*; 2, *а*), т.е. после обработки покрытий шлифовальным материалом, поверхности покрытий характеризуются гребнями различной высоты, наблюдаются некоторые поры и пустоты в виде темных пятен.

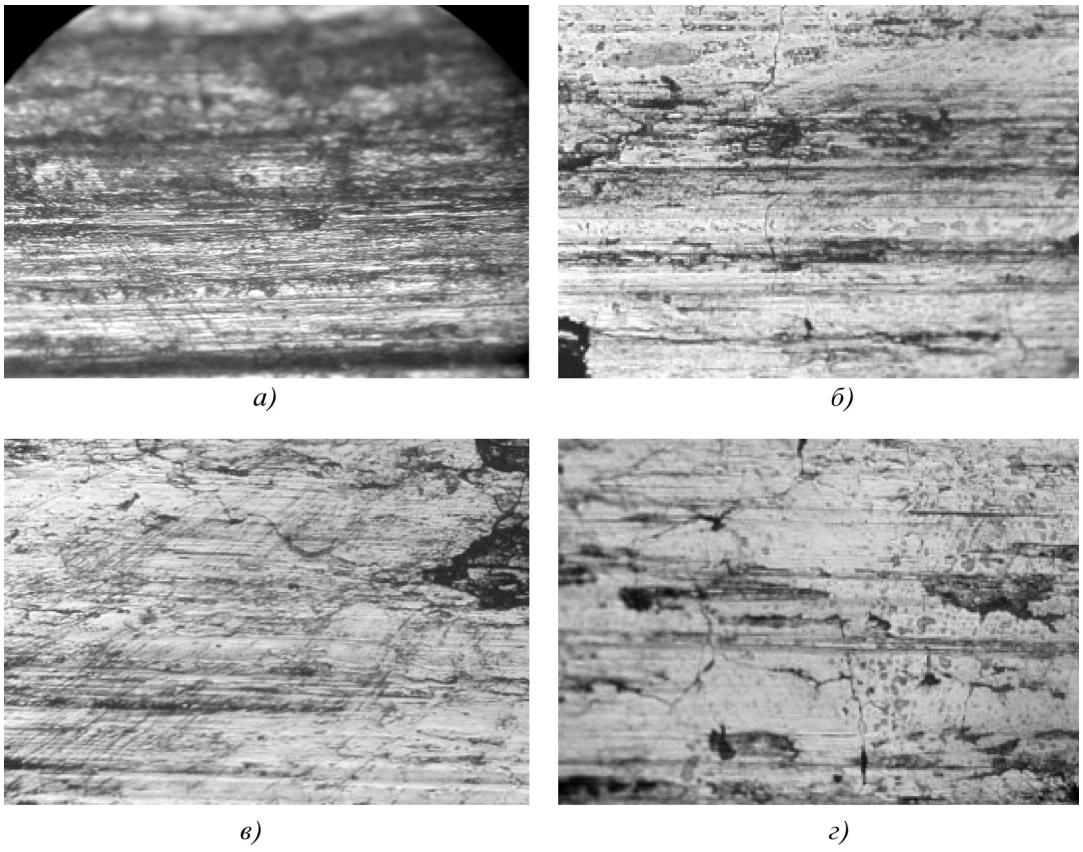
В стадии приработки (до 18 000 циклов) шлифовочные гребни сглаживаются, формируются и увеличиваются площадки контакта в виде дорожек (см. рис. 1, *б*; 2, *б*). Оторвавшиеся частицы покрытия и контртела попадают в зону контакта, вдавливаются и действуют как режущий и абразивный материал, а также заполняют поры и пустоты поверхности трения.

После ≈ 20 000 циклов у исходного и термообработанного покрытий начинается режим установившегося износа, наблюдается более равномерный износ и увеличивается фактическая площадь контакта поверхностей трения покрытия и контртела. При ≈ 54 000 циклах (см. рис. 1, *в*) у исходного покрытия фактическая площадь контакта заметно увеличивается, дорожки трения расширяются за счет изнашивания. Как видно, формируются характерные борозды



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 1. Поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками (×250):
а – исходное состояние; *б* – 18 000 циклов; *в* – 54 000 циклов; *г* – 180 000 циклов



а) *б)* *в)* *г)*

Рис. 2. Поверхности трения термообработанного покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками (×250): *а* – исходное состояние; *б* – 18 000 циклов; *в* – 36 000 циклов; *г* – 54 000 циклов

на поверхности трения, которые сохраняются вплоть до 180 000 циклов; поры и пустоты значительно сокращаются.

При ≈ 180 000 циклах наблюдается стабильный износ, поры и пустоты практически отсутствуют (см. рис. 1, *г*). Поверхность трения покрытия чистая, видны мелкие дорожки с четко выраженным направлением скольжения.

Поверхность трения термообработанного покрытия также имеет мелкие дорожки и с увеличением числа циклов, в отличие от исходного покрытия, не наблюдается значительного расширения дорожки. В целом поверхность трения термообработанного покрытия в режиме установившегося изнашивания относительно ровная.

Таким образом, на этапе установившегося износа покрытия увеличивается фактическая площадь контакта и сокращается количество пор и пустот поверхности трения. Оторвавшиеся частицы порошкового покрытия и контртела на этапе установившегося износа способствуют образованию мелких дорожек по направлению трения.

Как установлено исследованиями, термическая обработка газотермических покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками Al_2O_3 приводит к снижению и стабилизации средней шероховатости поверхности трения на участке приработки. Это сопровождается снижением массового износа термообработанного покрытия из порошковой проволоки в сравнении с исходными покрытиями на стадии приработки до 40...50 %. Изнашивание термообработанных покрытий из стадии приработки плавно, без существенного изменения интенсивности износа, переходит в установившийся режим со снижением массового износа в сравнении с исходными покрытиями на 20...25 % [5].

На рис. 3 (см. с. 3 обложки) приведены графики автокорреляционной функции профиля поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками. Как видно из графиков, автокорреляционная функция профиля монотонно убывает с увеличением расстояния, практически падает до нуля при 100...150 мкм; наблюдаются незначительные колебания функции вблизи нуля по расстоянию и по пути трения.

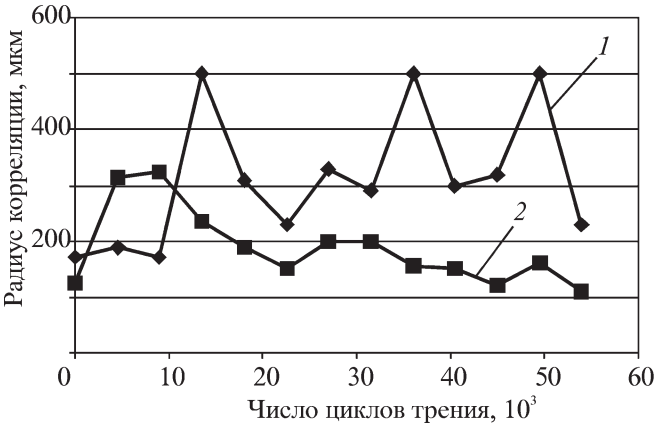


Рис. 4. Радиус корреляции профиля поверхности трения исходного (*1*) и термообработанного (*2*) покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками

Установлено, что термическая обработка газотермических покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками приводит к общему снижению автокорреляционной функции профиля.

При трении скольжения на поверхности покрытий образуются многочисленные продольные борозды, которыми в основном определяется поперечный профиль поверхности трения. Поэтому целесообразным является исследование радиуса корреляции профиля, который характеризует среднюю ширину борозд.

На рис. 4 приведен график радиуса корреляции профиля поверхности трения покрытия из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками. Как видно из графика, радиус корреляции профиля исходного покрытия является существенно нестабильным, его изменение имеет колеблющийся характер.

Установлено, что термическая обработка газотермических покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками приводит к снижению и большей стабильности радиуса корреляции профиля поверхности трения.

Выводы

1. Износ покрытия из порошковой проволоки при трении скольжения происходит под комплексным влиянием различных механизмов разрушения поверхности трения. Показано, что с увеличением циклов трения у поверхности покрытия наблюдается сокращение количества пор и пустот, а также увеличение фактической площади контакта с контртелом. С началом этапа установившегося износа на поверхности трения исходного покрытия формируются характерные борозды, сохраняющиеся вплоть до ≈ 180 000 циклов трения. Поверхность трения термообработанного покрытия на этапе установившегося режима является относительно ровной.

2. Термическая обработка газотермических покрытий из порошковой проволоки с тугоплавкими добавками приводит к общему снижению автокорреляционной функции профиля со снижением и относительной стабилизацией радиуса корреляции профиля поверхности трения. Это обусловлено тем, что после термической обработки происходит уменьшение и стабилизация средней ширины борозд на поверхности трения.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Хасуи А., Моригаки О.** Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.

2. **Кудинов В.В., Пекшев П.Ю.** и др. Нанесение покрытий плазмой. М.: Наука, 1990. 408 с.

3. **Тушинский Л.И., Плохов А.В.** Исследование структуры и физико-механических свойств покрытий. Новосибирск: Наука, 1986. 200 с.

4. **Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф.** и др. Состав, структура и свойства газотермических покрытий из порошковых проволок и их влияние на процессы изнашивания при трении скольжения // Физическая мезомеханика. 2007. № 4. С. 97–105.

5. **Винокуров Г.Г., Стручков Н.Ф.** Влияния термообработки на износостойкость напыленных покрытий из порошковых проволок с тугоплавкими добавками // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 11. С. 21–24.

УДК 621.791.927.55.034

Е.В. Агеев *(Юго-Западный государственный университет, г. Курск)*
E-mail: ageev_ev@mail.ru

Плазменно-порошковая наплавка с применением твердосплавных порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, – перспективный метод реновации деталей автотракторной техники*

Представлены результаты оценки эффективности применения порошков, полученных электроэрозионным диспергированием отходов твердых сплавов, при восстановлении и упрочнении коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания автотракторной техники плазменно-порошковой наплавкой.

Ключевые слова: *отходы твердых сплавов, электроэрозионное диспергирование, порошок, плазменно-порошковая наплавка, свойства плазменных покрытий.*

In the article the results assessment of efficiency of application of powders obtained electroerosive dispersion of scraps of hard alloys are submitted at recovery and hardening crankshaft of engines of internal combustion of autotractor engineering plasma powder overmelting.

Keywords: *scraps of hard alloys, electroerosive dispersion, powder, property of plasma coatings, plasma powder overmelting.*

Организация восстановления изношенных деталей автотракторной техники является важным резервом удовлетворения народного хозяйства запасными частями, а также снижения расходов материальных и трудовых ресурсов. К моменту списания автотракторной техники для повторного использования путем восстановления пригодно 65...75 % деталей.

Применение для восстановления изношенных деталей современных методов нанесения покрытий, и в первую очередь с использованием порошковых твердых сплавов, способствует значительному повышению их долговечности.

Использование порошков, полученных из отходов твердых сплавов, а не промышленно выпускаемых (достаточно дорогих), в качестве высокотвердой и износостойкой дисперсной составляющей композиций, позволит повысить качество, надежность и долговечность покрытий коленчатых валов *двигателей внутреннего сгорания* (ДВС) с минимумом затрат на порошковые материалы.

Промышленные способы получения порошковых материалов из отходов твердых сплавов, такие как окисление–восстановление, цинковый метод имеют ряд недостатков: крупнотоннажность, энергоемкость, большие производственные площади, а также экологические проблемы (сточные воды, вредные выбросы). Более перспективным методом получения порошковых материалов из отходов твердых сплавов, отличающийся относительно невысокими энергетическими затратами и экологической чистотой процесса, является метод *электроэрозионного диспергирования* (ЭЭД) [1], представляющий собой разрушение любого токопроводящего материала в результате локального воздействия кратковременных электрических разрядов между электродами.

На разработанной автором экспериментальной установке [2–4] методом ЭЭД были получены порошки из отходов твердых сплавов марок ВК8 и Т15К6 с размером частиц 0,1...50 мкм. Были исследованы их физико-технологические свойства, которые, как показали результаты исследований, мало отличаются от свойств промышленно выпускаемых порошков, а по некоторым параметрам превосходят их и значительно дешевле [5, 6].

* Работа выполнена в рамках реализации Федеральной целевой программы "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг.

а)

б)

Рис. 1. Двигатель СМД-18 (*а*) и коленчатый вал двигателя СМД-18 (*б*)

Проведенные исследования позволили наметить перспективные направления применения порошков, полученных методом ЭЭД из отходов твердых сплавов, а именно:

– *плазменно-порошковая наплавка* (ППН);
– наплавка под слоем флюса;
– наплавка в среде защитных газов;
– гальваническое нанесение покрытий (железнение, хромирование, никелирование);
– детонационное напыление;
– плазменное напыление;
– добавки при изготовлении пластин спеченных твердых сплавов и др.

Цель работы – оценка эффективности применения порошков, полученных ЭЭД из отходов твердых сплавов, при восстановлении и упрочнении коленчатых валов ДВС автотракторной техники ППН.

За объект промышленного опробования технологии плазменной твердосплавной порошковой наплавки был принят коленчатый вал двигателя марки СМД-18, устанавливаемый на тракторы ДТ-75, комбайны "Нива" и другую сельскохозяйственную технику (рис. 1).

Коленчатый вал – одна из наиболее ответственных, дорогостоящих, а также сложных в изготовлении и ремонте деталей двигателя. Причем стоимость нового вала в 4–6 раз выше стоимости восстановленного. Особенно ощутима эта разница для коленчатых валов двигателей автотракторной техники импортного производства, доля которых в общем объеме машино-тракторного парка нашей страны с каждым годом неуклонно возрастает.

Процесс постепенного изменения размеров, т.е. изнашивание трущихся поверхностей коленчатого вала ДВС, является нежелательным, но неизбежным. Причем основным видом изнашивания коленчатого вала является абразивное, которое получается в результате режущего и царапающего действий посторонних частиц.

На сегодняшний день коленчатые валы ДВС успешно ремонтируются в пределах своих ремонтных размеров путем шлифования. Но стоит размерам вала выйти из ремонтных, как появляются трудности с наращиванием и упрочнением поверхностей.

При постановке экспериментов по восстановлению изношенных шеек коленчатых валов двигателя СМД-18 в условиях ремонтного предприятия ОАО "Краснополянская сельхозтехника" (г. Курск) с использованием твердосплавных порошков применяли установку для наплавки УД-209 на основе переделанного токарного станка, выпрямитель сварочный ВДУ-506, представленные на рис. 2.

При этом использовали технологию плазменной твердосплавной порошковой наплавки для шеек коленчатых валов СМД-18, вышедших из последних ремонтных размеров, представленную в табл. 1–3.

В качестве плазмообразующего, транспортирующего и защитного газа применяли аргон (ГОСТ 10157–79). В качестве порошкового наплавочного материала использовали промышленную смесь композиции порошков производства Тульского завода "Полема" (7 объемов ПЖ-Н4Д2М + 2 объема ПР-Х11Н11ГЮСР + 1 объем ПР-Г4СР), изготовленных по ТУ 14-22-26–90 с различной массовой долей порошков, полученных ЭЭД отходов твердых сплавов ВК8 и Т15К6 в дистиллированной воде и керосине.

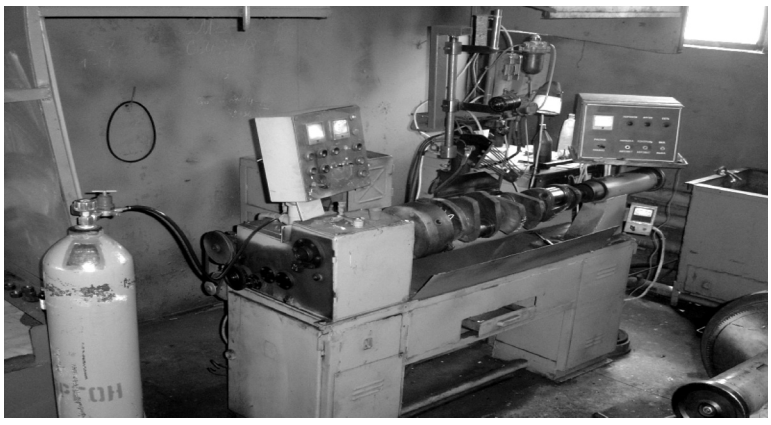


Рис. 2. Установка для ППН

Таблица 1

Технологический процесс восстановления коленчатых валов двигателя СМД-18 плазменной твердосплавной порошковой наплавкой

Номер операции	Наименование операции	Оборудование и приспособление	Инструменты и материалы
005	Моечная	Установка для мойки коленчатых валов МД-2	МС-6; МС-8; ЛАБОМИД-102; ветошь обтирочная (ГОСТ 5354–79)
010	Дефектовочная	Стол дефектовщика ПМД-70	Суспензия (ТУ 6-14-1009–74); индикатор ИЧ10 кл. (ГОСТ 577–68); микрометры (ГОСТ 4381–80); МК 50-75
015	Шлифовальная	Станок круглошлифовальный 3А423	Круг шлифовальный ПП 90-50-305
020	Контрольная	Стол дефектовщика ПМД-70	Микрометр МК 75-100 (ГОСТ 4381–80)
025	Термическая	Электропечь камерная СН 36×12×4/10Н/	–
030	Слесарная	Молоток слесарный (ГОСТ 2310–77)	Графитовый стержень 3908-0092 (ГОСТ 6070–80) или асбестоцементная смесь, уайт-спирит 50 г (ГОСТ 3134–78)
035	Наплавочная	Установка для ППН УД-209, выпрямитель сварочный ВДУ-506	Вольфрамовый стержень, порошковые материалы (ТУ 14-22-26–90: ФМИ1 (ПР-Г4СР); ФМИ3 (ПР-Х11Н11ГЮСР); ПЖ-Н4Д2М)
040	Контрольная	Стол дефектовщика ПМД-70	Суспензия (ТУ 6-14-1009–74), индикатор ИЧ10 кл. (ГОСТ 577–68); МК 75-100 (ГОСТ 4381–80)
045	Транспортная	Кран-балка	–
050	Шлифовальная	Станок круглошлифовальный 3А423	ПП-90-32-305 92А40СМ7К5 кл2 (ГОСТ 2424–83)
055	Контрольная	Стол дефектовщика ПМД-70	Индикатор ИЧ10 кл. (ГОСТ 577–68); микрометр МК 50-75
060	Шлифовальная	Станок круглошлифовальный ЗА 423	ПП-90-32-305 92А40СМ7К5 кл2 (ГОСТ 2424–83); карандаш 3908-0092 (ГОСТ 6070–80)
065	Контрольная	Стол дефектовщика ПМД-70	Микрометры по ГОСТ 4381–80; МК 50-75
070	Слесарная	Приспособление для накатки галтелей, шлифования, зенкерования	Сверло твердосплавное ∅ = 7 мм (ГОСТ 6647–86); зенковка коническая ∅ = 10 мм (ГОСТ 14953–79)
075	Транспортная	Кран-балка	–
080	Полировальная	Приспособление для полирования	Паста ГОИ
085	Контрольная	Стол дефектовщика ПМД-70	Микрометры (ГОСТ 4381–80); МК 50-75; МК 75-100
090	Слесарная	Стол слесарный	Ветошь, компрессор
095	Консервация	–	Консервант
100	Транспортная	Кран-балка	–

На изношенные шейки коленчатого вала, подлежащие восстановлению методом ППН, накладывается ряд требований:

1. Коленчатые валы с кольцевыми трещинами, продольными трещинами в виде волосовин, трещинами, выходящими на галтели, подлежат выбраковке.

2. На восстановление плазменной наплавкой принимаются валы с биением по средней шейке не более 0,5 мм.

3. Повторное восстановление плазменной наплавкой допускается после шлифовки до основного материала.

Таблица 2

Порядок операций наплавочных работ по коленчатому валу СМД-18

Номер операции	Наименование операции	Оборудование и приспособление	Инструменты и материалы
1	Зачистить коренную шейку до металлического блеска	Верстак слесарный	Щетка металлическая, шкурка шлифовальная
2	Заглушить отверстия масленых каналов, зачистить поверхность		Асбестоцементная смесь, молоток слесарный, шкурка шлифовальная
3	Подогреть коренную шейку до 200 °С плазменной дугой без подачи порошка	Установка для ППН УД-209, выпрямитель сварочный ВДУ-506	Аргон (ГОСТ 10157–79); магистральная вода (ГОСТ 2844–82)
4	Наплавить коренную шейку		Аргон (ГОСТ 10157–79); магистральная вода (ГОСТ 2844–82); порошковые материалы (ТУ 14-22-26–90) с добавкой твердосплавного порошка
П р и м е ч а н и е. Порядок операций наплавочных работ по шатунным шейкам коленчатого вала такой же, как и для коренных шеек.			

Таблица 3

Режимы плазменной твердосплавной порошковой наплавки шеек коленчатого вала СМД-18

Шейка	Диаметр шейки, мм		Число оборотов детали, об/мин	Подача плазмотрона, мм/об	Сила тока, А		Длина наплавки, мм					Основное время предварительного подогрева и наплавки, мин					
	До наплавки	После наплавки			Предварительного прогрева	Наплавочного	Номер шейки					Номер шейки					
							1	2	3	4	5	1	2	3	4	5	Всего
Коренная	90,5	95,5	2	2,8	110...120	220...240	56,6	30	48	30	53	22,2	12,8	19,2	12,8	21	88,0
Шатунная	76,5	81,5	2,8	3,1			38	38	38	38	–	10,8	10,8	10,8	10,8	–	43,2

4. Не допускается наличия трещин на поверхностях восстановленного вала.

При анализе свойств плазменных покрытий, полученных с добавлением твердосплавного порошка, установлено следующее:

1. Твердость плазменных покрытий, полученных с добавлением твердосплавных порошков ВК8 и Т15К6 к промышленной композиции, выше твердости плазменных покрытий, полученных с использованием только промышленной композиции, и характер ее изменения зависит от физико-технологических свойств полученного порошка (рис. 3).

Твердость практически всех плазменных покрытий, полученных с добавлением диспергированных порошков ВК8 и Т15К6 в качестве подшихтовки к промышленным порошкам, выше исходной твердости, полученной с использованием только промышленных порошков (48 HRC).

Анализ полученных зависимостей показал, что на характер изменения твердости наплавленных поверхностей существенное влияние оказывает среда получения порошка, от которой зависят его физико-технологические свойства.

Характер поведения зависимости твердости от количества порошка одинаков при добавлении порошков, полученных в одних и тех же средах. Так, твердость покрытий, полученных с добавлением порошков ВК8 и Т15К6, диспергируемых в керосине, резко возрастает до их концентрации около 10 %, затем плавно снижается до концентрации 20 %, поскольку растворимость углерода также снижается и увеличивается количество несвязанного углерода, т.е. мелко-

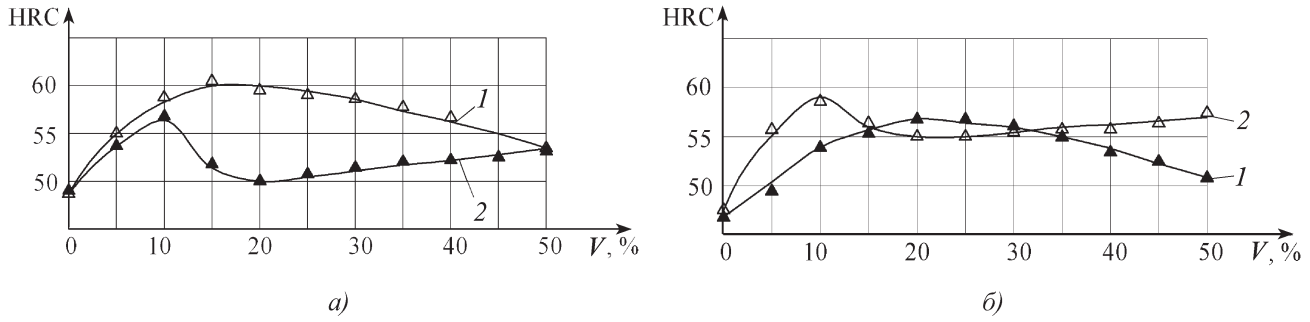


Рис. 3. Зависимости твердости наплавленного слоя от массовой доли в промышленной композиции порошка, полученного в воде (*1*) и керосине (*2*):
а – ВК8; *б* – Т15К6

дисперсной сажи. При дальнейшем увеличении количества данного порошка твердость незначительно возрастает из-за увеличения концентрации в порошках фазы W_2C.

Порошки, полученные методом ЭЭД в воде, оказывают иное влияние на твердость наплавленного слоя: с увеличением содержания порошка в основной шихте от 10 до 20 % твердость увеличивается, далее следует ее постепенный спад. Данный эффект объясняется изменением глубины проплавления подложки и, следовательно, изменением доли основного металла в наплавочном и увеличением фазы W.

2. Отличительной особенностью практически всех плазменных покрытий, полученных с добавлением твердосплавного порошка, является распределение элементов состава покрытия по его глубине, что наглядно подтверждают кривые распределения микротвердости, представленные на рис. 4 и 5. Причем максимум микротвердости всех плазменных покрытий приходится на глубину 0,5 мм.

Измерение микротвердости наплавленного слоя осуществляли на микрошлифах с использованием прибора ПМТ-3. Предварительно на установке для электроэрозионной резки от наплавленного вала были вырезаны сегменты и зажаты в струбцины. Далее проводили полировку образцов с использованием алмазных паст по стандартной методике. Нагрузка на индентор – 1 кН, время пребывания под нагрузкой – 10 с.

Микротвердость зерен практически всех плазменных покрытий, полученных с добавлением дисперги-

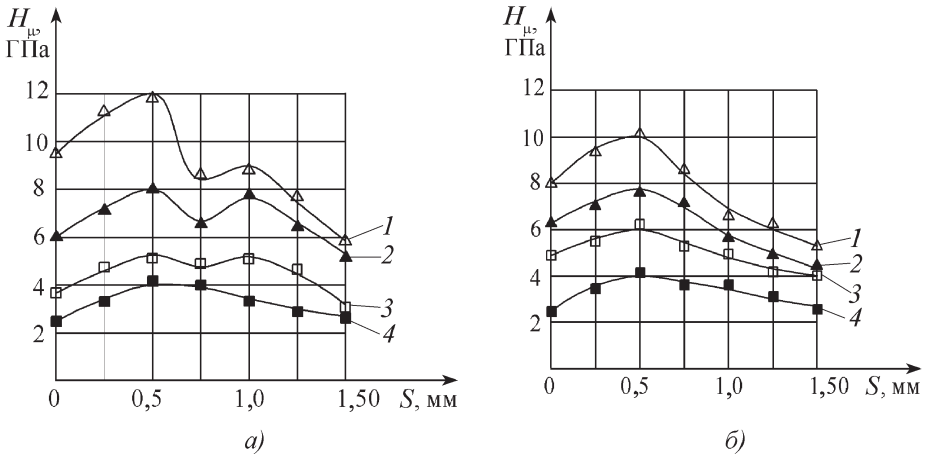


Рис. 4. Распределение микротвердости по глубине плазменного покрытия, полученного с использованием порошка Т15К6:
а – в воде; *б* – в керосине; *1* – 10 %; *2* – 20 %; *3* – 50 %; *4* – промышленный порошок

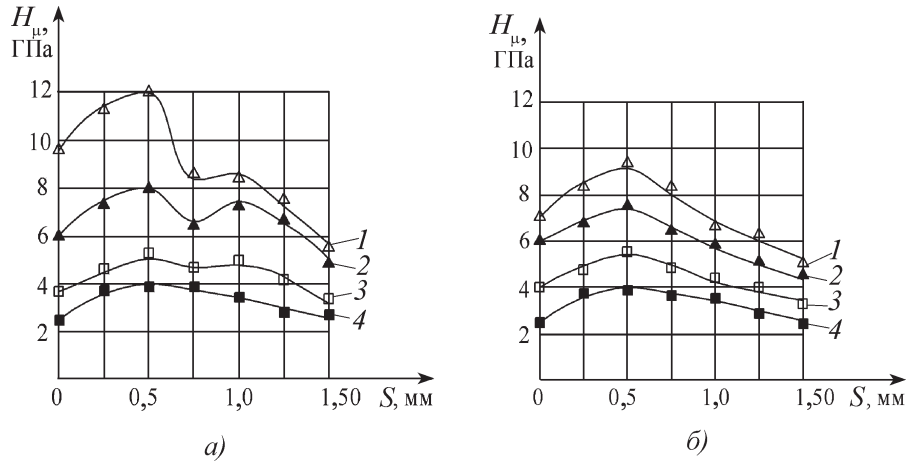


Рис. 5. Распределение микротвердости по глубине плазменного покрытия, полученного с использованием порошка ВК8:
а – в воде; *б* – в керосине; *1* – 10 %; *2* – 20 %; *3* – 50 %; *4* – промышленный порошок

рованных порошков ВК8 и Т15К6 в качестве добавки к промышленным порошкам, выше микротвердости зерен, полученной с использованием только промышленных порошков.

Анализ полученных зависимостей показал, что на характер изменения микротвердости наплавленных поверхностей существенное влияние оказывает количество порошка, добавленного к исходной композиции. Практически для всех покрытий, полученных с добавлением диспергированных порошков, максимум микротвердости приходится на 10 %-ную концентрацию. Дальнейшее увеличение количества диспергируемого порошка в исходной композиции приводит к некоторому снижению микротвердости, но все же остающейся выше, чем микротвердость, полученная при использовании только промышленных порошков (см. рис. 4, кривая *4*).

Установлено также, что на характер изменения микротвердости оказывает влияние среда получения порошка, от которой зависят его физико-технологические свойства. Плазменные покрытия, полученные с использованием порошков ВК8 и Т15К6, диспергируемых в воде, имеют местное снижение микротвердости на глубине 0,75 мм от поверхности покрытия.

Максимум микротвердости практически во всех покрытиях и при различных концентрациях твердосплавных порошков приходится на глубину примерно 0,5 мм от поверхности покрытия. Этот эффект, по-видимому, зависит от ликвации элементов в покрытии и особенности процессов кристаллизации при нанесении покрытий методом ППН и связан именно с добавкой порошков, полученных как из ВК8, так и из Т15К6. Причем наиболее выражен этот эффект на покрытиях, где добавка была из порошка, полученного диспергированием твердых сплавов в воде.

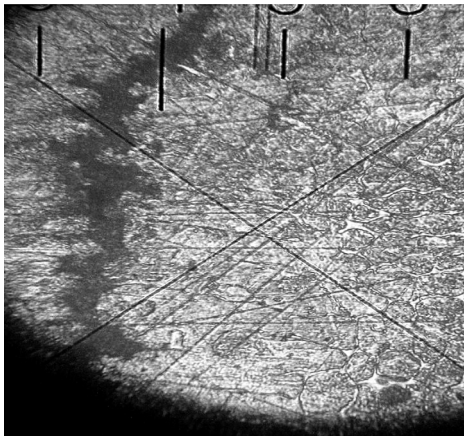


Рис. 6. Микроструктура покрытия, полученного с использованием твердосплавных порошков, полученных в керосине (×550)

Также отмечено, что такое поведение микротвердости зависит от количества твердосплавного порошка, поскольку снижение общей микротвердости связано с увеличением количества свободного углерода и фазы W. Эффект наиболее выражен при небольших концентрациях твердосплавного порошка (до 10 %). Это позволяет получать значительный рост твердости при относительно небольших добавках порошков.

Управление замеченным эффектом при наплавке позволит формировать покрытие с учетом припуска на механическую обработку с таким расчетом, чтобы максимальная микротвердость покрытия оставалась на обработанной детали, что обеспечит высокую износостойкость сопрягаемых поверхностей.

3. Для выявления свободного углерода и размера зерен в структуре плазменных покрытий, полученных на коленчатых валах ППН с использованием диспергированных порошков, были выполнены микрошлифы по стандартной методике. Травление поверхности сплавов проводили реактивом на основе смеси соляной, серной и азотной кислот (92 мл HCl, 3 мл H_2SO_4, 5 мл HNO_3).

Анализ микроструктур плазменных покрытий показал, что использование твердосплавных порошков, полученных в керосине, приводит к образованию трещин у поверхности покрытий (рис. 6), что связано с присутствием в них относительно большого количества свободного углерода, составляющего в ВК8 2,13 %, а в Т15К6 6,21 %. Но данный дефект устраним на последующей за наплавкой механической обработке, связанной со снятием слоя припуска (шлифование в ремонтный размер) [7].

В работах [8, 9] также отмечено увеличение дисперсности матрицы при введении в состав присадочного материала при ППН титана или карбида титана. Эффект измельчения структуры закристаллизовавшейся наплавочной ванны объясняется увеличением числа зародышей на дисперсных частицах карбидов вольфрама и титана.

4. Относительная износостойкость плазменных покрытий после добавления в промышленную композицию твердосплавных порошков возрастает (рис. 7), причем с ВК в большей степени, чем с ТК, поскольку в порошке, полученном из Т15К6, количество свободного углерода значительно больше, чем в ВК8. Также установлено, что добавление твердосплавного порошка, полученного в воде, дает больший прирост относительной износостойкости, чем твердосплавными порошками, диспергированными в керосине, что связано с различными значениями их физико-технологических свойств и наличием свободного углерода в виде мелкодисперсной сажи в последнем случае. Характер изменения относительной

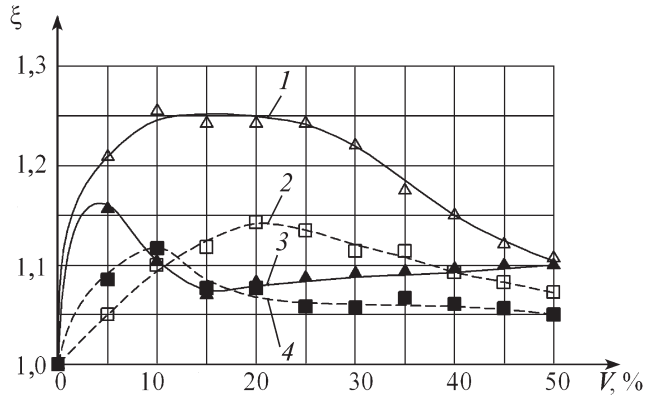


Рис. 7. Зависимости относительной износостойкости плазменных покрытий от количества порошка (по массе):
1 – ВК8 (диспергированный в воде); *2* – Т15К6 (в воде); *3* – ВК8 (в керосине); *4* – Т15К6 (в керосине)

износостойкости плазменных покрытий в основном коррелирует с характером изменения их твердости.

Испытания на абразивную износостойкость плазменных покрытий проводили в соответствии с ГОСТ 23.208–79 "Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежестко закрепленные абразивные частицы". Сущность используемого метода состоит в том, что при одинаковых условиях производится трение (изнашивание) образцов исследуемого и эталонного покрытий об абразивные частицы, подаваемые в зону трения и прижимаемые к образцу вращающимся роликом. После этого измеряется износ образцов исследуемого и эталонного покрытий, а износостойкость испытуемого материала оценивается путем сравнения его с износом эталонного покрытия.

5. В процессе нанесения плазменных покрытий ППН с добавлением к промышленной композиции твердосплавных порошков было отмечено изменение геометрических параметров покрытий при изменении состава композиции. Для выявления этого эффекта были наплавлены одиночные валики ППН с добавлением твердосплавных порошков. Основными геометрическими параметрами наплавленных валиков являются высота и ширина наплавочного валика, а также глубина проплавления.

Изучение геометрических параметров наплавочных валиков показало, что на их размеры оказывает влияние состав порошковой композиции и массовая доля твердосплавного порошка. Причем существует определенная связь, характерная для всех композиций, между высотой наплавочного валика и глубиной проплавления. При увеличении высоты валика глубина проплавления уменьшается и наоборот, что связано с распределением теплоты наплавочной ванны.

При добавлении твердосплавных порошков, полученных в керосине, глубина проплавления возрастает, а высота валика снижается, поскольку увеличение количества углерода способствует увеличению жидкой фазы. Отмечено, что наилучшими геометрическими параметрами, с точки зрения последующей за наплавкой механической обработки, обладают валики, полученные с добавлением порошков ВК8.

6. Анализ твердости, износостойкости и геометрических показателей плазменных покрытий показал, что покрытия, полученные с добавлением порошков из ВК8, являются наиболее приемлемым вариантом для восстановления и упрочнения коленчатых валов ДВС. Основными служебными свойствами плазменных покрытий коленчатых валов, определяющими их ресурс, являются твердость и износостойкость, которые, как показали результаты экспериментов, коррелируют между собой.

Из перечисленных свойств наиболее просто и достоверно определяется твердость. Поэтому оптимизацию состава порошков для улучшения качества плазменных покрытий коленчатых валов методом ППН проводили по твердости покрытий, полученных с использованием порошков ВК8.

Для достижения максимальной твердости плазменных покрытий необходимо проведение полного факторного эксперимента, для постановки которого были выбраны уровни и интервалы варьирования факторов. В результате был определен оптимальный состав порошков для ППН коленчатых валов ДВС с добавлением порошка сплава ВК8, полученного методом ЭЭД в дистиллированной воде.

Таким образом, проведенные исследования и апробация технологии ППН с добавлением твердосплавных порошков в условиях ремонтного предприятия ОАО "Краснополянская сельхозтехника" (г. Курск) подтвердили эффективность применения порошков, полученных методом ЭЭД из твердых сплавов марок ВК8 и Т16К6, при восстановлении и упрочнении коленчатых валов ДВС СМД-18 с повышением их ресурса в среднем на 20 %. Восстановленные коленчатые валы эксплуатируются до настоящего времени. Отказов ДВС по причине выхода их из строя не происходило.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Агеев Е.В., Семенихин Б.А.** Выбор метода получения порошковых материалов из отходов спеченных твердых сплавов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Спец. вып.: Актуальные проблемы машиностроения. С. 12–15.

2. **Агеев Е.В., Семенихин Б.А.** Выбор оборудования для получения порошковых материалов методом электроэрозионного диспергирования // Материалы и технологии XXI

века: сб. ст. VII Междунар. науч.-техн. конф. Пенза: Приволжский дом знаний, 2009. С. 142–146.

3. **Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А.** Разработка генератора импульсов установки электроэрозионного диспергирования // Информационно-измерительные, диагностические и управляющие системы. Диагностика–2009: сб. материалов Междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х ч. Ч. 2. Курск. 2009. С. 144–147.

4. **Агеев Е.В.** и др. Разработка установки для получения порошков из токопроводящих материалов // Известия Самарского научного центра РАН. 2009. Т. 11 (31). № 5 (2). С. 234–237.

5. **Агеев Е.В., Сальков М.Е.** Особенности технологии получения порошковых наплавочных материалов методом электроэрозионного диспергирования отходов твердых сплавов для наплавки шеек коленчатых валов // Технология металлов. 2008. № 5. С. 34–37.

6. **Агеев Е.В., Агеева Е.В.** Исследование химического состава порошков, полученных из отходов твердых сплавов методом электроэрозионного диспергирования // Современные инструментальные системы, информационные технологии и инновации: материалы IV Междунар. науч.-техн. конф. Курск, 2006. Ч. 2. С. 146–150.

7. **Агеев Е.В., Семенихин Б.А., Латыпов Р.А.** Исследование микроструктуры плазменных покрытий, полученных с добавлением порошков отходов твердых сплавов // Славяновские чтения (Сварка–XXI век): Междунар. науч.-техн. конф.: в 2-х кн. Кн. 2. Липецк: ЛГТУ, 2009. С. 56–64.

8. **Белый А.И., Жудра А.П., Дзыкович В.И.** Влияние легирующих элементов на структуру композиционного сплава на основе карбидов вольфрама // Автоматическая сварка. 2002. № 11. С. 18–20.

9. **Полев И.В.** Формирование структуры и абразивная износостойкость композиционных материалов и наплавленных покрытий карбид титана–высокохромистый чугун: автореф. ... канд. техн. наук. Томск, 2005. 19 с.

УДК 539.234

А.Л. Каменева, Д.М. Караваев
(Пермский национальный исследовательский политехнический университет),
Т.О. Сошина *(Лысьвенский филиал ФГБОУ ВПО "Пермский национальный исследовательский политехнический университет", г. Лысьва)*
E-mail: kameneva@pstu.ru

Улучшение износостойких и антифрикционных свойств пленок на основе TiN путем оптимизации технологии их формирования методом магнетронного распыления

Установлены закономерности изменения износостойких и антифрикционных свойств и изнашивающей способности пленок на основе TiN в процессе магнетронного распыления под влиянием технологических условий их формирования. Получены зависимости указанных параметров, позволяющие прогнозировать свойства антифрикционных и износостойких пленок, оптимизировать процесс получения и максимально увеличить их эффективность.

Ключевые слова: *технологические условия формирования, антифрикционные и износостойкие пленки на основе TiN, магнетронное распыление, трибологические испытания пленок, оптимальный интервал технологических параметров.*

The regularities of the change of wear and antifriction properties and wear ability of TiN-based films during magnetron sputtering under the influence of technological conditions of their formation have been investigated. Diagrams of dependence of these parameters to optimize the process of obtaining and predict the properties of the antifriction and wear resistant films, to maximize their effectiveness were received.

Keywords: *technological conditions of formation, anti-friction and wear resistant films based on TiN, magnetron sputtering, tribological tests of films, optimal range of process parameters.*

Введение

В условиях современного уровня развития техники промышленное применение тонкопленочных покрытий (пленок) на основе TiN для повышения износостойкости *режущего инструмента* (РИ) и *пар трения* (ПТ) ограничено их невысокими *износостойкими и антифрикционными свойствами* (ИАС), характеризующимися коэффициентом и моментом трения, интенсивностью износа по массе и объему, изнашивающей способностью и т.д.

Известно, что работоспособность пленок, в частности ионно-плазменных поликристаллических, характеризуется как параметрами их структуры, преимущественным направлением кристаллографической ориентации, фазовым составом, так и *технологическими*

параметрами (ТП) процесса их осаждения, поэтому актуальной является задача изучения влияния ТП и структурных характеристик пленок на их ИАС.

Цель работы – установление закономерностей влияния ТП, структурного и дефектного состояний пленок на основе TiN, формируемых *магнетронным распылением* (МР), на их свойства; оптимизация технологического процесса и получение нанокристаллических пленок с уникальным комплексом ИАС.

Методика проведения исследований

Пленки на основе TiN на тестовых образцах из стали Ст3 и сплава ВК8 получали МР одной мишени из титана марки ВТ1-00 при варьировании одного из основных ТП: мощности магнетронного разряда N, напряжения смещения на подложке $U_{см}$, давления газовой смеси p, содержания азота в газовой смеси N_2, расстояния мишень–подложка L после ионной очистки-нагрева поверхности и осаждения подслоя из Ti.

Микротвердость композиции пленка–подложка $H_\mu^к$ после технологического процесса осаждения пленки измеряли с использованием микротвердомера ПМТ-3. ИАС: коэффициент f и момент $M_{тр}$ трения, массовый износ Δm, приведенный износ по массе $I_п^m$ и объему $I_п^V$; изнашивающую способность пленки: диаметр пятна износа контртела $d_п$, приведенный износ контртела по объему $I_к^V$ и скорость износа контртела $v^к$ определяли в соответствии с методиками работ [1, 2]. В частности, $v^к$ определяли через отношение среднего диаметра пятна износа контртела $d_п$ к продолжительности испытания 740 с. Дефектность поверхности сформированных пленок исследовали на автоэмиссионном электронном микроскопе "Ultra 55". Оптимальные ТП процесса МР пленок TiN оценивали по оптимальному комплексу ИАС пленки, структурному и дефектному состоянию пленок.

Результаты исследований и их обсуждение

Микротвердости $H_\mu^к$, ИАС, изнашивающую способность пленок на основе TiN и закономерности их изменения в зависимости от ТП процесса МР приведены в таблице и на рисунке.

Результаты трибологических испытаний показали, что на ИАС пленок непосредственное влияние оказывает их микротвердость $H_\mu^к$, которая, в свою очередь, зависит от технологических условий формирования. Максимальное значение $H_\mu^к$ соответствует пленке, сформированной при оптимальном сочетании ТП: p = 1,0 Па; L = 100 мм; N = 2,54 кВт; $U_{см}$ = 80 В; N_2 = 35 %. Резкое уменьшение $H_\mu^к$ и ухудшение ИАС пленки происходит при отклонении ТП от их оптимальных значений: N > 2,54 кВт; L > 100 мм; N_2 > 35 %; p > 1,0 Па; $U_{см}$ < 80 В.

Результаты морфологических исследований поверхности пленок на основе TiN, сформированных МР, показали, что ИАС и изнашивающая способность пленок определяются не только микротвердостью пленки, но и структурным, а также дефектным состоянием ее поверхности.

Нанокристаллическая пленка с минимальным размером кристаллитов, равномерно-зернистой поверхностной структурой с равноосными зернами, минимальной дефектностью и шероховатостью, формируемая при оптимальном сочетании ТП, обладает уникальным комплексом ИАС: f = 0,05; $M_{тр}$ = 0,06 Н·м; Δm = 0,05 мг; $I_п^m = 0{,}06 \cdot 10^{-5}$ мг·Н$^{-1}$·м$^{-1}$ и $I_п^V \approx 0$ мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$ и минимальной изнашивающей способностью: $d_п$ = 0,52 мм; $V^к = 0{,}70 \cdot 10^{-3}$ мм·с$^{-1}$; $I_к^V = 0{,}61 \cdot 10^{-8}$ мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$.

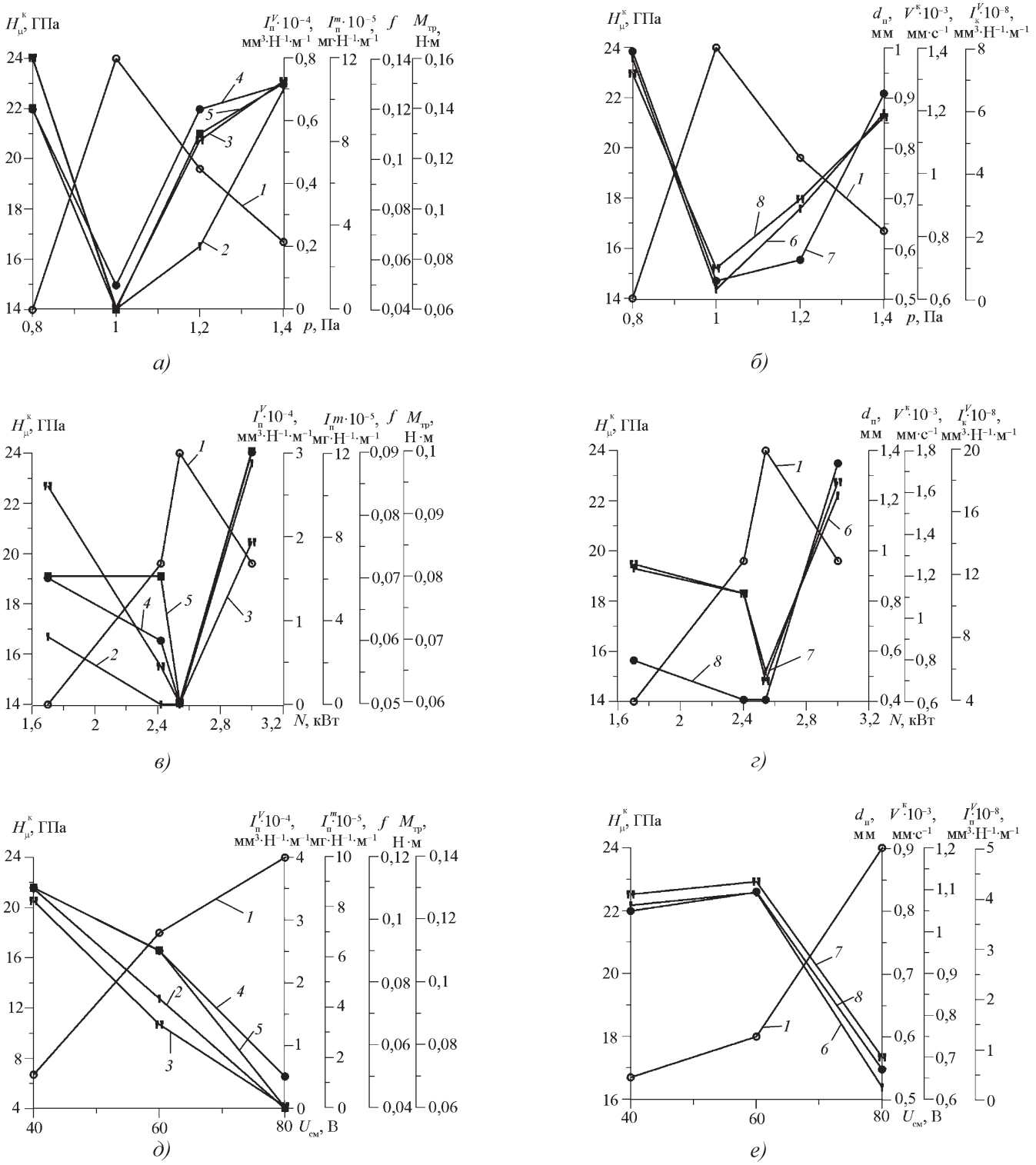
В узком диапазоне ТП (2,42 < N < 2,54 кВт; 100 < L < 140 мм; 35 < N_2 < 40 %; 1,0 < p < 1,2 Па; 60 < $U_{см}$ < 80 В) формируется поликристаллическая пленка с плотной столбчатой подструктурой, мелкозернистой поверхностной структурой, относительно невысокой дефектностью и шероховатостью, удовлетворительным сочетанием ИАС пленки: $H_\mu^к$ = 14,0...19,6 ГПа; f = 0,08...0,12; $M_{тр}$ = = 0,11...0,13 Н·м; Δm = 1,6...7,52 мг; $I_п^m$ = = (1,83...9,36)·10^{-5} мг·Н$^{-1}$·м$^{-1}$ и $I_п^V$ = 0,20...3,15 мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$, но с увеличенным износом контртела: $d_п$ = = 0,68...1,15 мм; $V^к$ = (0,92...1,55)·10^{-3} мм·с$^{-1}$, особенно приведенного износа контртела по объему $I_к^V$ = (1,29...7,45)·10^{-8} мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$.

Значительное увеличение/уменьшение ТП относительно их оптимальных значений приводит к увеличению дефектности и шероховатости формируемых пленок, значительному ухудшению ИАС и увеличению износа контртела.

Заключение

Установлены закономерности изменения ИАС и изнашивающей способности пленок на основе TiN, формируемых МР, в зависимости от технологических условий формирования, структурного и дефектного состояний поверхности пленок.

Оптимизирован технологический процесс и получены нанокристаллические пленки с уникальным комплексом износостойких и антифрикционных свойств: f = 0,05; $M_{тр}$ = 0,06 Н·м; Δm = 0,05 мг;



Зависимости трибологических свойств пленок на основе TiN от ТП МР:

а, *б* – давления газовой смеси; *в*, *г* – мощности магнетронного разряда; *д*, *е* – напряжения смещения на подложке; *ж*, *з* – расстояния мишень–подложка; *и*, *к* – содержания азота в газовой смеси; *1* – $H_\mu^к$; *2* – $I_п^V$; *3* – $I_п^m$; *4* – f; *5* – $M_{тр}$; *6* – $d_п$; *7* – $v_к$; *8* – $I_к^V$

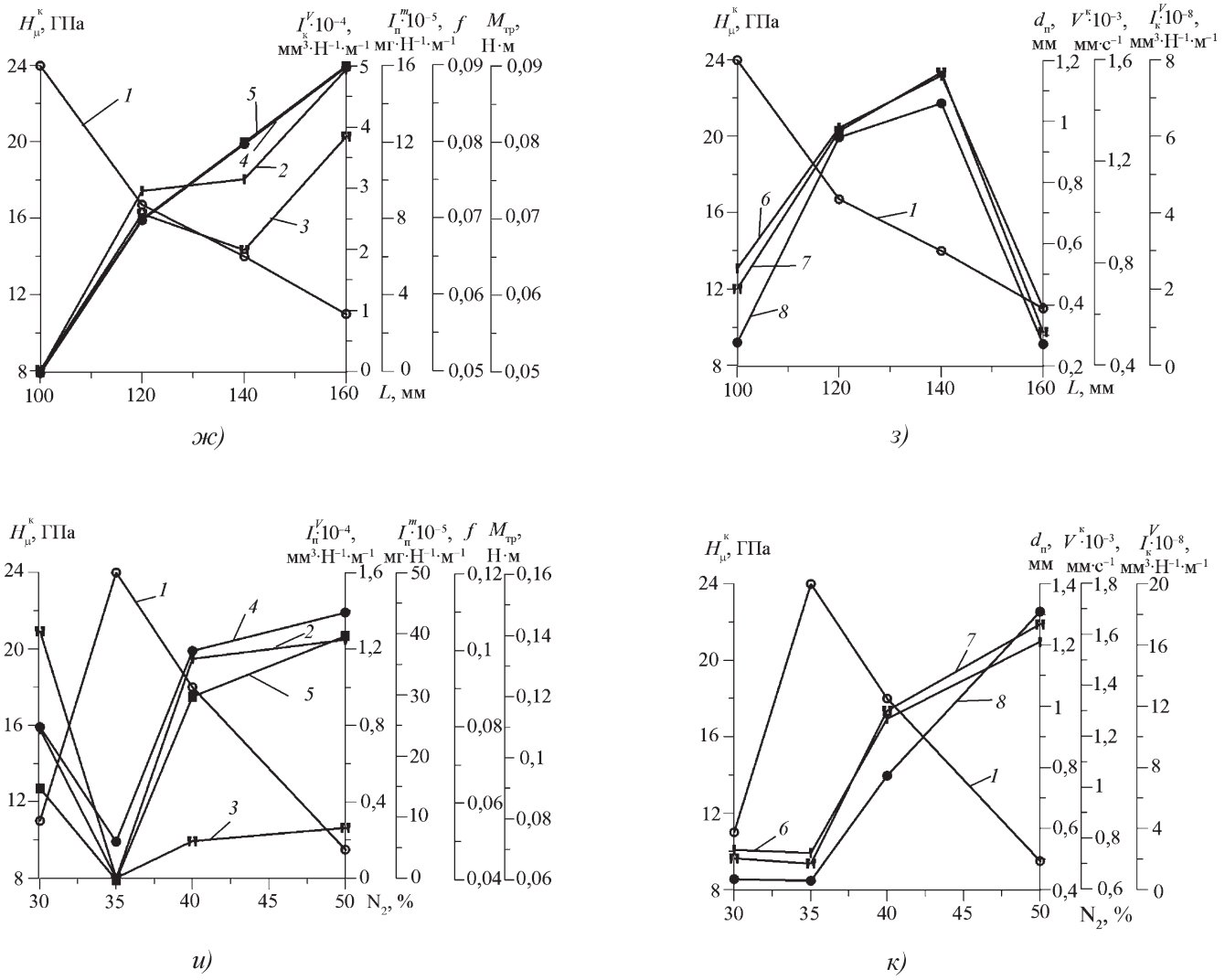


Рис. ***Окончание***

$I_п^m = 0{,}06 \cdot 10^{-5}$ мг·Н$^{-1}$·м$^{-1}$ и $I_п^V \approx 0$ мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$ и минимальной изнашивающей способностью: $d_п = 0{,}52$ мм; $V^к = 0{,}70 \cdot 10^3$ мм·с$^{-1}$; $I_к^V = 0{,}61 \cdot 10^{-8}$ мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$.

Выявлено, что определяющими факторами работоспособности пленки в условиях воздействия контактных нагрузок и давлений в равной степени явля-

Таблица

Трибологические свойства пленок на основе TiN, сформированных МР

ТП		$H_ц^к$, ГПа	Δm, мг	$I_п^m \cdot 10^{-5}$, мг·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$I_п^V \cdot 10^{-4}$, мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$I_к^V \cdot 10^{-8}$, мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$d_п$, мм	$V^к \cdot 10^{-3}$, мм·с$^{-1}$	f	$M_{тр}$, Н·м
p, Па	0,8	9,5/14,0	10,5	12,00	0,8	7,93	0,98	1,32	0,12	0,14
	1,0*	18,0/24,0	0,05	0,06	0	0,61	0,52	0,70	0,05	0,06
	1,2	14,20/19,6	6,78	8,05	0,2	1,29	0,68	0,92	0,12	0,13
	1,4	11,4/16,7	9,12	10,87	0,7	6,58	0,87	1,18	0,13	0,15

ТП		$H_{\mu}^{к}$, ГПа	Δm, мг	$I_{п}^{m}\cdot10^{-5}$, мг·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$I_{п}^{V}\cdot10^{-4}$, мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$I_{к}^{V}\cdot10^{-8}$, мм^3·Н$^{-1}$·м$^{-1}$	$d_{п}$, мм	$V^{к}\cdot10^{-3}$, мм·с$^{-1}$	f	$M_{тр}$, Н·м
N, кВт	1,70	12,37/14,0	9,15	10,46	0,81	6,55	0,93	1,26	0,07	0,08
	2,42	14,20,19,6	1,60	1,83	0	4,04	0,83	1,12	0,06	
	3,00	16,7/19,6	6,80	7,77	2,88	19,10	1,22	1,65	0,09	0,11
$U_{с}$, В·м	40	10,7/16,7	7,20	8,23	3,50	3,77	0,81	1,09	0,11	0,13
	60	13,3/18,0	2,90	3,31	1,75	4,15	0,83	1,12	0,09	0,11
L, мм	120	11,4/16,7	6,12	8,24	2,96	5,98	0,98	1,32	0,07	0,09
	140	9,5/14,0	7,52	9,36	3,15	6,87	1,15	1,55	0,08	0,11
	160	7,2/11,0	8,35	12,30	4,95	0,56	0,39	0,53	0,09	0,10
N_2, %	30	7,3/11,0	35,4	40,46	0,78	0,70	0,53	0,72	0,08	0,09
	40	10,8/18,0	5,35	6,11	1,15	7,45	0,96	1,30	0,10	0,12
	50	5,2/9,5	7,20	8,27	1,25	18,20	1,21	1,64	0,11	0,14

[*] p = 1,0 Па; L = 100 мм; N = 2,54 кВт; $U_{см}$ = 80 В; N_2 = 35 %.

Примечание. Материал подложки Ст3/ВК8.

ются микротвердость пленки, структурное состояние и дефектность ее поверхностного слоя.

Установленные закономерности между ТП МР и свойствами позволят получать пленки на основе TiN различного практического применения с заданным комплексом ИАС.

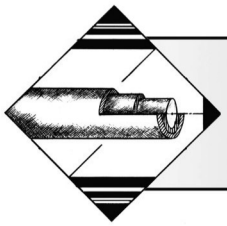
Авторы благодарят академика РАН, д-ра техн. наук В.Н. Анциферова и д-ра техн. наук А.М. Ханова за содействие в проведении экспериментальной части работы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Петржик М.И., Штанский Д.В., Левашов Е.А.** Современные методы оценки механических и трибологических свойств функциональных поверхностей // Материалы X Междунар. науч.-техн. конф. "Высокие технологии в промышленности России". М.: ЦНИТИ "Техномаш", 2004. С. 311–318.

2. **Каменева А.Л., Караваев Д.М.** Улучшение трибологических характеристик пленок на основе TiN путем оптимизации технологических условий процесса магнетронного распыления // Освоение минеральных ресурсов Севера: проблемы и решения: тр. 9-й Междунар. науч.-практ. конф. Воркута: Филиал СПГГИ (ТУ) "Воркутинский горный институт", 2011. С. 293–298.

3. **Влияние** покрытий TiN на коррозионное поведение сплава ВК8 / И.И. Замалетдинов, В.И. Кичигин, А.Л. Каменева, А.Ю. Клочков // Коррозия: материалы, защита. 2011. № 6. С. 32–38.



УДК 620.172.224.2

А.М. Иванов, А.С. Сыромятникова, Н.Д. Петрова
(Учреждение РАН "Институт физико-технических проблем Севера им. В.П. Ларионова СО РАН", г. Якутск)
E-mail: a.m.ivanov@iptpn.ru

Упрочнение интенсивной пластической деформацией и разрушение конструкционной стали*

Рассмотрены вопросы повышения прочности и хладостойкости конструкционной стали методом интенсивной пластической деформации по способу равноканального углового прессования с применением различных видов термической обработки. Исследована хладноломкость субмикрокристаллической стали. Дано описание механизмов разрушения образцов с различным структурным состоянием материала при температуре 213 К.

Ключевые слова: *упрочнение, сталь, интенсивная пластическая деформация, равноканальное угловое прессование, деформация, разрушение, структура, излом.*

The problems of improving the strength and cold resistance of structural steel by the equal-channel angular pressing using various types of heat treatment is considered. The cold brittleness of submicrocrystalline steel is investigated. The fracture mechanisms of the materials with different structural state at temperature 213 K is described.

Keywords: *hardening, steel, severe plastic deformation, equal-channel angular pressing, deformation, fracture, structure, failure surface.*

Введение

Среди существующих в настоящее время методов упрочнения и обеспечения хладостойкости металлических материалов перспективным направлением исследований является повышение прочностных и пластических свойств металлических материалов путем создания *субмикро-* (СМК) и *нанокристаллического* (НК) строения *интенсивной пластической деформацией* (ИПД) [1–5].

Одними из методов ИПД, позволяющих получить металлы и сплавы с субмикрокристаллической и наноструктурой, являются *кручение под гидростатическим давлением* (КГД) и *равноканальное угловое прессование* (РКУП). Для низкоуглеродистых сталей после КГД возможно получение НК-структуры с размером зерна 60...80 нм и СМК-структуры с размером зерна 200...300 нм после РКУП [4]. РКУП приводит к существенному повышению прочности стали в сравнении с исходным состоянием: предел прочности повышается почти в 3 раза, а предел текучести в 4 раза, но при этом снижаются характеристики пластичности.

Ранее были проведены исследования изменения механических свойств стали ВСт3сп после комбинированной обработки (сочетание РКУП и термической обработки в виде предварительной закалки и постдеформационного отжига) и установлено, что такой вид обработки материала позволяет улучшить сопротивляемость стали к ударным нагрузкам при низких температурах при сохранении достаточно высокого уровня пластичности [5].

В результате РКУП формировалась СМК-структура с фрагментами преимущественно зеренного типа размером менее 1 мкм. Отжиг при 823 К не приводил к заметному росту зерен, но способствовал формированию более равновесных границ, а при 873 К наблюдалось возрастание размеров зерен до 1...3 мкм.

Микротвердость стали после РКУП значительно возрастает уже после первого цикла прессования, а затем монотонно повышается по мере увеличения числа циклов: с 2,4...2,5 ГПа после двух циклов и до 2,7...2,9 ГПа после восьми циклов.

Как известно, образующаяся при закалке мартенситная структура приводит к повышению твердости и

* Работа выполнена при финансовой поддержке по проекту № 11.3 Программы фундаментальных исследований Президиума РАН № 11.

прочности, снижению вязкости и пластичности, а проведение постдеформационного отжига позволяет снимать внутренние напряжения и способствует повышению пластичности стали при некотором снижении прочности.

Таким образом, варьирование режимами прессования и термообработки дает возможность управления прочностными и пластическими свойствами материала. Однако влияние комбинированной обработки на прочность, хладостойкость и характер разрушения сталей в условиях низких температур исследованы недостаточно полно, чему посвящена данная статья.

Методика проведения исследований

В работе исследованы влияние комбинированной обработки, реализованной при различных режимах термообработки и РКУП, на характеристики сопротивления разрушению и механизм разрушения стали марки ВСт3сп следующего химического состава: 0,17 % C; 0,2 % Si; 0,54 % Mn; 0,14 % Cr; 0,14 % Ni; 0,04 % Co; 0,25 % Cu; 98,52 % Fe. Структура стали – ферритоперлитная, средний размер зерна в состоянии поставки – 18,5 мкм. Заготовки для РКУП изготавливали в виде цилиндров диаметром 20 мм и длиной 100 мм.

Обработку заготовок проводили в трех различных режимах:

• РКУП по маршрутам "B_c" или "C" при температурах 723 K или 673 K и числе проходов n = 2, 4, 8. Схема РКУП приведена на рис. 1, угол пересечения между каналами прессования составлял Ф = 120°;

• предварительная закалка от 1133 K в воду, затем РКУП;

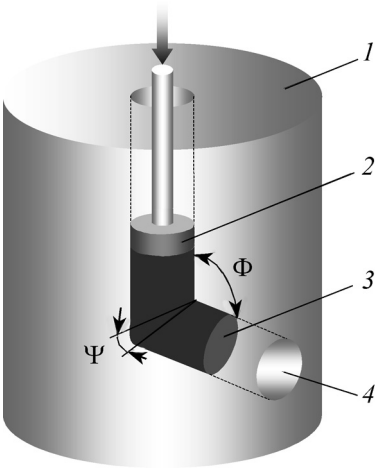


Рис. 1. Схема РКУП:
1 – матрица; *2* – пуансон; *3* – заготовка; *4* – канал

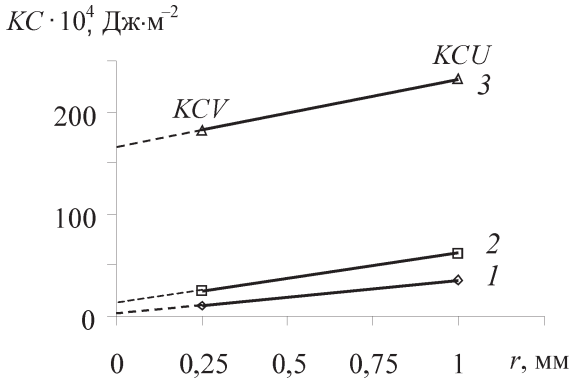


Рис. 2. Зависимости ударной вязкости стали ВСт3сп от остроты надреза:
1 – РКУП, маршрут "B_c", 723 K, n = 4; *2* – Закалка+РКУП, маршрут "B_c", 723 K, n = 4; *3* – Закалка+РКУП, маршрут "B_c", 723 K, n = 4+отжиг при 873 K

• предварительная закалка, РКУП и постдеформационный отжиг при температурах 673 K или 873 K.

Стандартные ударные образцы с V- и U-образными надрезами испытывали при температуре 213 K на копре МК-30. Для выявления хладноломкости определяли составляющие удельной работы разрушения *KC*: удельную работу распространения $KC_р$ и удельную работу зарождения трещины $KC_з$ по методу А.П. Гуляева [6] (рис. 2).

Исследование поверхности разрушения образцов проводили с использованием растрового электронного микроскопа "XL-20 Philips" в режиме вторичных электронов.

Результаты исследований и их обсуждение

Значения характеристик сопротивления разрушению, полученные при испытаниях на ударный изгиб образцов при температуре испытания 213 K, представлены в таблице.

Анализ ударных испытаний показал, что обработка материала приводит к повышению этих показателей. Например, ударная вязкость образцов, подвергнутых только РКУП, при низкой температуре испытаний сравнима с этими же показателями, полученными при комнатной температуре, для стали с исходной структурой (KCV = 11 Дж·м$^{-2}$). Предварительная закалка значительно повышает сопротивление разрушению материала, и наиболее высокие показатели ударной вязкости достигаются при постдеформационном отжиге.

Анализ результатов показывает, что после РКУП работа разрушения в основном затрачивается на за-

Таблица

Результаты ударных испытаний стали ВСт3сп при 213 К

№ п/п	Режим обработки	Ударная вязкость, $KC \cdot 10^4$, Дж·м$^{-2}$				
		*KC*V	*KC*U	$KC_р$	$KC_з^{0,25}$	$KC_з^{1,0}$
1	РКУП*	10,1	34,7	1,9	8,2	32,8
2	Закалка+РКУП	25,6	61,2	13,7	11,9	47,5
3	Закалка+РКУП+отжиг при 873 К	182,6	232,1	166,1	16,5	66,0

*Маршрут "$В_с$" при 723 К, $n = 4$.

Обозначения: *KC*V, *KC*U – ударная вязкость, определенная на образцах с концентраторами вида соответственно V и U; $KC_з^{0,25}$, $KC_з^{1,0}$ – удельные работы зарождения трещины в образцах с радиусом в вершине надреза соответственно $r = 0,25$ мм и $r = 1,0$ мм.

рождение трещины и составляет $0,8KC$ (при $r = 0,25$ мм) и $0,95KC$ (при $r = 1,0$ мм), что свидетельствует о хрупком разрушении стали. После закалки и РКУП работа зарождения трещины уменьшается: в образцах с острым надрезом работы зарождения и распространения трещины почти приравниваются, а $KC_з^{1,0} = 0,75KC$.

В образцах, подвергнутых комбинированной обработке, состоящей из закалки, РКУП и отжига, работа распространения существенно превышает работу зарождения трещины ($KC_з^{0,25} = 0,1KC$, $KC_з^{1,0} = 0,3KC$), что свидетельствует о вязком характере их разрушения при ударном изгибе.

Фрактограммы изломов образцов представлены на рис. 3. В образцах из стали с исходной структурой стабильное распространение трещины при низкотемпературном ударном испытании происходило по механизму внутризеренного скола, для которого характерно появление фасеток скола с ручьистым узором и язычков (см. рис. 3, *а*).

На поверхности разрушения образцов, подвергнутых РКУП, фасетки скола более мелкие, а сама поверхность характеризуется более выраженной рельефностью, обусловленной как измельчением структурных составляющих, так и их разориентировкой (см. рис. 3, *б*).

С увеличением числа циклов прессования поверхность разрушения приобретает смешанный характер: хотя и сохраняются признаки хрупкого разрушения, появляются небольшие участки со следами пластической деформации в виде вязкого ямочного разрушения (см. рис. 3, *в*).

Предварительная закалка образцов приводит к изменению механизма разрушения: поверхность разрушения состоит из фасеток квазискола, соединенных между собой гребнями отрыва, что является характерным рельефом излома при разрушении закаленных на мартенсит и отпущенных сталей (см. рис. 3, *г*).

В изломе отожженного при 673 К после закалки и РКУП ($n = 2$) образца появляются участки вязкого ямочного разрушения: небольшие, расположенные на поверхности разрушения (см. рис. 3, *д*, *1*), и протяженные, нормальные к плоскости продвижения трещины (см. рис. 3, *д*, *2*). Причинами их проявления могут быть структурная или ориентировочная неоднородности микро- и макрохарактера соответственно.

При повышении температуры отжига до 873 К и числа проходов РКУП разрушение в зоне стабильного развития трещины, занимающей центральную часть образца, обнаруживает вязкий рельеф (см. рис. 3, *е*, *1*). Волокнистая зона составляет всего 0,5 части от общей площади излома, что свидетельствует о значительной энергоемкости процесса разрушения данного образца. Наблюдаются как равноосные ямки нормального отрыва, так и удлиненные ямки, образовавшиеся, вероятно, при сдвиговом продвижении трещины в результате расклинивающего отрыва.

Итак, разрушение образцов, обработанных РКУП предварительно закаленной и затем отожженной низкоуглеродистой стали, при низкотемпературных ударных испытаниях в зоне стабильного роста трещины происходит по смешанному вязкохрупкому механизму, при этом повышение температуры отжига и/или числа проходов приводит к преобладанию вязкой составляющей на поверхности разрушения.

В зоне долома, которая занимает весь периметр излома, формируется слоистая поверхность разрушения, так называемый древовидный излом (см. рис. 3, *е*, *2*). Такой вид излома обычно формируется при разрушении материалов с анизотропным, волокнистым строением, которое в данном случае связано, вероятно, с

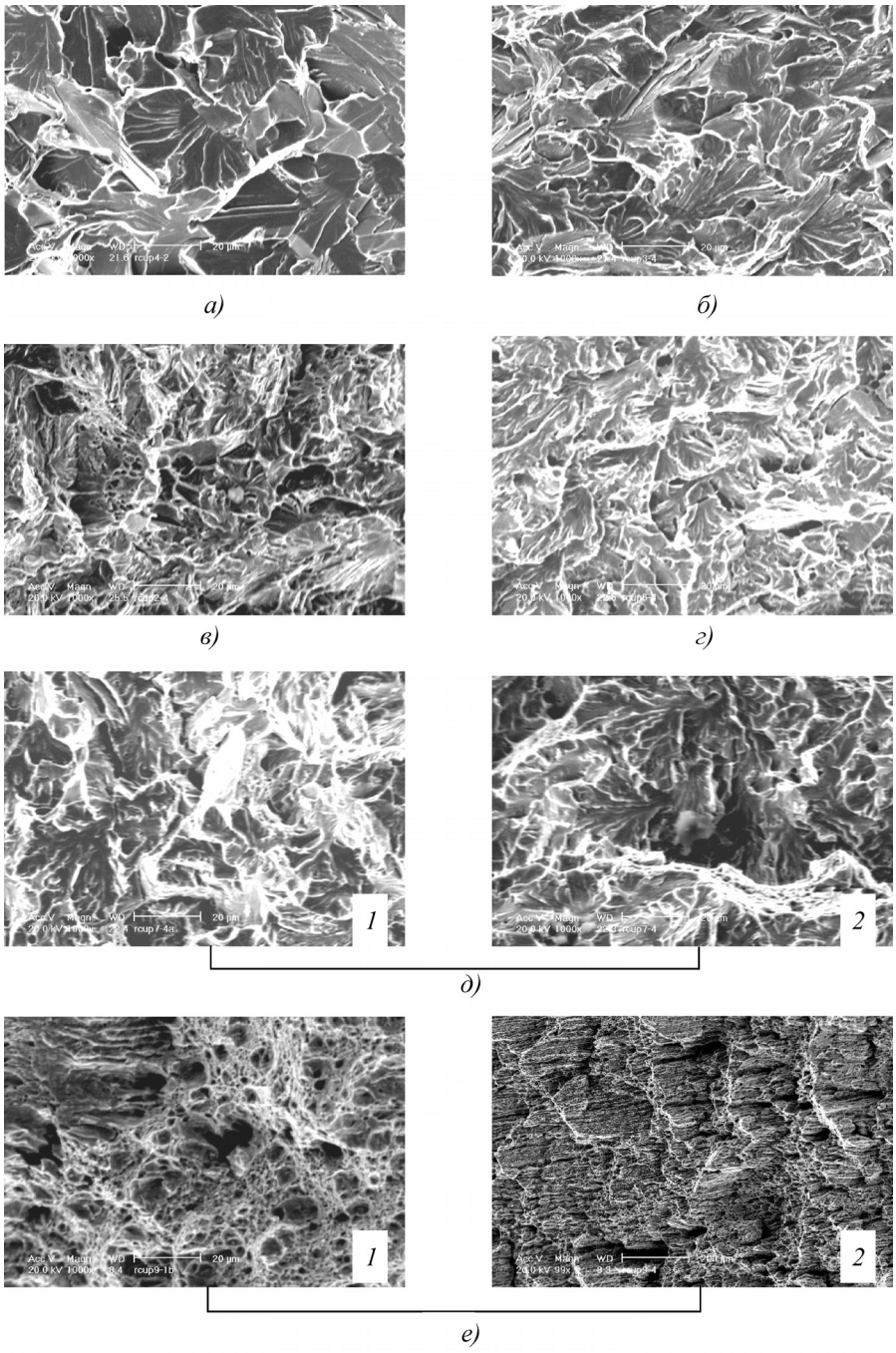


Рис. 3. Фрактограммы изломов образцов из стали ВСт3сп, разрушенных ударным изгибом при 213 К (×1000):
а – в исходном состоянии (состоянии поставки); *б*, *в* – РКУП, маршрут "С", 673 К, соответственно $n = 2$ и 8; *г* – закалка+РКУП, маршрут "С", 673 К, $n = 2$; *д* – закалка+РКУП, маршрут "С", 673 К, $n = 2$+отжиг при 673 К; *е* – закалка+РКУП, маршрут "$В_с$", 673 К, $n = 8$+отжиг при 873 К

технологией изготовления материала. Характер расположения слоев в рассматриваемом изломе свидетельствует о том, что вытянутые структурные составляющие материала ориентированы параллельно плоскости надреза.

Выводы

Таким образом, варьирование режимами прессования и термообработки дает возможность управлять не только прочностными, пластическими свойствами материала, но и свойствами, характеризующими сопротивление хрупкому разрушению, в том числе хладостойкостью.

Оптимизация соотношения работы зарождения и распространения трещины (в пользу увеличения работы распространения трещины) постдеформационной термообработкой способствует значительному повышению хладостойкости стали при сохранении достаточно высокого уровня прочности.

Оптимальный выбор режима комбинированной обработки, сочетающей закалку, РКУП и отжиг, который отвечает требованиям в зависимости от поставленных задач и практического применения изготавливаемого изделия, позволит получить материал с заданными эксплуатационными свойствами.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Сегал В.М., Резников В.И., Копылов В.И.** и др. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск: Навука і тэхніка, 1994. 231 с.

2. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Объемные наноструктурные металлические материалы: получение, структура и свойства. М.: ИКЦ "Академкнига", 2007. 398 с.

3. **Валиев Р.З., Александров И.В.** Парадокс интенсивной пластической деформации металлов // Доклады Академии наук. 2001. Т. 380. № 1. С. 34–37.

4. **Добаткин С.В., Лякишев Н.П.** Перспективы получения и использования наноструктурных сталей // II Всерос. конф. по наноматериалам "НАНО–2007": тез. докладов. Новосибирск, 2007. С. 35.

5. **Рааб Г.И., Иванов А.М., Гундеров Д.В.** и др. Повышение прочности и хладостойкости конструкционных сталей интенсивной пластической деформацией и термической обработкой // II Всерос. конф. по наноматериалам "НАНО–2007": тез. докладов. Новосибирск, 2007. С. 390.

6. **Гуляев А.П.** Разложение ударной вязкости на ее составляющие по данным испытаний образцов с разным надрезом // Заводская лаборатория. 1967. № 4. С. 473–475.

УДК 621.09

Б.Я. Мокрицкий, А.А. Бурков
(Комсомольский-на-Амуре государственный технический университет)
E-mail: boris@knastu.ru

Архитектурирование покрытий как один из факторов концепции многостадийного упрочняющего воздействия на металлорежущий инструмент

Установлено, что выбор эффективного технологического процесса изготовления металлорежущего инструмента можно осуществлять за счет правильного архитектурирования покрытия. Если этого оказывается недостаточно для конкретных условий эксплуатации инструмента, то дополнительно могут привлекаться технологические приемы подготовки материала инструмента под нанесение покрытия и приемы упрочнения нанесенного покрытия. Показано, что такой подход правомерен для твердосплавного инструмента, режущей керамики и сверхтвердых инструментальных материалов.

Ключевые слова: *период стойкости и трещиностойкость режущего инструмента, упрочнение инструмента, нанесение покрытий.*

It is established that the choice of an effective technological process of cutting tools can be done through proper arhitekturirovaniya coating. If this is not enough for the specific conditions of use a tool that may be involved in further processing methods of preparation of the material under the coating of tools and techniques of hardening of the coating. It is shown that this approach is justified for carbide tools, ceramic cutting tool materials and super.

Keywords: *period of tool durability or crack durability of a metal-cutting tool, tool reinforcement, coatings.*

Введение

Многообразие разработанных методов изготовления инструмента, в том числе за счет нанесения упрочняющих покрытий, затрудняет выбор наиболее рационального инструмента для конкретных условий его эксплуатации. Причем чем более сложны условия эксплуатации, тем более затруднен выбор инструмента.

Ряд потребителей металлорежущего инструмента обладают возможностью самостоятельного производства инструмента для собственных нужд. По крайней мере для упрочняющей обработки инструмента у ряда предприятий имеется собственный опыт эксплуатации различного инструмента и технологического оборудования для упрочнения инструмента. Другие потребители инструмента имеют возможность заказывать производителю инструмента тот инструмент, который изготовлен по такому *технологическому процессу* (ТП), который эффективен для конкретных условий эксплуатации инструмента.

Такой подход к повышению работоспособности инструмента формирует новую концепцию выбора или проектирования эффективного ТП изготовления инструмента.

Основы концепции многостадийного упрочнения инструмента

Предположим, что каждое упрочняющее воздействие дает эффект той или иной величины. Эффект тем больше, чем на большем числе этапов изготовления инструмента применены упрочняющие воздействия. Основные этапы (на примере твердого сплава) изготовления инструмента следующие:

– изготовление твердосплавной основы инструментального материала;

– упрочнение твердосплавной основы;

– архитектурирование* упрочняющих покрытий;

– упрочнение ("залечивание" дефектов) покрытия.

Если на каждом из этих этапов изготовления инструмента иметь хотя бы по два разных решения, то это уже позволяет иметь арсенал решений. Нужно лишь выбирать тот, который наиболее эффективен для конкретных условий эксплуатации.

Нельзя все решения собрать в арсенале одного металлообрабатывающего предприятия. Нужно отсечь все те, которые по тем или иным причинам не могут быть рациональны в этих условиях. Например, из-за того что на предприятии исключена возможность спекания твердого сплава, останется 20–30 ТП. Их и следует применять. Каждый ТП в каждом конкрет-

* Термин "архитектурирование покрытий" введен в России профессором А.С. Верещакой. Он подразумевает не только проектирование покрытия как такового под конкретные условия эксплуатации металлорежущего инструмента. Это "архитектурный" подход к выбору наиболее эффективного способа достижения целевой функции покрытия, в том числе за счет числа слоев в покрытии, их состава, толщины, способа нанесения и т.д.

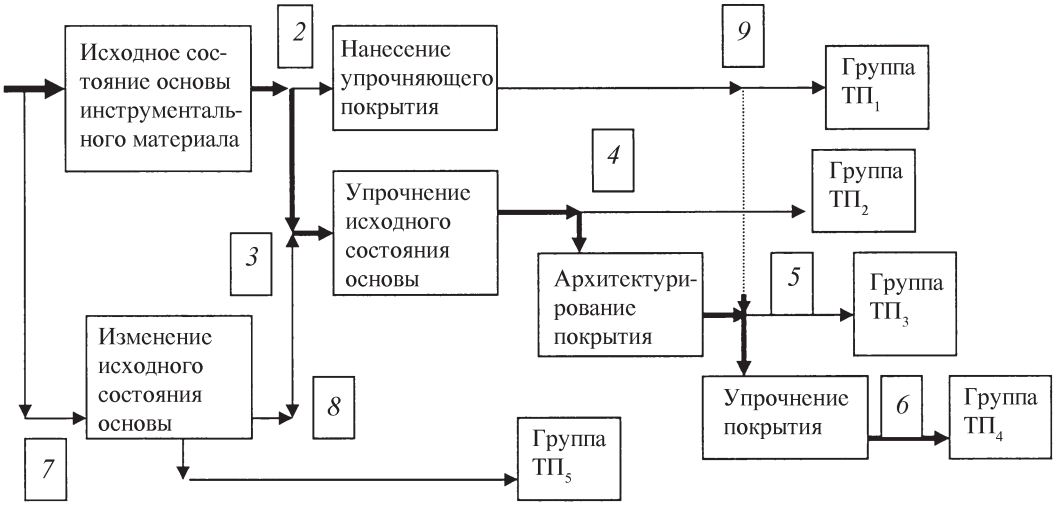


Рис. 1. Алгоритм концепции создания арсенала ТП изготовления инструмента

ном случае. Графически концепция иллюстрирована на рис. 1.

Результаты исследований и их обсуждение

Архитектурированием покрытий занимается небольшой ряд ученых России. Наиболее заметны фундаментальные работы А.С. Верещаки [1], С.Н. Григорьева [2], В.П. Табакова [3], В.С. Фадеева [4]. Значимость таких работ нарастает [5–7]. Прежде всего это определяется имеющимся технологическим оборудованием и конкретными задачами. Одно дело, когда стоит задача разработать эффективный ТП упрочнения твердосплавного инструмента для торцевого фрезерования авиационного титана, другое дело – для токарной обработки без замены инструмента длинномерных валопроводов из судостроительных материалов, третье – для раскроя алюминия со скоростью резания более 400 м/мин.

Решение таких частных задач ведет к формированию банка данных эффективных технологических методов изготовления инструмента. Из этого банка конкретное металлообрабатывающее предприятие может формировать свой арсенал (исходя их возможностей своего технологического оборудования) ТП изготовления инструмента. Это позволит снизить затраты по инструменту (на отдельных изделиях они достигают 30...70 % от стоимости изделия), создавать конкурентоспособную продукцию.

Авторы выносят на обсуждение ряд решений [8–10].

Технологический прием управления работоспособностью инструмента путем управления размером зерна в покрытии реализован при уменьшении размера зерна карбида титана от основы к поверхности при изменении температуры осаждения газовой фазы (данный прием является развитием предложенного профессором В.П. Табаковым способа управления размером зерна при осаждении покрытия *конденсацией с ионной бомбардировкой* (КИБ)(новизна защищена авторским свидетельством СССР на изобретение 1407099).

Суть разработанного решения состоит в возможности изменения размера зерна на порядок. Осуществлено изменение размера зерна от 3 до 0,3 мкм.

Необходимость высокой температуры в начале процесса осаждения покрытия связана с обеспечением условий диффузионного взаимодействия покрытия с основой. Последующее уменьшение температуры ведет к уменьшению размера зерна и снижению его нестихиометрии.

Осаждение такого покрытия обеспечивает компромисс свойств покрытия: за счет высокой температуры получена высокая прочность сцепления с основой, за счет мелкозернистой структуры покрытия – повышенная сопротивляемость разрушению, выросла энергоемкость и термическая стабильность. Это позволяет в 1,5 и более раз повысить период стойкости в сравнении с инструментом с типовым покрытием карбидами титана.

Технологический прием повышения работоспособности твердосплавного инструмента комбинацией методов нанесения покрытия основан на использовании достоинств осаждения покрытия из газовой фазы *газотермическим методом* (ГТ) и нанесения покрытия методом КИБ (новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения 1354557, 1372976, 1767773, 1670873, 1342047, 1354757).

Основным достоинством метода ГТ является обеспечение высокой прочности сцепления покрытия с основой, а достоинством метода КИБ – возможность нанесения "мягких" металлических слоев покрытия, выполняющих разные функции и повышающих сцепление "твердых" слоев покрытия между собой за счет

Таблица 1

Износ инструмента за 10^5 циклов нагружения

Исполнение покрытия	ВК8+TiC (5 мкм)	ВК8+ + TiC (3 мкм)+ + ZrN (4 мкм)	ВК8+ + TiC (3 мкм)+ + Zr (1 мкм)+ + ZrN (4 мкм)	ВК8+TiC (3 мкм)+ +Zr (1,5 мкм)+ + ZrN (4 мкм)	ВК8+TiC (3 мкм)+ + Zr (0,5 мкм)+ + ZrN (4 мкм)
Износ по задней грани, мм	0,56	0,42	0,21	0,23	0,36

Примечание. В таблице приведены величины износа как среднее значение по 3–5 измерениям с коэффициентом вариации менее 0,2. Здесь и далее статистическую обработку данных проводили в соответствии с работой П.Г. Кацева "Статистические методы исследования режущего инструмента".

обеспечения материалом металлического "мягкого" слоя химической совместимости слоев.

Демпфирование подтверждено измерением микротвердости, рост прочности сцепления – методом маятниково-акустического скрайбирования.

Прием ГТ+КИБ+ГТ использует метод КИБ для нанесения "мягкого" промежуточного слоя из металла между двумя "твердыми" слоями покрытия, осаждаемых методом ГТ. Прием КИБ+ГТ+КИБ использует метод КИБ для осаждения "мягкого" металлического слоя на основу и повторно использует метод КИБ для осаждения "мягкого" слоя поверх "твердого" (осаждаемого методом ГТ) слоя для "залечивания" его дефектов.

Наиболее просто технологический прием реализуется методом ГТ+КИБ при нанесении покрытия TiC+Me+MeN, где металлический слой и нитридный слой получены из одного металла. Пример использования циркония показан в табл. 1 для торцевого фрезерования стали У8А со скоростью 250 м/мин, подачей 0,21 мм/зуб и глубиной 2 мм.

Эффективность данного технологического приема подтверждена также при других составах и толщинах покрытий, при обработке судостроительных сталей группы АК и титановых сплавов.

Технологический прием повышения работоспособности твердосплавного инструмента путем применения многослойных покрытий использует "принцип сэндвича" для торможения процесса роста трещин в покрытии. Прием исполнения покрытия с чередующимися "мягкими" и "твердыми" слоями основан на трех эффектах: изменении направления развития трещины на границе раздела слоев покрытия; демпфирующей роли мягких слоев; микролегировании твердого слоя в процессе нанесения "мягкого" слоя (новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения 1367529, 1324325, 1610920, 1372976, 1354557, 1670876, 1342047 и др.). При этом проявляются также эффекты "залечивания" мягким слоем дефектов расположенного ниже слоя, активизации диффузионных процессов, снижения скорости роста трещины в мягком слое покрытия и т.д.

При достижении трещиной границы раздела покрытие–основа направление дальнейшего развития трещин зависит от свойств этой границы. Фрактографическими исследованиями установлено, что на границе раздела трещина разветвляется: частично разрушение идет вдоль границы; частично трещина продолжает расти в основу.

Пример сравнительных результатов испытаний инструмента с чередующимися слоями покрытия представлен на рис. 2 для прерывистого точения (обработка цилиндра с пазом) специализированной стали АК-32ПК со скоростью резания 80 м/мин, подачей 0,2 мм/об и глубиной 2 мм.

Данные рисунка показывают повышение работоспособности по величине износа задней грани режущей пластины с промежуточным слоем молибдена в сравнении с инструментом без промежуточного мягкого слоя до 1,6 раз.

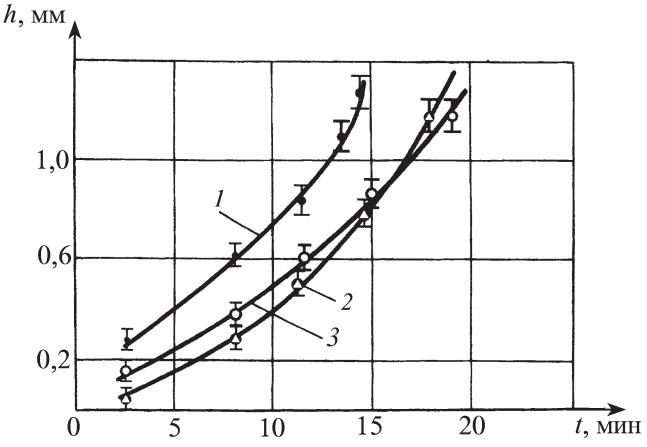


Рис. 2. Результаты сравнительных испытаний работоспособности инструмента:
1 – ВК8+TiC, *2* – ВК8+Mo+TiC; *3* – ВК8+Ti+TiC+Ti

Технологический прием повышения работоспособности твердосплавного инструмента путем нанесения композиционных покрытий основан на стремлении обеспечить компромисс требуемых эксплуатационных свойств инструмента составом покрытия. Под композиционным покрытием понимается покрытие с таким его составом, в котором присутствует соединение нескольких материалов, например в составе слоя покрытия находятся нитриды титана и циркония, т.е. (TiZr)N (новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения 1556013, 1413839, 1385641, 1383620).

Наиболее просто получение композиционного покрытия реализуется методом КИБ (новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения 1549103, 1468002). При этом используют сборный катод или получают катод методом порошковой металлургии. Второй путь перспективней по возможности получения композиции металлов или соединений, в том числе боридов, силицидов. Результаты испытания инструмента, изготовленного таким приемом, представлены на рис. 3 для случая прерывистого точения специализированной стали АК-32ПК при скорости резания 80 м/мин, подаче 0,2 мм/об и глубине 1,5 мм.

Технологический прием лазерного упрочнения покрытий позволяет завершить диффузионные процессы между основой и покрытием и осуществить "залечивание" несплошностей "твердого" слоя покрытия материалом верхнего "мягкого" слоя (новизна защищена авторскими свидетельствами СССР на изобретения 1383621, 1385393).

В табл. 2 приведены результаты применения такого упрочнения при токарной обработке стали 31Х19Н9МВБТ со скоростью резания 160 м/мин, подачей 0,1 мм/об, глубиной резания 1,5 мм и стали АК-32ПК при скорости резания 80 м/мин, подаче 0,2 мм/об и глубине 1,5 мм. Из данных таблицы следует, что лазерное воздействие как прием снижения

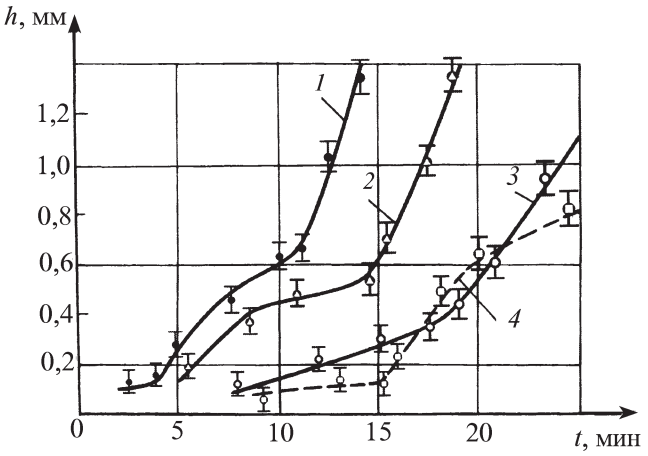


Рис. 3. Зависимости износа по задней грани от времени работы твердосплавного инструмента ВК8 с:
1 – покрытием TiN (КИБ); *2* – покрытием TiC (ГТ); *3* – композиционным покрытием, полученным при испарении спеченного катода, содержащего Mo, Zr, Ti, B, Si; *4* – композиционным покрытием, полученным при испарении спеченного катода, содержащего Ti, Mo, NbB_2, TaB_2, ZrB_2

дефектности нанесенного покрытия обеспечивает снижение износа до 40 %.

Возможны также другие приемы упрочняющего воздействия на покрытие и основу инструментального материала. Они ранжируются по достигаемому эффекту повышения работоспособности инструмента и могут применяться раздельно или в совокупности. Являясь самостоятельными, они входят составной частью в арсенал разработанных ТП изготовления инструмента в рамках концепции многостадийного упрочняющего воздействия на исходный инструментальный материал.

Эта группа приемов для твердого сплава относится к этапу снижения дефектности нанесенного покрытия и доля вклада разных стадий этого этапа изготовления инструмента может быть разной. Принципиально важным является не сама величина доли вклада

Таблица 2

Износ, мм, инструмента за равное время эксплуатации

Инструмент	T15K6+Ti+TiC+Zr		T15K6+Ti+TiN+Zr	
	Без воздействия лазером	С воздействием лазером	Без воздействия лазером	С воздействием лазером
Обрабатываемый материал сталь 31Х19Н9МВБТ	1,2	0,86	1,8	1,1
Обрабатываемый материал сталь АК-32ПК	0,72	0,53	1,3	0,77

Примечание. Приведены значения как среднее значение по 5–7 измерениям с коэффициентом вариации менее 0,2 при вероятности 0,95 и отбрасывании крайних значений.

этого или иного этапа, а величина эффекта прироста работоспособности инструмента в результате упрочняющих воздействий на всех этапах изготовления. Это дает возможность управлять работоспособностью твердосплавного инструмента как последовательностью упрочняющих многостадийных воздействий на всех этапах.

Добавление хоть одной стадии (технологического приема) в этой последовательности упрочняющих воздействий или пропуск хоть одной стадии проявляется на величине прироста работоспособности инструмента. Этот комплексный подход позволяет из арсенала разработанных ТП изготовления твердосплавного инструмента выбирать или создавать наиболее эффективный ТП для конкретных условий эксплуатации инструмента по тому или иному критерию оценки эффективности, в том числе по достигаемому экономическому эффекту.

Общее представление об арсенале разработанных ТП дает схема, приведенная на рис. 4 и ее интерпретация в табл. 3.

Градация эффективности разработанных ТП изготовления инструмента в работе проведена в основном по величине периода его стойкости в сравнении с известными решениями. Градация по величине экономического эффекта выполнена ограниченно из-за хаоса в ценообразовании на инструмент. Но даже это хаосное состояние инструментального рынка показывает, что предложенная концепция и методология повышения работоспособности инструмента создает базу

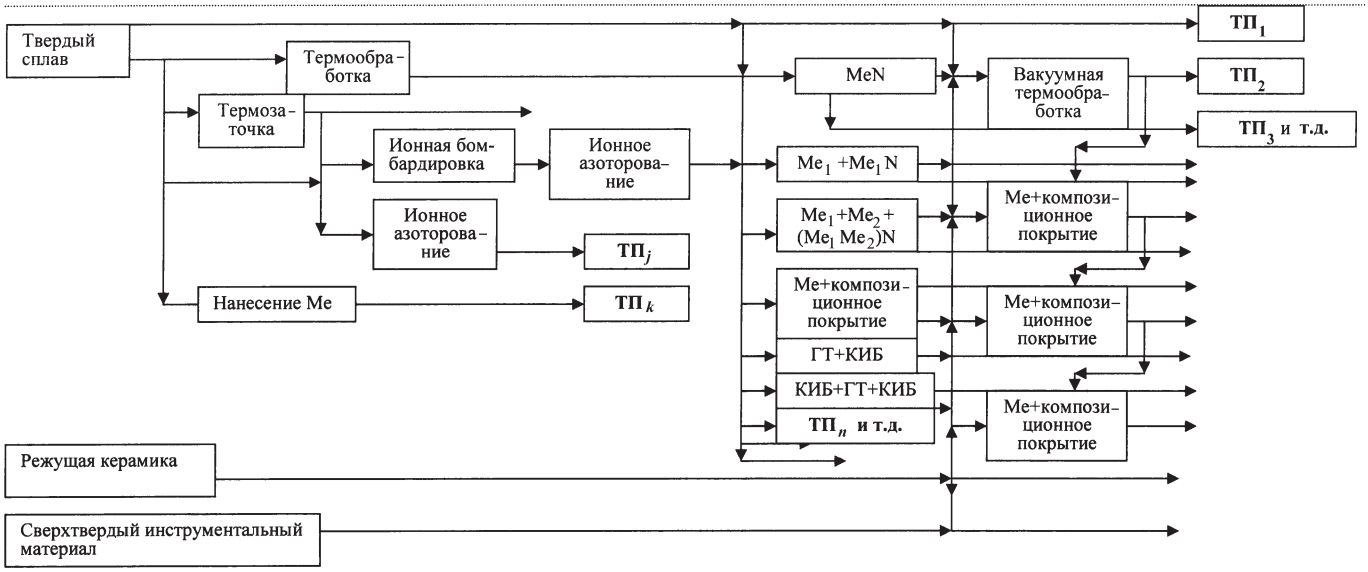


Рис. 4. Структура создания арсенала ТП изготовления инструмента для выбора и создания эффективного ТП:
Me – металл; MeN – химическое соединение (нитрид, карбид, карбонитрид, оксид и т.д.)

Таблица 3

Схема построения эффективного ТП изготовления инструмента

ТП изготовления	Инструментальный материал	Этапы ТП изготовления инструмента									Показатели качества ТП		
		Изготовление основы		Упрочнение основы		Архитектурирование покрытия		Упрочнение покрытия					
		Примеры вариантов упрочняющего воздействия											
		Типовой ТП	Разработанные варианты ТП	Термомеханическое упрочнение	Разработанные варианты ТП	Однослойное или многослойное покрытие	С чередованием слоев	Разработанные варианты ТП	Воздействие лазером	Разработанные варианты ТП	Стойкость	Стоимость	Эффективность
$ТП_1$	Твердый сплав	+				+					T_1	C_1	$Э_1$
$ТП_2$		+		+		+	+		+		T_2	C_2	$Э_2$
$ТП_3$		+			+	+	+	+		+	T_3	C_3	$Э_3$
$ТП_4$			+	+		+	+		+	+	$\mathbf{T_4=T_3}$	C_4	$Э_4$

ТП изготовления	Инструментальный материал	Этапы ТП изготовления инструмента									Показатели качества ТП		
		Изготовление основы		Упрочнение основы		Архитектурирование покрытия			Упрочнение покрытия				
		Примеры вариантов упрочняющего воздействия											
		Типовой ТП	Разработанные варианты ТП	Термомеханическое упрочнение	Разработанные варианты ТП	Однослойное или многослойное покрытие	С чередованием слоев	Разработанные варианты ТП	Воздействие лазером	Разработанные варианты ТП	Стойкость	Стоимость	Эффективность
$ТП_5$	Керамика	+									T_5	C_5	$Э_5$
$ТП_6$		+			+						T_6	C_6	$Э_6$
$ТП_7$		+			+	+					$\mathbf{T_7=T_3}$	$\mathbf{C_7=C_3}$	$\mathbf{Э_7=Э_3}$
$ТП_8$	СТМ	+									T_8	C_8	$Э_8$
$ТП_9$		+			+	+				+	T_9	C_9	$Э_9$

Примечание. Курсивом выделены типовые процессы для инструментальных материалов; жирным выделены показатели, совпадающие для вариантов ТП; разработанные варианты ТП – это один или несколько технологических приемов упрочняющего воздействия для данного этапа изготовления инструмента.

для разработки принципов управления работоспособностью за счет многокритериальной оценки эффективности ТП изготовления инструмента как последовательности целенаправленных воздействий по упрочнению исходного инструментального материала.

Выводы

1. Нет ни одного ТП изготовления металлорежущего инструмента, превосходящего все остальные по эффективности. В каждом конкретном случае это может другой или схожие ТП.

2. Наиболее значимо и масштабно влиять на эффективность ТП изготовления инструмента можно за счет архитектурирования покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Верещака А.С., Верещака А.А.** Тенденции совершенствования и методология создания функциональных покрытий для режущего инструмента // Современные технологии в машиностроении: сб. науч. статей; под ред. А.И. Грабченко. Харьков: НТУ "ХПИ", 2007. С. 192–235.

2. **Григорьев С.Н.** Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2009. 368 с.

3. **Табаков В.П., Порохин С.С.** Применение многослойных покрытий для повышения эффективности режущего инструмента, работающего в стесненных условиях // Металлообработка. 2010. № 3. С. 40–44.

4. **Фадеев В.С.** Научные основы разработки и получения слоистых материалов на поверхности твердых сплавов и оксидной керамики для повышения работоспособности режущего инструмента: автореф. ... д-ра техн. наук. Якутск, 2005. 44 с.

5. **Обрезков О.И., Вершок Б.А.** и др. Свойства покрытий TiN, осажденных методом КИБ в сопровождении пучка высокоэнергетических ионов // Материалы 15-й Междунар. конф. "Взаимодействие ионов с поверхностью". 2001. Т. 2. С. 164–167.

6. **Обрезков О.И., Вершок Б.А.** и др. Упрочнение инструмента импульсными ионными пучками // Станки и инструмент. 1991. № 2. С. 14–16.

7. **Обрезков О.И., Вершок Б.А.** и др. Свойства покрытий TiN, осажденных методом конденсации с ионной бомбардировкой в сопровождении пучка высокоэнергетических ионов // Известия АН. Серия физическая. 2002. Т. 66. № 8. С. 1199–1203.

8. **Мокрицкий Б.Я.** Повышение работоспособности металлорежущего инструмента путем управления свойствами инструментального материала. Владивосток: Дальнаука, 2010. 232 с.

9. **Мокрицкий Б.Я.** Управление работоспособностью металлорежущего инструмента путем нанесения покрытий, механической упрочняющей обработки и контроля качества // Упрочняющие технологии и покрытия. 2010. № 9. С. 38–47.

10. **Мокрицкий Б.Я.** Управление работоспособностью инструмента при нанесении покрытий // СТИН. 2010. № 11. С. 11–16.

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 *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 29.12.11 г. Подписано в печать 21.02.12 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 6,70. Заказ 114. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство "Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Подольская Периодика", 142110, Московская обл., г. Подольск, ул. Кирова, д. 15