

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 2 (62)
февраль
2010

Издается с января 2005 г.

Главный редактор
д-р физ.-мат. наук,
заслуженный деятель науки РФ
В.Н. НЕВОЛИН

**Председатель редакционного
совета**

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

**Заместители главного
редактора:**

И.Н. ЖЕСТКОВА
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
С.Н. ГРИГОРЬЕВ
В.Ю. ЗАМЯТИН
В.А. ЗЕМСКОВ
С.А. КЛИМЕНКО
В.А. ЛАШКО
В.А. ЛЕБЕДЕВ
В.В. ЛЮБИМОВ
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО
Ю.В. ПАНФИЛОВ
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
С.В. СИДОРОВА
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

Рахимянов Х.М., Семенова Ю.С. Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании . . . 3

Шин И.Г. Интенсивность остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании деталей машин 10



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Верхотуров А.Д., Николенко С.В. Классификация. Разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования. 13

Шулов В.А., Пайкин А.Г., Быценко О.А., Теряев Д.А., Энгелько В.И., Ткаченко К.И. Разработка технологического процесса ремонта и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866Ш с применением сверхточных импульсных электронных пучков 23



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Герасимов С.А., Сергиевский Е.А., Симонов В.Н., Ампилогов А.Ю. Коэффициент скорости роста толщины покрытия при гетеродиффузии 28

Жуков А.А., Шапова Л.А. Статистическая оценка эксплуатационных свойств азотированного слоя 31



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Кузнецов Ю.А., Митюрева Н.В. Шлифование деталей из алюминиевых сплавов, упрочненных микродуговым оксидированием 38



ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

Белобородов В.Н., Ли А.Н., Емелин В.И., Долматов Г.Н. Технология нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов 41

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

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 2 (62)
February
2010

Since 2005, January

Editor-in-Chief

Dr of Phys. Math. Sci.,
The honoured worker
of a science of the RF
V.N. NEVOLIN

Chair of Editorial Council

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

Editorial Assistants:

I.N. ZHESTKOVA
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
S.N. GRIGORIEV
V.Yu. ZAMYATIN
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
F.I. PANTELEENKO
Yu.V. PANFILOV
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOICHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:

E.P. ZEMSKOVA
S.V. SIDOROVA
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

Rakhimyanov Kh.M., Semyonova Yu.S. Mathematical modeling of microrelief
formation with ultrasonic plastic straining 3

Shin I.G. Intensity of residual pressure at superficial plastic deformation of details
of cars 10



PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Verchoturov A.D., Nikolenko S.V. To the question of classification, working
out and making of electrode materials for electrospark alloying 13

**Shulov V.A., Paikin A.G., Bytzenko O.A., Teryaev D.A., Engelko V.I.,
Tkachenko K.I.** Technological process development of repair and property
recovery of gas turbine engine compressor blades from ЭП866Ш steel
with the use of intense pulsed electron beams 23



CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING

Gerasimov S.A., Sergievskiy E.A., Simonov V.N., Ampilogov A.Yu. Coefficient
of growth rate of the thickness of the coating at heterodiffusion 28

Gukov A.A., Shchapova L.A. Statistical estimation of service properties
of the nitrogenized layer 31



PROCESSING BY COMBINED METHODS

Kyznetsov Yu.A., Mityuryeva N.V. Grinding of elements made of aluminium
alloys 38

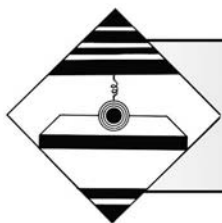


INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

Byeloborodov V.N., Le A.N., Yemelin V.I., Dolmatov G.N. Technology
of polymeric composite coverings at trenchless pipelines repair 41

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



УДК 621.793.02

Х.М. Рахимьянов, Ю.С. Семенова (Новосибирский государственный технический университет)
E-mail: kharis51@mail.ru

Моделирование процесса формирования регулярного микрорельефа при ультразвуковом пластическом деформировании

Предложена модель, описывающая геометрические характеристики регулярного микрорельефа, полученного в результате ультразвукового пластического деформирования цилиндрической поверхности. Модель позволяет определить размеры, форму элементарных фрагментов микрорельефа, их суммарный объем, что дает возможность целенаправленно формировать микрогеометрию поверхности подложки для последующего нанесения покрытий.

Ключевые слова: микрорельеф поверхности подложки, ультразвуковое пластическое деформирование.

This article is devoted to mathematical modeling of surface microrelief geometrical features, formed by ultrasonic plastic straining of circular-shaped machine parts. This model makes it possible to determine the shape and dimensions of microrelief fragments and their total volume. This enables us to form desired substrate surface microgeometry before coating.

Keywords: substrate relief, ultrasonic plastic straining.

Введение

Перспективным направлением повышения эксплуатационных характеристик деталей машин является формирование на их поверхности слоя с особыми свойствами, отличающимися от свойств основного материала. К методам модификации поверхностного слоя металлов относятся: химические и химико-термические (цементация, азотирование, нитроцементация), термические (закалка ТВЧ), обработка изделий концентрированными потоками энергии (пучки электронов, плазменные потоки, лазерное излучение), механические (*поверхностное пластическое деформирование* (ППД)) и др. [1–4]. Помимо модификации материала детали можно изменить свойства поверхности путем нанесения покрытия из другого материала, обладающего требуемыми свойствами [5, 6], что обеспечивает широкий диапазон варьирования характеристиками поверхности для различных условий эксплуатации. Важной задачей при проектировании технологии нанесения покрытия является повышение качества сцепления материала покрытия с подложкой. На адгезионные свойства покрытия влияют как метод нанесения покрытий, так и вид рельефа поверхности подложки.

На этапе подготовки поверхности подложки следует обратить внимание на характер формируемого рельефа. Прочность связи между покрытием и под-

ложкой определяется площадью фактического контакта материала покрытия и подложки, т.е. степенью развитости поверхности последней [7]. В то же время следует учитывать, что увеличение высотных перепадов в рельефе сказывается на неравномерности покрытия по толщине. Также известно, что характер распределения сил связи между покрытием и подложкой в значительной мере определяется регулярностью предварительно сформированного на ней рельефа. Это значит, что рельеф, создаваемый на поверхности, должен иметь регламентированные размеры, форму, плотность, регулярность расположения фрагментов.

Стандартом ГОСТ 24773–81 установлены пределы числовых значений параметров регулярного микрорельефа (число элементов регулярного микрорельефа на единицу поверхности: 0,01...100 на 1 мм², высота элемента регулярного микрорельефа в диапазоне 1600...0,025 мкм).

К методам создания регулярного микрорельефа относят: обработку лезвийным инструментом (проточка и фрезерование круговых и винтовых канавок и углублений сложной формы с помощью копировальных устройств), химическую обработку (травление через трафарет), поверхностное пластическое деформирование (накатывание профильным роликом, вибрационное накатывание, ультразвуковое пластическое деформирование) [8]. При обработке лезвийным

инструментом на поверхности металла возникают неблагоприятные растягивающие остаточные напряжения, снижающие усталостные свойства изделия. При химической обработке созданные на предыдущих операциях растягивающие напряжения могут уменьшиться. Поверхностное пластическое деформирование обеспечивает формирование регулярного микро рельефа, и при этом на поверхности образуются сжимающие остаточные напряжения.

В технологическом процессе ППД может применяться как самостоятельная финишная обработка поверхности с целью повышения ее износостойкости, сопротивления усталости, твердости поверхностного слоя, формирования в нем сжимающих напряжений, создания регламентированного рельефа микронеровностей. ППД характеризуется мгновенным локальным разогревом металла в пятне контакта и быстрым отводом тепла внутрь обрабатываемого изделия. При интенсивных режимах обработки локальные участки поверхности слоев нагреваются при обкатке до 300...400 °С, при выглаживании – до 600...700 °С, при ударных методах – до 800...1000 °С. Нагрев может вызвать термопластическое деформирование и снизить эффект упрочнения [9]. При *ультразвуковом пластическом деформировании* (УЗПД) изменение температуры в зоне обработки не превышает 120 °С, что относится к преимуществам данного метода [3].

Важной технологической особенностью УЗПД является возможность варьирования геометрическими параметрами микро рельефа в широком диапазоне, чего нельзя достичь при использовании других методов ППД. Формирование элементов микро рельефа инструментом, колеблющимся с ультразвуковой частотой, позволяет получить размеры, выходящие за пределы, обозначенные в ГОСТ 24773–81 для микро рельефа, в область субмикро рельефа. Кроме этого, важным моментом является то, что при УЗПД требуется малое статическое усилие прижатия инструмента к детали при обеспечении значительных динамических нагрузок, возникающих в процессе ультразвуковых колебаний инструмента. Таким образом, при создании локальных деформаций в поверхностном слое изменений формы детали в макрообъеме не происходит, что позволяет обрабатывать нежесткие и тонкостенные детали. Высокие динамические нагрузки, действующие локально, дают возможность обрабатывать хрупкие детали, изготовленные из материалов высокой твердости.

Моделирование процесса ультразвукового пластического деформирования

Известны работы, рассматривающие процесс ультразвуковой обработки с позиций деформацион-

ного воздействия, формирования регулярного микро рельефа с регламентированной формой фрагментов, распределения напряжений и температуры. На рис. 1 представлена схема, связывающая между собой исходное состояние поверхности, деформационные процессы, описываемые моделями, и состояние поверхностного слоя после УЗПД.

В работе [4] представлена деформационная модель УЗПД, разработанная на основе теоретических зависимостей действующих сил от параметров стержневой колебательной системы и экспериментальных данных по сверхскоростной киносъемке процесса деформирования. На ее основе создана модель формирования микро рельефа при УЗПД, устанавливающая взаимосвязь кинематических характеристик ультразвукового воздействия, обусловливаемых требованиями к микрогеометрии, с динамическими через обобщающий параметр – глубину единичного отпечатка деформатора:

$$2\sqrt{D_c h_{\max}} \geq \sqrt{\left\{s^2 + \left[\frac{v_d(1-m)}{60f}\right]^2\right\} \sqrt{1 + \left(\frac{mv_d}{60fs}\right)^2}}, \quad (1)$$

где D_c – диаметр сферы деформатора, мм;

h_{\max} – максимальная глубина единичного отпечатка деформатора, мм;

s – подача, мм/об;

v_d – скорость вращения детали, м/мин;

f – частота колебаний ультразвукового инструмента, Гц;

m – дробная часть числа фрагментов микро рельефа на одном витке при токарной обработке цилиндрической поверхности.

Число фрагментов на единицу поверхности определяется выражением:

$$M + m = \frac{\pi D}{l} = \frac{6 \cdot 10^4 f}{n}, \quad (2)$$

где M – целое число ударов инструмента (фрагментов микро рельефа), приходящихся на один виток;

l – расстояние между центрами соседних ударов, мм;

D – диаметр обрабатываемой детали, мм;

n – частота вращения детали, об/мин.

Анализ формирования фрагментов показал, что в зависимости от числа фрагментов микро рельефа, приходящихся на один виток при токарной обработке цилиндрической поверхности, форма элементарного фрагмента может иметь четыре вида (рис. 2).

При $m = 0$ элементарные фрагменты микро рельефа представляют собой участки сфер, проекции которых на прилегающую поверхность детали образуют

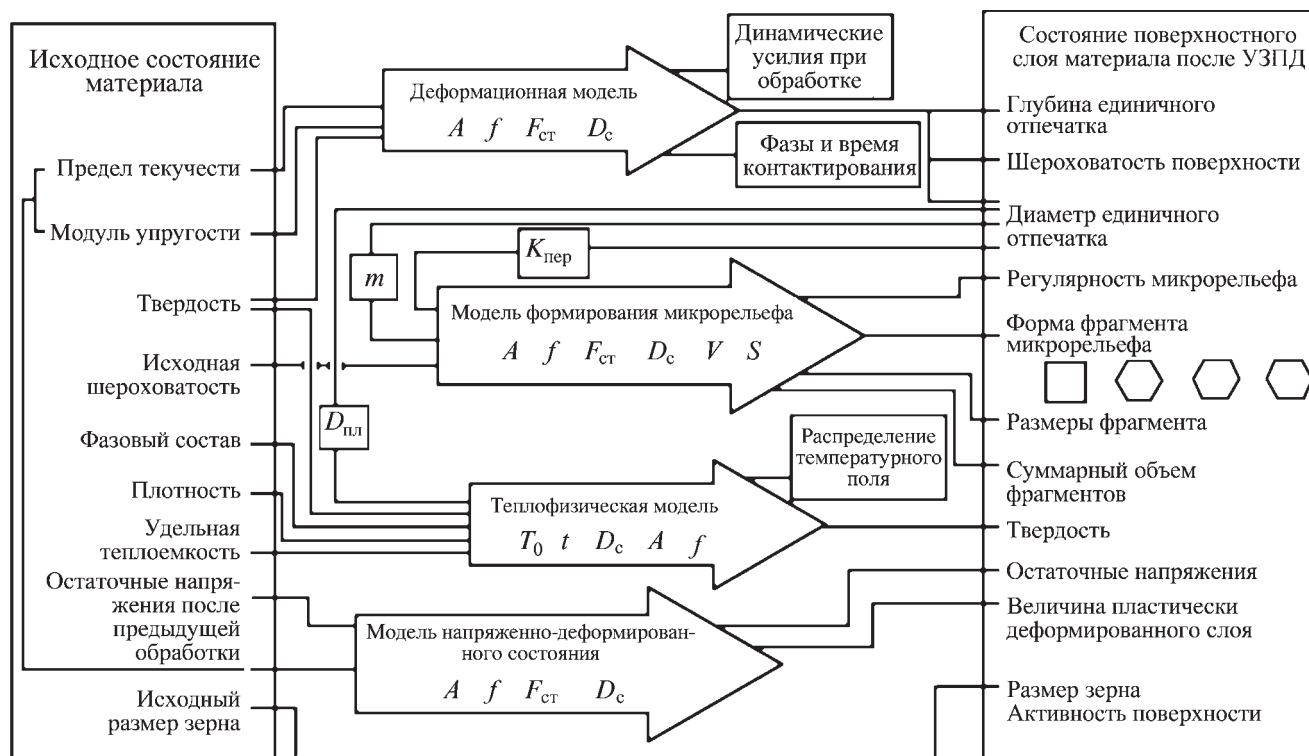


Рис. 1. Взаимосвязь математических моделей УЗПД с параметрами исходного и обработанного материала

четыреугольники (рис. 2, а). На рис. 2, б изображен рельеф поверхности, образующийся при значении $m = 0,5$. Проекция его фрагментов на прилегающую поверхность представляют собой правильные шестиугольники. Поверхность рельефа, формирующегося при $0 < m < 0,5$ и $0,5 < m < 1$, состоит из фрагментов, проекции которых на прилегающую поверхность представляют собой неправильные шестиугольники. Отличие видов между собой заключается в направлении наклона элементарных фрагментов к оси цилиндрической поверхности (рис. 2, в, г). В правой части выражения (1) представлена совокупность кинематических параметров обработки, задаваемых в соответствии с требованиями к характеристикам микрогеометрии. В левой части выражения (1) приведены динамические параметры ультразвукового пластического деформирования, выраженные через глубину деформационного отпечатка. Знак " \geq " задает условие формирования полностью нового регулярного микрорельефа без следов от предшествующей обработки.

В работе [10] для математического описания распределения напряжений в зоне обработки представлена модель напряженно-деформированного состояния. Согласно данной модели нормальные напряжения в слоях можно рассчитать по формуле:

$$\sigma_{zi} = [-\varepsilon_{li} + e_z + \Theta_x y_i] E_i, \quad (3)$$

где ε_{li} – наибольшая главная деформация расчетного слоя;

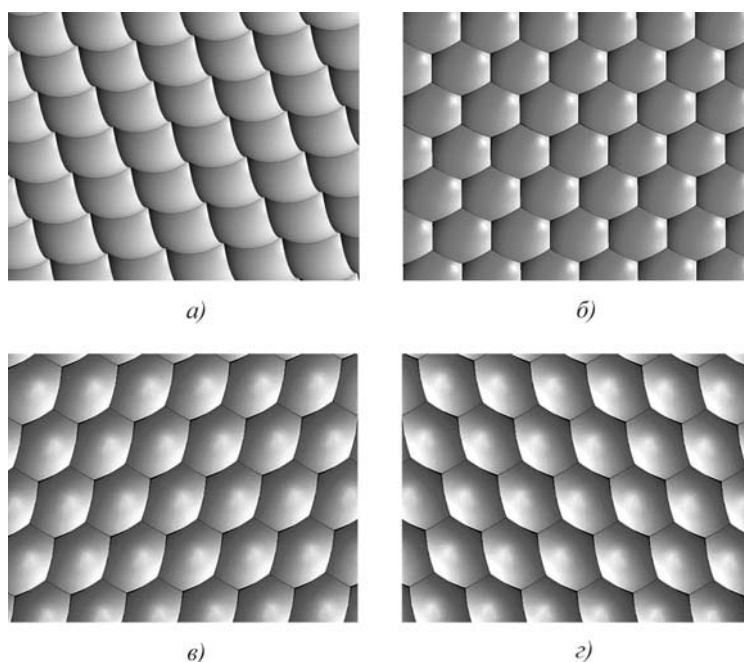


Рис. 2. Формы фрагментов регулярного микрорельефа поверхности

e_z – относительная осевая деформация;
 Θ_x – относительный угол поворота поперечных сечений, рад/м;
 y_i – ордината центра расчетного слоя, м;
 E_i – модуль упругости материала слоя, МПа.

Модель напряженно-деформированного состояния позволяет определить остаточные напряжения и глубину очага деформации после обработки ультразвуковым инструментом.

Исследование деформационного воздействия на обрабатываемый материал нельзя проводить в отрыве от изучения тепловых эффектов, возникающих в очаге деформации. Энергия, затрачиваемая на пластическую деформацию, частично поглощается металлом и сохраняется в виде дефектов кристаллического строения, частично переходит в теплоту, вызывая температурные напряжения, структурные и фазовые изменения в материале поверхностного слоя. Для количественной оценки температурного поля в зоне деформирования на различных этапах процесса и в зависимости от динамических параметров ультразвукового воздействия для конкретного обрабатываемого материала в работе [3] представлена теплофизическая модель. Согласно этой модели процесс распределения температуры в поверхностном слое можно описать выражением:

$$T(r, t) = \frac{Q(D_{пл})^2}{4a} \tilde{T}(\vartheta, F_0), \quad (4)$$

где $T(r, t)$ – температура в исследуемой точке, град;
 t – время, с;
 r – расстояние от исследуемой точки до начала координат, м;
 Q – плотность мощности тепловыделения, град/с;
 $D_{пл}$ – диаметр пластически деформированной зоны материала, м;
 a – коэффициент температуропроводности обрабатываемого материала, м²/с;

$\tilde{T}(\vartheta, F_0)$ – безразмерная температура от безразмерного радиуса ϑ при различных фиксированных значениях критерия Фурье F_0 .

Теоретически установлено и экспериментально подтверждено, что при УЗПД не наблюдается значительного прироста температуры в зоне деформирования. Поэтому расчет теплофизической задачи позволяет скорее принять решение о возможности пренебрежения температурным фактором при исследовании процессов в поверхностном слое при УЗПД.

Важной характеристикой микрорельефа является диаметр единичного отпечатка, поскольку через него можно связать динамические параметры ультразвукового воздействия с кинематическими параметрами обработки. Для выполнения условия получения пол-

ностью нового регулярного микрорельефа существует ограничение по выбору режимов обработки в зависимости от диаметра единичного отпечатка, которое может быть представлено следующим неравенством, полученным после соответствующего преобразования уравнения (1) [3]:

$$d_{отп} \geq \sqrt{\left\{ s^2 + \left[\frac{v_d(1-m)}{60f} \right]^2 \right\} \sqrt{1 + \left(\frac{mv_d}{60fs} \right)^2}}, \quad (5)$$

где $d_{отп}$ – диаметр единичного отпечатка индентора при заданных режимах обработки, мм.

Для выполнения условия формирования полностью нового регулярного микрорельефа необходимо, чтобы глубина единичного отпечатка от деформирующего элемента при УЗПД превышала высоту микронеровностей поверхности, полученную на предшествующих переходах.

Вышеописанная деформационная модель дает описание микрорельефа лишь в проекции на плоскость и не позволяет оценить его истинные параметры, такие как площадь действительной поверхности, объем единичного фрагмента, суммарный объем фрагментов микрорельефа, образующихся при наложении отпечатков инструмента при перемещении его по обрабатываемой поверхности. В связи с этим модель формирования микрорельефа при УЗПД была усовершенствована. Обработка деталей машин по токарной схеме может применяться для цилиндрических, конических, фасонных и торцовых поверхностей. Данная модель предназначена для расчета параметров микрорельефа при обработке цилиндрической поверхности.

Для упрощения математических расчетов были приняты следующие допущения:

1. Фрагменты микрорельефа, образованные перекрытием соседних отпечатков от деформатора, имеют форму его сферической части, ограниченной плоскостями, т.е. не учитывается эффект проскальзывания инструмента по вращающейся детали в процессе деформирования.

2. Прилегающую цилиндрическую поверхность в пределах одного фрагмента можно представить плоскостью (рис. 3).

3. Расчеты верны лишь при формировании полностью нового микрорельефа без следов от предшествующей обработки.

Для расчета суммарного объема элементарных отпечатков поверхность, получаемую в результате ультразвукового пластического деформирования, можно представить как совокупность участков сферы, ограниченных плоскостями.

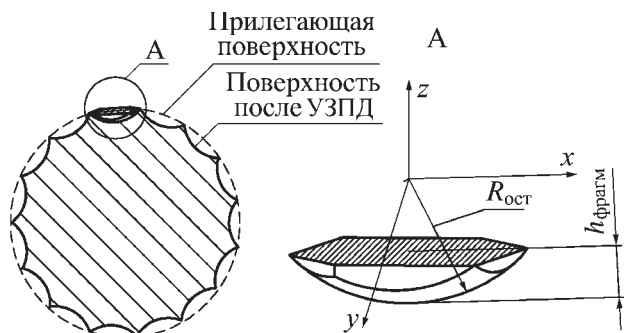


Рис. 3. Модель фрагмента регулярного микрорельефа поверхности

Суммарный объем всех фрагментов обработанной поверхности можно определить следующим образом:

$$V_{\text{пов}} = V_{\text{фрагм}} K_{\text{общ}}, \quad (6)$$

где $V_{\text{фрагм}}$ – объем единичного фрагмента, м^3 ;
 $K_{\text{общ}}$ – общее число фрагментов на поверхности,

$$K_{\text{общ}} = \frac{6 \cdot 10^4 fL}{\pi s}, \quad (7)$$

где L – длина обрабатываемой цилиндрической ступени, мм.

В общем случае объем фрагмента микрорельефа можно определить по формуле из работы [11]:

$$V_{\text{фрагм}} = \int_{x_1, y_1}^{x_2, y_2} \int_{z_1}^{z_2 = \sqrt{R^2 - x^2 - y^2}} dx dy dz, \quad (8)$$

где значения x_i, y_i представляют собой уравнения поверхностей, ограничивающих участок сферы;

z_1 – величина, равная расстоянию от плоскости, ограничивающей отпечаток до начала координат;

z_2 – уравнение сферической поверхности.

Для проверки работоспособности модели и анализа влияния параметров обработки на суммарный объем элементов микрорельефа целесообразно исследовать влияние одного отдельно взятого параметра обработки при фиксированных остальных параметрах. Основными параметрами обработки являются скорость вращения детали v , подача s , частота ультразвуковых колебаний f , амплитуда ультразвуковых колебаний A , статическое усилие $F_{\text{ст}}$, диаметр сферы деформатора D_c .

Для выбора диапазонов значений параметров обработки необходимо учесть следующее. Диаметр единичного отпечатка, определяющий выбор максимальных значений подачи и

скорости при формировании регулярного микрорельефа, зависит от амплитуды ультразвуковых колебаний, статического усилия и диаметра индентора. Однако варьирование этими параметрами ограничено возможностями технологического оборудования. В ППД используют следующие частоты ультразвуковых колебаний, кГц: 18, 44 и 66. Технически реализуемые значения амплитуды составляют 10...40 мкм.

Величина статического усилия при заданных значениях амплитуды колебаний и частоты определяет время контактирования инструмента с деталью, характеризуемое углом φ_0 (рис. 4). Угол φ_0 , определяющий начало контактирования инструмента с деталью, находится в пределах от $-\pi/4$ до $\pi/4$. Смещение φ_0 в сторону минимального значения происходит при увеличении статического усилия. Однако при достижении статического усилия значений, обеспечивающих начало контактирования на углах менее $-\pi/4$, смысл деформирования как ультразвукового исчезает, а при превышении φ_0 значения $\pi/4$ исключается физический контакт деформатора с поверхностью. Так, при амплитуде колебаний 10 мкм для обработки стали 45 максимальное усилие не должно превышать 350 Н. С увеличением амплитуды колебаний граница допустимых величин статического усилия смещается в область больших значений [3].

Диаметр деформирующего элемента определяет диаметр и глубину отпечатка. В исследованиях приняты минимальный и максимальный диаметры деформирующего элемента – 2 и 10 мм соответственно. При статическом усилии 10 Н и амплитуде 10 мкм, определенных в качестве минимальных в данном ис-

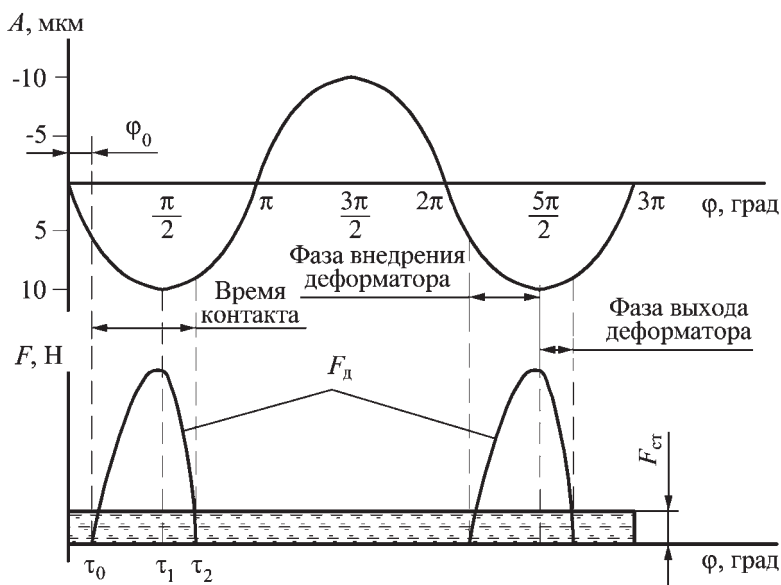


Рис. 4. Положение ударных импульсов в периодах ультразвуковых колебаний инструмента

Предельные значения параметров УЗПД для формирования регулярного микрорельефа на стали 45

Параметр	Минимальное значение	Максимальное значение
Амплитуда, мкм	10	40
Частота колебаний, кГц	18	66
Статическое усилие, Н	10	250
Диаметр индентора, мм	2	10
Подача, мм/об	0,05	0,1
Скорость вращения шпинделя, м/мин	10	120

следовании, диаметр отпечатка при минимальном диаметре индентора составит около 110 мкм. При перекрытии отпечатков получатся фрагменты размером менее 80 мкм при условии формирования полностью нового регулярного микрорельефа. В этом случае максимальное значение подачи при токарной обработке должно составлять 0,1 мм/об, а максимальная скорость вращения шпинделя – 120 м/мин.

Таким образом, учитывая способность материала к деформированию, технологические возможности оборудования и условие формирования полностью нового регулярного микрорельефа, можно определить границы значений режимов обработки. Значения предельных параметров обработки представлены в таблице.

Анализ модели формирования регулярного микрорельефа

В качестве интегральной характеристики геометрии микрорельефа был принят суммарный объем его фрагментов. Он дает представление о том, насколько развита обработанная поверхность и о том, каким образом будет происходить укладка элементов покры-

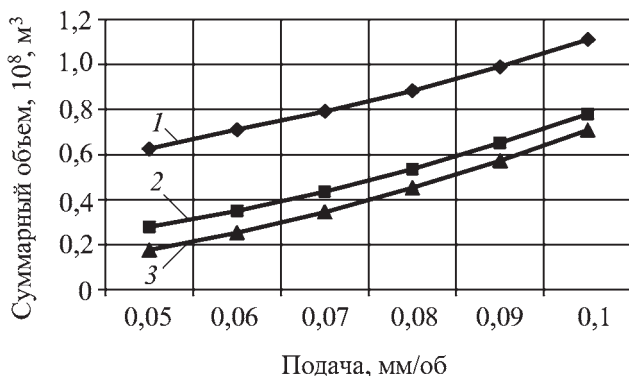


Рис. 5. Зависимость суммарного объема от скорости и подачи при $f = 18$ кГц, $A = 20$ мкм, $F_{ст} = 50$ Н, $D = 4$ мм: 1 – 100 м/мин; 2 – 50 м/мин; 3 – 10 м/мин

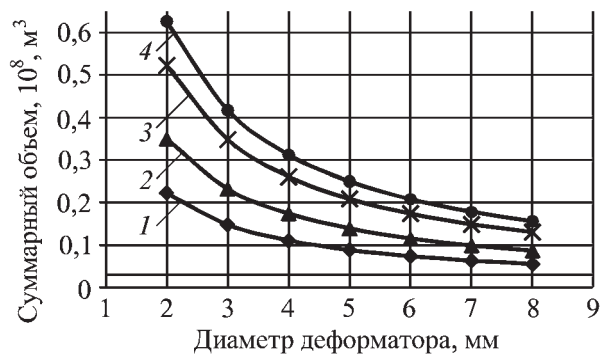


Рис. 6. Зависимость суммарного объема от диаметра деформирующего элемента при $f = 18$ кГц, $A = 20$ мкм, $F_{ст} = 50$ Н, $v = 50$ м/мин: 1 – 0,05 мм/об.; 2 – 0,07 мм/об.; 3 – 0,09 мм/об.; 4 – 0,1 мм/об

тия на данную поверхность. Зависимость суммарного объема фрагментов микрорельефа от режимов обработки представлена на рис. 5–8.

При увеличении подачи при фиксированных скоростях вращения детали, а также при увеличении скорости вращения детали суммарный объем увеличивается (рис. 5). Это объясняется увеличением размеров и, как следствие, объема единичного фрагмента при увеличении расстояния между центрами соседних ударов инструмента в направлении подачи или скорости соответственно.

При увеличении диаметра деформирующего элемента величина суммарного объема элементарных фрагментов уменьшается вследствие уменьшения глубины элементарного фрагмента (рис. 6).

При частотах 66 и 44 кГц изменение скорости вращения детали незначительно влияет на суммарный объем фрагментов поверхности в исследованном диапазоне скоростей и подач (рис. 7). При ультразвуковой частоте 18 кГц происходит наибольшее измене-



Рис. 7. Зависимость суммарного объема от ультразвуковой частоты при $A = 20$ мкм, $F_{ст} = 50$ Н, $s = 0,08$ мм/об, $D = 4$ мм: 1 – 18 кГц; 2 – 44 кГц; 3 – 66 кГц

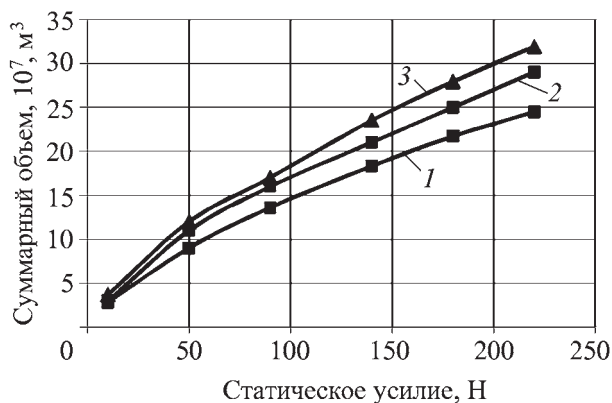


Рис. 8. Зависимость суммарного объема от статического усилия и амплитуды колебаний при $f = 18 \text{ кГц}$, $s = 0,07 \text{ мм/об}$, $v = 50 \text{ м/мин}$:

1 — 20 мкм; 2 — 30 мкм; 3 — 40 мкм

ние суммарного объема в силу увеличения размеров фрагмента микрорельефа при наименьшем перекрытии соседних отпечатков. Таким образом, наибольшая возможность варьирования величиной суммарного объема фрагментов микрорельефа в технологически приемлемом диапазоне режимов представляется при ультразвуковой частоте 18 кГц. Так, если требуемый суммарный объем фрагментов на цилиндрической поверхности ($D = 50 \text{ мм}$, $L = 80 \text{ мм}$) при частоте 18 кГц достигается при скорости вращения детали 110 м/мин, то, чтобы получить такой же суммарный объем при 44 кГц, необходимо задать скорость вращения детали 210 м/мин. При 66 кГц скорость вращения детали должна быть равна 315 м/мин.

При увеличении как статического усилия, так и амплитуды колебаний суммарный объем фрагментов микрорельефа увеличивается вследствие увеличения размеров единичного отпечатка (рис. 8). Наибольшая возможность варьирования суммарным объемом представляется при максимальном значении амплитуды на всем диапазоне значений статического усилия, следовательно, при обработке хрупких материалов и нежестких деталей и необходимости получения развитого микрорельефа следует увеличивать в первую очередь значение амплитуды и частоты ультразвуковых колебаний (динамических параметров процесса).

Заключение

На основе исследования влияния режимов обработки на суммарный объем элементов микрорельефа с использованием модели его формирования, можно сделать вывод, что модель дает объяснимые и адекватные зависимости и значения, следовательно, она

может быть применена для оценки геометрических параметров микрорельефа поверхности при ультразвуковом пластическом деформировании.

Моделирование дает возможность управлять такими параметрами микрорельефа, как форма элементов микрорельефа, число элементов регулярного микрорельефа на 1 мм^2 в диапазоне 300...2500, глубина фрагментов микрорельефа в диапазоне 1,5...63 мкм, суммарный объем элементов микрорельефа на цилиндрической поверхности ($D = 50 \text{ мм}$, $L = 80 \text{ мм}$) в диапазоне $10^{-9} \dots 4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^3$.

Управление геометрическими параметрами микрорельефа в широком диапазоне позволяет влиять на качество покрытия. В зависимости от размеров частиц материала покрытия возможны различные варианты заполнения его фрагментов. Кроме того, можно влиять на равномерность нанесения покрытия по толщине. Производительность процесса формирования регулярного микрорельефа достаточно высока: при диаметре детали до 200 мм может достигать $12 \cdot 10^3 \text{ мм}^2/\text{мин}$.

Однако в данной работе рассмотрено лишь влияние геометрических характеристик подложки на адгезионные свойства покрытия. Для дальнейшего изучения вопросов подготовки деталей машин перед нанесением покрытия с использованием метода ультразвукового пластического деформирования необходимо рассмотреть проблему влияния напряженно-деформированного состояния поверхности подложки на адгезионную прочность.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Куксенова Л.И., Лаптева В.Г., Мичугина М.С. Оценка трибологической эффективности азотированных слоев конструкционных сталей / Наука и образование: электронное научно-техническое издание. Эл № ФС 77 — 30569. Государственная регистрация № 0420900025. Режим доступа: <http://technomag.edu.ru/doc/89481.html>
2. Баряня А.Г. Применение специальных наплавов, покрытий и технологий упрочнения для повышения износостойкости ножей кутеров: сб. науч. тр. Серия "Естественно-научная". Ставрополь: СевКавГТУ, 2004. № 1 (7).
3. Солоненко О.П., Алхимов А.П., Рахмянов Х.М. и др. Высокоэнергетические процессы обработки материалов / Новосибирск: Наука. Сибирская издательская фирма РАН, 2000. Т. 18. 425 с.
4. Технологические процессы поверхностного пластического деформирования / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2007. 404 с.: ил.
5. Харламов Ю.А. Газотермическое напыление покрытий и экологичность производства, эксплуатации и ремонта машин // Тяжелое машиностроение. 2000. № 2. С. 10–13.
6. Тополянский П.А. Исследование адгезионных свойств и механизма образования покрытия, наносимого методом финишного плазменного упрочнения. Технологии ремонта, восстановления и упрочнения деталей машин, механиз-

мов, оборудования, инструмента и технологической оснастки. Материалы 7-й Международной практической конференции-выставки 12–15 апреля 2005 г. Санкт-Петербург. Изд. СПбГПУ, 2005. С. 316–333.

7. Хлуденьков В.Н., Шоркин В.С. Влияние геометрической формы поверхности детали на прочность сцепления покрытия с основой // Упрочняющие технологии и покрытия. 2009. № 1. С. 17–20.

8. Шнейдер Ю.Г. Эксплуатационные свойства деталей с регулярным микрорельефом. 2-е изд., перераб. и доп. Л.: Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1982. 248 с.: ил.

9. Попов В.А., Кобелев А.Г., Чернышев В.Н. Нанопорошки в производстве композитов / М.: Интернет Инжиниринг, 2007. 336 с.

10. Рахимьянов Х.М., Никитин Ю.В. Прогнозирование состояния материала в очаге деформации при ультразвуковом поверхностном пластическом деформировании / Упрочняющие технологии и покрытия. М.: Изд-во Машиностроение, 2005. № 4. С. 41–46.

11. Зимица О.В., Кириллов А.И., Сальникова Т.А. Высшая математика / под ред. А.И. Кириллова. 3-е изд., испр. М.: Физматлит, 2005. 368 с.

УДК 539.4.014.13

И.Г. Шин (Ташкентский институт текстильной и легкой промышленности)
E-mail: dimashin@list.ru

Интенсивность остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании деталей машин

Приведен алгоритм расчета интенсивности технологических остаточных напряжений при поверхностном пластическом деформировании валов пильного цилиндра машин первичной обработки хлопка. В основу расчета положена структурно-энергетическая модель формирования качества поверхностного слоя, построенная на базовых положениях теории дислокаций и термодинамики контактного взаимодействия деформирующего инструмента с деталью.

Ключевые слова: скрытая энергия, остаточные напряжения, глубина наклепа, интенсивность напряжения, обкатывание, выглаживание, поверхностный слой, вал пильного цилиндра.

In article the algorithm of calculation of intensity of technological residual pressure is resulted at superficial plastic deformation of working shaft of cars of a preprocessing of a clap. In calculation bases it is necessary structurally-power model of formation of quality of the blanket, constructed on base positions of the theory of dispositions and thermodynamics of contact interaction of the deforming tool with a detail.

Keywords: latent energy, residual pressures, depth of hardening, intensity of pressure, running in, burnishing blanket, working shaft.

Скрытая (запасенная) энергия пластической деформации, представляющая энергию искажений кристаллической решетки металла, является главным информативным и интегральным параметром для оценки остаточного напряженного состояния в поверхностном слое деталей машин. На основе структурно-энергетической модели [1] получены соотношения, позволяющие определить удельную запасенную энергию $\Delta U_d^c = U_s$ из анализа термодинамики контактного взаимодействия инструмента с деталью, элементов теории дислокаций и диаграммы деформирования обрабатываемого материала.

Для расчета скрытой энергии деформации ΔU_d^c использованы зависимости удельной энергии (работы) деформации, определяемые с помощью компонент тензора напряжений в функции от координат рассматриваемых слоев деформируемого материала. Поэтому можно утверждать, что $\Delta U_d^c = U_s$ соответствует определенным слоям материала, а следовательно, и удель-

ной энергии остаточного поля напряжений. Таким образом, представляется возможным рассчитать интенсивность остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ по модифицированной формуле Фриделя:

$$\sigma = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{2}} \sqrt{U_s}, \text{ Н/мм}^2, \quad (1)$$

где E – модуль упругости, Н/мм²;

μ – коэффициент Пуассона;

U_s – удельная запасенная энергия, Дж/мм³.

Алгоритм расчета интенсивности технологических остаточных напряжений $\sigma_{\text{ост}}$ включает следующие этапы.

1. Расчет глубины наклепа

$$h_n = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}, \text{ мм}, \quad (2)$$

где $m = 1 + 0,07R$, R – приведенный радиус кривизны контактирующих тел, где $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}$.

С достаточной для практики точностью можно принять $h_n \approx 1,5d_0$, где d_0 – диаметр отпечатка шарика, $d_0 = \frac{h_n}{1,5}$.

2. Определение интенсивности напряжений σ_i по предварительно рассчитанному давлению p_0 в центре круговой площадки

$$p_0 = \frac{3P}{2\pi d^2}, \text{ Н/мм}^2; \quad (3)$$

$$\sigma_i = p_0 \left[\frac{3}{2 \left(1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right)} - (1 + \mu) \left(1 - \frac{z}{a} \arctg \frac{a}{z} \right) \right], \text{ Н/мм}^2. \quad (4)$$

3. Расчет удельной запасенной энергии по формуле, основывающейся на теории дислокаций:

$$U_s = \frac{(\sigma_i - \sigma_T)^2}{4\pi(1-\mu)G\alpha^2} \ln \left(\frac{G\alpha}{\sigma_i - \sigma_T} \right), \quad (5)$$

где G – модуль сдвига;

α – численный коэффициент, равный 0,2...1,0 в зависимости от механизма упрочнения; $\alpha = 0,8$ при статически независимом распределении препятствий.

4. Определение интенсивности технологических остаточных напряжений

$$\sigma_{i\text{ост}} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{2}} \sqrt{U_s}, \text{ Н/мм}^2. \quad (6)$$

Для плоского остаточного напряженного состояния

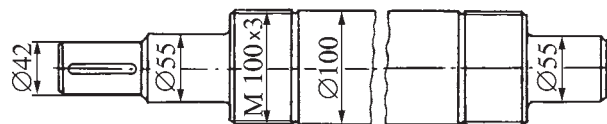
$$\sigma_{i\text{ост}} = \sqrt{(\sigma_{1\text{ост}}^2 - \sigma_{1\text{ост}})(\sigma_{2\text{ост}} + \sigma_{2\text{ост}}^2)}, \quad (7)$$

где $\sigma_{1\text{ост}}$, $\sigma_{2\text{ост}}$ – главные остаточные напряжения. Из приведенной зависимости следует, что справедливо следующее соотношение:

$$|\sigma_{\text{ост}}^{\min}| < \sigma_{i\text{ост}} < |\sigma_{\text{ост}}^{\max}|. \quad (8)$$

Таким образом, важность результатов расчета $\sigma_{i\text{ост}}$ состоит в том, что его значение указывает уровень технологических остаточных напряжений и в дальнейшем может быть использовано в расчетной практике для прогнозирования усталостной прочности в качестве главного напряжения.

Ниже приведен расчет глубины наклепа h_n и интенсивности остаточных напряжений $\sigma_{i\text{ост}}$ при алмазном выглаживании цапф вала (рисунок) пильного цилиндра волоконноочистительной машины.



Сплошной вал пильного цилиндра волоконноочистительной машины

Материал вала – низкоуглеродистая качественная сталь 20 в нормализованном состоянии, $\sigma_B = 380...460$ МПа, $\sigma_{0,2} = 230...280$ МПа, 113...135 НВ, $\delta = 23...27$ %.

Выглаживание проводили инденторами из синтетического алмаза типа АСПК (алмаз синтетический поликристаллический типа карбонадо) с радиусом сферы $R_1 = 1,5...3$ мм. Усилие $P = 50...250$ Н, подача $s = 0,05$ мм/об. Обработку осуществляли при числе рабочих ходов $n_{р.х} = 1$ с применением в качестве СОЖ индустриального масла И-20А. Диаметр цапфы вала 55 мм. Окружная скорость вала $v = 50...100$ м/мин.

1. Расчет глубины наклепа

$$h_n = \frac{1}{m} \sqrt{\frac{P}{2\sigma_T}}; m = 1 + 0,07R,$$

где $\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} = \frac{1}{2} + \frac{1}{27,5} = \frac{29,5}{45}$; $R = 1,53$ мм,

$$m = 1 + (0,07 \cdot 1,53) = 1,107;$$

$$h_n = \frac{1}{1,107} \sqrt{\frac{100}{2 \cdot 250}} = 0,404 \text{ мм.}$$

Радиус отпечатка $a = \frac{h_n}{3} = \frac{0,404}{3} = 0,135$ мм.

2. Интенсивность напряжений σ_i и давление p_0 :

$$p_0 = \frac{3}{2} \frac{P}{\pi d^2} = \frac{3 \cdot 100}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,135^2} = 2741 \text{ Н/мм}^2;$$

$$\sigma_i = p_0 \left[\frac{3}{2 \left(1 + \left(\frac{z}{a} \right)^2 \right)} - (1 + \mu) \left(1 - \frac{z}{a} \arctg \frac{a}{z} \right) \right] = 970 \text{ Н/мм}^2.$$

На глубине поверхностного слоя $z = 0,01$ мм $\sigma_i = 970$ Н/мм².

3. Уровень запасенной энергии

$$U_s = \frac{(\sigma_i - \sigma_{0,2})^2}{4\pi(1-\mu)G\alpha^2} \ln \left(\frac{G\alpha}{\sigma_i - \sigma_{0,2}} \right) = 5,27 \text{ Н/мм}^2 = 0,00527 \text{ Дж/мм}^3.$$

4. Интенсивность остаточных напряжений

$$\sigma_{\text{ост}} = \frac{1}{1+\mu} \sqrt{\frac{E}{2}} \sqrt{U_s} =$$

$$= \frac{1}{1+0,25} \sqrt{\frac{2 \cdot 10^5}{2}} \sqrt{5,27} = 581 \text{ Н/мм}^2.$$

Таким образом, алмазное выглаживание опорных участков вала диаметром 55 мм пильного цилиндра волоконноочистительной машины создает интенсивность остаточных макронапряжений $\sigma_{\text{ост}} = 581 \text{ Н/мм}^2$, находящихся в диапазоне

$$|\sigma_{1\text{ост}}| < 581 < |\sigma_{2\text{ост}}|.$$

Сжимающие остаточные напряжения, формируемые при алмазном выглаживании, особенно полезны для участков вала с концентраторами напряжений. В данном случае это переходный участок с резьбовой части вала (М100×3) на посадочное место шарикоподшипника диаметром 55 мм. Повышенная концентрация напряжений вызвана резким перепадом значений диаметров вала, поэтому упрочняющая технология при изготовлении валов пильного цилиндра хлопковых машин необходима и обеспечивает повышение эксплуатационных свойств (износостойкости и усталостной прочности).

Обработка цапф вала пильного цилиндра методом поверхностного пластического деформирования (обкатывание шариком или алмазное выглаживание) приводит к формированию сжимающих остаточных напряжений в поверхностном слое. Эти напряжения учитываются сложением с напряжениями от рабочих нагрузок, если элементы конструкции работают в области упругих деформаций.

Благоприятное влияние сжимающих остаточных напряжений на усталостную прочность вала проявляется в уменьшении предельной амплитуды цикла нагружения σ_a . Положительное влияние сжимающих остаточных напряжений в цапфе вала сказывается и на работе подшипников качения, когда внутреннее кольцо подшипника устанавливается на опорный участок по переходной или посадке с натягом, создавая напряженное состояние.

Сжимающие остаточные напряжения в поверхностном слое цапфы обеспечивают надежное соединение внутреннего кольца подшипника с валом и способствуют большему сопротивлению раскрытию стыка по контактной цилиндрической поверхности при изгибе вала в эксплуатационных условиях. Одновременно увеличивается износостойкость посадочной поверхности вала из-за отсутствия относительных радиальных и осевых смещений кольца подшипника.

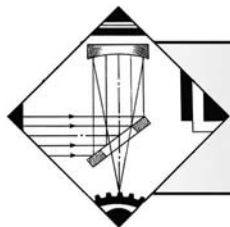
Действие сжимающих остаточных напряжений на напряженное состояние в конструкции вала аналогично воздействию искусственно создаваемых сжимающих напряжений под действием продольных усилий, приложенных по торцам вала. В дальнейшем при эксплуатационных условиях суперпозиция сжимающих остаточных напряжений на изгибные напряжения приводит к снижению напряжений в растянутой зоне и увеличению в сжатой. Поэтому характеристики цикла изменения напряжений в цапфе вала становятся меньше. Необходимо также отметить, что основной конструкционный материал (сталь, в особенности чугун) лучше работает на сжатие, чем на растяжение.

Выводы

Предложен метод аналитического расчета параметров процесса упрочнения опорных участков вала пильного цилиндра хлопковых машин. Определение технологических остаточных напряжений в поверхностном слое изделий на этапе проектирования и изготовления валов позволит прогнозировать эксплуатационные характеристики в зависимости от физико-механических свойств и режимов упрочнения материалов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Джураев А.Д., Шин И.Г. Структурно-энергетическая модель формирования технологических остаточных напряжений в поверхностном слое деталей // Проблемные вопросы механики и машиностроения: тез. докл. Ташкент, 1993. С. 179.



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

УДК 621.9.048

А.Д. Верхотуров, С.В. Николенко (Институт материаловедения ХНЦ ДВО РАН)
E-mail: nikola1960@mail.ru

Классификация. Разработка и создание электродных материалов для электроискрового легирования

Разработана классификация электродных материалов, используемых в зависимости от их физико-химической природы, на основании обобщения результатов выполненных исследований и опыта применения различных классов материалов в технологии электроискрового легирования. Установлены научные принципы создания электродных материалов на основе тугоплавких соединений.

Ключевые слова: электроискровое легирование, классификация электродных материалов, научные принципы создания электродных материалов, самофлюсующиеся добавки, минеральные ассоциации, эффективность процесса формирования покрытий.

On the basis of generalisation of results of the executed researches and experience of application of various classes of materials in technology electrospark alloying classification of the electrode materials used depending on their physical and chemical nature is developed. Scientific principles of creation of electrode materials on the basis of refractory connections are established.

Keywords: electrospark alloying, classification of electrode materials, scientific principles of creation of electrode materials, self-fluxing additives, mineral associations, efficiency of process of formation of coverings.

Введение

В настоящее время техника располагает многочисленными методами изменения физико-химических и эксплуатационных свойств металлических поверхностей в заданном направлении, каждый из которых имеет свои оптимальные области применения. К числу **современных методов упрочнения** и нанесения защитных покрытий относится *электроискровое легирование* (ЭИЛ). К достоинствам метода ЭИЛ относятся: возможность нанесения на обрабатываемую поверхность компактным электродом любых токопроводящих материалов и не токопроводящих порошковых материалов; высокая прочность сцепления наносимого слоя с материалом основы; низкая энергоемкость процесса (0,5...1 кВт); простота осуществления технологических операций.

Вопросам воздействия на поверхность металлов и сплавов низковольтных электрических разрядов в научной литературе уделяется большое внимание. Изданы монографии [1–4], посвященные технологии ЭИЛ металлических поверхностей.

Наряду с этим одной из важнейших проблем в области использования ЭИЛ является разработка специальных электродных материалов, обеспечивающих

получение качественного *легированного слоя* (ЛС) с требуемым уровнем физико-химических и эксплуатационных свойств.

В настоящее время на практике в качестве легирующего электрода применяют преимущественно твердые сплавы на основе карбидов вольфрама и титана, однако они не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электродным материалам для ЭИЛ в связи с их высокой эрозионной стойкостью и большой стоимостью. Для большей эффективности и масштабы применения электроискровых покрытий требуется создание специальных электродных материалов с учетом специфики их поведения в условиях искрового разряда.

Исследования в области электродного материаловедения до работ Г.В. Самсонова и А.Д. Верхотурова носили разрозненный, несистематичный характер, не были разработаны критерии выбора и принципы создания электродных материалов. Однако эксперименты и этих исследователей не исчерпали проблему разработки выбора и создания новых композиционных материалов, особенно получения высокоэффективных электродных материалов с низкой стоимостью, а также для получения качественного легированного слоя с высокими физико-химическими и эксплуата-

ционными свойствами. Особо необходимо отметить перспективность работ по созданию электродных материалов, содержащих в качестве добавок к матрице самофлюсующихся материалов, а также веществ, образующих защитную атмосферу, стабилизирующих искровой разряд в процессе ЭИЛ [5].

Цель работы – разработка научных основ создания электродных материалов для электроискрового легирования.

Электродные материалы, используемые при электроискровом легировании

Исследователи используют широкий спектр электродных материалов, в основном тугоплавких соединений (рис. 1, табл. 1).

Для ЭИЛ статей применяют преимущественно сплавы типа ВК и ТК. До последнего времени в литературе отсутствовали критерии выбора состава электродного материала из твердых сплавов, основанные на исследовании взаимосвязи их состава, структуры, свойств и технологии.

Единственным интуитивным обоснованием выбора твердых сплавов является их повышенная твердость и износостойкость по сравнению с упрочняемым материалом. Хотя эти сплавы существенно отличаются по механическим характеристикам, химическому составу, структуре, тем не менее до начала работ Г.В. Самсонова и А.Д. Верхотурова [6] никто из исследователей не акцентировал на этом внимание и не пытался установить взаимосвязь этих свойств, оп-

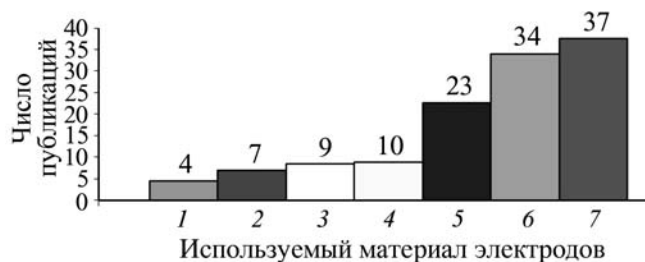


Рис. 1. Гистограмма числа научных публикаций в зависимости от используемых материалов электродов:

1 – бронзы; 2 – карбиды, бориды, нитриды; 3 – графит; 4 – легкоплавкие металлы; 5 – тугоплавкие металлы; 6 – твердые сплавы WC+TiC+Co; 7 – твердые сплавы WC+Co

ределяемых природой материала легирующего электрода, с условиями формирования легированного слоя и его характеристиками. Если критерий твердости легирующего электрода можно с большими ограничениями считать приемлемым для получения износостойких покрытий, то его использование применительно к покрытиям специального назначения (жаростойким, коррозионно-стойким и т.д.) непригодно.

Следует отметить, что одним из недостатков метода ЭИЛ является сравнительно низкая производительность процесса, недостаточная сплошность покрытий. В этом отношении твердые сплавы на основе карбида вольфрама сравнительно неэффективны в связи с их высокой эрозийной стойкостью.

Таблица 1

Электродные материалы, используемые при ЭИЛ металлических поверхностей

Материал		Назначение легированного слоя
легирующего электрода	катода	
Al	Al, Cu, стали Ст3, У10А, ХВГ, ВТО	Повышение коррозионной стойкости, повышение жаростойкости, повышение износостойкости
Cu	Al, Cu, стали Ст3, Х18Н10Т	Повышение коррозионной стойкости, повышение стойкости металлургического оборудования, повышение работоспособности электрических контактов
Cr	Стали 30, 45, 40Х, У10А, ХВГ, ВТ2, Cu	Повышение износостойкости, повышение жаростойкости, повышение стойкости режущего инструмента
Графит	Стали Р18, 65Г, Т15К6	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости штамповой оснастки
Mo, W	Стали 30, 45, У10А, ХВГ	Повышение износостойкости, повышение коррозионной стойкости
Ag	Cu, Д16Т, 35ХН3Ф, ВТ6А	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение работоспособности электрических контактов
FeCr	Стали 35, 45, У8А, Х12М, 40Х, 4ХИ2С	Повышение износостойкости, повышение стойкости металлургического оборудования, повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости штамповой оснастки

Окончание табл. 1

Материал		Назначение легированного слоя
легирующего электрода	катода	
TiC, TiB ₂	Стали У8А, Р18, Р6М5, 65Г	Повышение износостойкости, повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования
Бронзы БрБ2, БрАЖНЦ-9	Чугун, стали 45, Р18, Х12Ф1, 2Х13	Повышение износостойкости
ВК2	Стали 45, Р6М5, 5ХНТ	Повышение износостойкости, повышение стойкости штамповой оснастки
ВК3	Стали 45, У7, 65Г, Р18, Р6М5, Т15К6	Повышение износостойкости, повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования, повышение стойкости штамповой оснастки, повышение стойкости режущего инструмента
ВК6, ВК6М	Стали Ст2, 45, У7, Р6М5	Повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования, повышение стойкости режущего инструмента
ВК8	Стали 45, У7, 9ХС, У8, 40Х, 4ХГС, 1Х18Н9Т, Р6М3, Р6М5, Х12М	Повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования, повышение стойкости металлургического оборудования, повышение стойкости режущего инструмента
ВК15	Стали У8, Р6М5	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости штамповой оснастки
Т5К10	Стали 45, Р6М5, Р6М3	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования
Т14К8	Сталь 2Х13	Повышение износостойкости
Т15К6	Стали 45, У7, У8, Р6М5, Р18, 9ХС, ХВГ, 1Х18Н9Т, 65Г, ВЖЛ-2, чугун	Повышение износостойкости, повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости металлургического оборудования, повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования
Т30К4	Стали 15, У8, 40Х, Р18, Р6М5, Т15К6	То же
WC-Co-B	Сталь 45	Повышение стойкости режущего инструмента
WC-Co-Ni ₃ Al WC-Co-Ni-Cr-B-Si	Сталь 45	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости штамповой оснастки
WC-Co-ДТК	Сталь Х12Ф1	То же
WB, W ₂ B ₃	Сталь 45	Повышение износостойкости, повышение стойкости сельскохозяйственного оборудования
TiC-Ni-Mo-ДТК	Стали 45, Х12Ф1	Повышение стойкости режущего инструмента, повышение стойкости штамповой оснастки
LaB ₆	Стали У8, Ст3, Мо	Повышение стойкости режущего инструмента
TiN, ZrN, HfN, AlN, Si ₃ N ₄	Сталь 45, Ст3, Мо	То же

При этом твердость легированного слоя при ЭИЛ твердыми сплавами в некоторых случаях может быть соизмерима с твердостью слоя, полученного ЭИЛ металлами и графитом. В литературе имеются также сведения об использовании других электродных материалов для ЭИЛ – графита, феррохрома, хрома, карбидов, боридов, нитридов титана, циркония, гафния и кремния и т.д. Однако эти сведения ограничены, отрывочны, не проанализированы в сравнении с данными для карбидо-вольфрамовых твердых сплавов и, наконец, не содержат результатов изучения условий формирования ЛС и их взаимосвязи с параметрами процесса ЭИЛ.

Классификация электродных материалов

Одной из причин, ограничивающих научно обоснованный выбор электродных материалов (ЭМ), является отсутствие их классификации. На основе предложенных классификаций видов ЭИЛ [7] и обобщенной модели процесса электродные материалы можно классифицировать по типу химической связи, назначению легированного слоя, материалу катода, виду ЭИЛ, геометрической форме электродов.

Наличие ковалентной связи в материале в условиях циклических нагрузок препятствует релаксации напряжений и вызывает возникновение трещин в поверхностных слоях анода и их последующее хрупкое

разрушение, характеризующее эрозию в твердой фазе. Поэтому для металлоковалентных переходных металлов и их соединений с бором, углеродом и азотом целесообразно принять в качестве фактора, определяющего эрозию при импульсных нагрузках, изменение доли ковалентной компоненты химической связи. Ее характеристикой может быть критерий степени направленности связи α^* [8], который характеризует сопротивление кристаллической решетки движению дислокаций. Поэтому по типу химической связи электродные материалы подразделяются на две группы: со слабой направленностью межатомных связей ($\alpha^* \leq 1$) и с высокой степенью ковалентности межатомного взаимодействия ($\alpha^* > 1$).

Первую группу материалов, для которых $\alpha^* \leq 1$, представляют в основном металлы. Металлы, в свою очередь, подразделяются на образующие неограниченные твердые растворы с материалом катода или образующие ограниченные твердые растворы, а также имеющие температуру хладноломкости больше или меньше температуры окружающей среды (20 °С). Материалы второй группы, для которых $\alpha^* > 1$, представляют графит, а также интерметаллиды и тугоплавкие соединения. К ним относятся: интерметал-

лиды TiAl, NiAl, Ni₃Al; карбиды переходных металлов IV–VI групп; бориды переходных металлов IV–VI групп; нитриды переходных металлов IV–VI групп; сплавы на основе карбидов, боридов, нитридов переходных металлов.

Индивидуальные тугоплавкие соединения не находят практического применения для ЭИЛ в связи с высокой хрупкостью и низким коэффициентом переноса материала и используются в основном как модельные объекты для исследования. Практический интерес представляют сплавы на основе тугоплавких соединений с пластическими добавками (Ni, Co, Fe, V, Cr, Mo), образующими твердые растворы с материалом катода, а также интерметаллиды с низким значением температуры хладноломкости.

По назначению ЛС электродные материалы подразделяются на материалы, предназначенные для повышения износостойкости, жаростойкости, коррозионной стойкости, электропроводности, эмиссионной способности.

По материалу катода электродные материалы подразделяются на пять групп: для упрочнения сталей, чугунов, металлов, титановых сплавов, алюминиевых сплавов и твердых сплавов.

Для упрочнения сталей и металлов используют преимущественно твердые сплавы на основе карби-

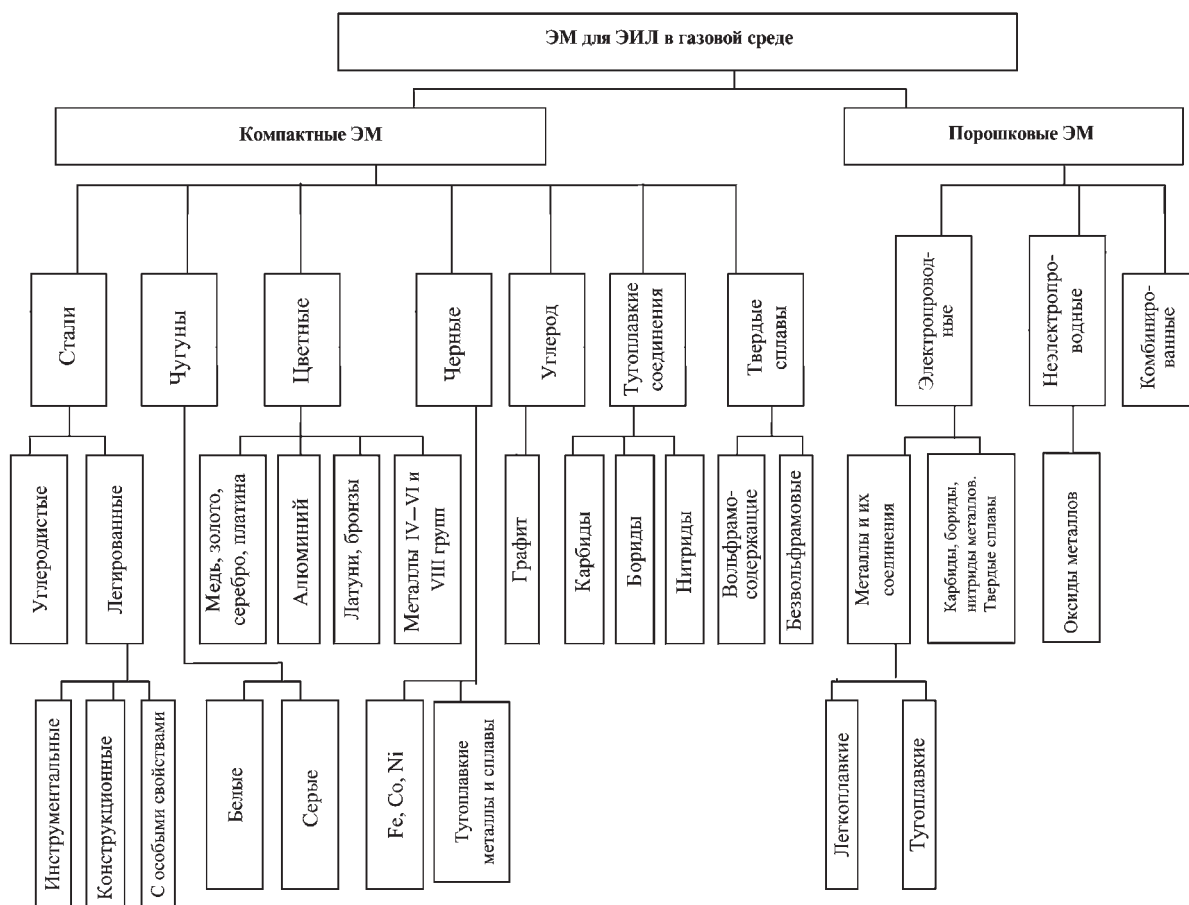


Рис. 2. Классификация электродных материалов, используемых при ЭИЛ, в зависимости от их физико-химической природы

дов вольфрама и титана. Для легирования титановых сплавов – Cr, Ni, интерметаллиды NiAl, TiAl, NiCr, Ni₃Al. Для ЭИЛ алюминиевых сплавов – Fe, Ni, Cu и сплавы на основе меди.

На рис. 2 представлена схема классификации электродных материалов, используемых для ЭИЛ в зависимости от их физико-химической природы.

Физико-химические критерии создания электродных материалов для электроискрового легирования

Традиционно в качестве материала легирующего электрода преимущественно используют твердые сплавы марок ТК и ВК. Эти сплавы не всегда удовлетворяют требованиям, предъявляемым к электродным материалам для ЭИЛ, в связи с их высокой эрозийной стойкостью и, соответственно, сравнительно низким коэффициентом переноса.

Главная причина нерациональности использования твердых сплавов – возрастающая дефицитность вольфрама, что остро ставит вопрос о замене стандартных твердых сплавов безвольфрамовыми. Анализ литературных данных по физико-механическим

свойствам электроискровых покрытий показывает (табл. 2), что индивидуальные тугоплавкие соединения в сравнении с твердыми сплавами конкурентоспособны в отношении твердости получаемых из них покрытий, но уступают им по толщине и износостойкости покрытия из-за повышенной хрупкости. Для снижения хрупкости тугоплавкого соединения вводят пластифицирующие добавки, например кобальт и карбид вольфрама в сплавах ВК. Поэтому электродный материал, как правило, является гетерофазным и представляет сложную многокомпонентную систему.

В процессе ЭИЛ под влиянием термомеханического воздействия искрового разряда происходит эрозия материала анода в жидкой, твердой и паровой фазах, а также перенос продуктов эрозии на катод, на поверхности которого в результате микрометаллургических процессов образуется своеобразный композиционный материал. В его состав входят материалы обоих электродов, продуктов их взаимодействия друг с другом и с элементами межэлектродной среды. Поэтому должна существовать общность в закономерностях формирования легированного слоя и образования композиционных материалов.

Таблица 2

Электродные материалы на основе тугоплавких соединений

Марка твердого сплава	Материал катода	Тип установки	Мощность режима, Дж	Время обработки, мин/см ²	Твердость, ГПа	Повышение износостойкости, %	Толщина покрытия, мкм	Параметр шероховатости, R _z , мкм
ВК3	ПФ1, Р6М5	ЭАИ-1	0,93	5	14...15	858	65...70	–
ВК6М	Сталь 45; 9ХС, Х12М	ЭФИ-46А	0,3...0,9	5	–	700	–	–
		ЭФИ-Элитрон		4...9	15...16	750	50...60	–
ВК8	Х12Ф1	ЭФИ-46	0,93	2...3	10,2	250	50	25...30
		Элитрон-22А	1,39	2...3	11...12	300	40...50	25...30
ВК15	Р6М5	ЭФИ-4	3,0	3...5	22	–	40	–
ВК20	Р6М5	ЭФИ-4	0,12	5...10	22	–	40	–
Т15К6	Сталь 45;	ЭФИ-68	–	5...6	16	–	До 3000	–
	Сталь 45;	УПР-3М	0,5	10...15	16...8	800	–	50...60
	Сталь 45;	ЭФИ-46А	–	–	–	300	–	50...65
	Х12Ф1	ЭФИ-46	0,28	2...3	8,2	260	40...45	20
Т30К4	Сталь 45	УПР-3М	0,12	3...5	–	800	–	25...30
TiC	Сталь 45	ЭФИ-46А	0,12	5...6	6,2	–	40...50	–
ZrC	Сталь 45	ЭФИ-46А	0,12	5...6	11,5	–	30	–
NbC	Стали 45, У8	ЭФИ-46А	0,3...0,9	–	17...8,2	–	5...50	–
WC	Сталь У8	ЭФИ-46А	0,3...0,9	–	28	700	–	–
WB, W ₂ B ₅	Сталь 45, Х12Ф1	Разряд-3М	3...27	1...2	24,7...32,56	200...500	До 2000	–

Так, при создании твердых сплавов принцип взаимной растворимости компонентов являлся одним из основных [9]. В полном соответствии с этим принципом условия формирования электроискрового покрытия наиболее благоприятны в случае образования материалами электродов неограниченных твердых растворов или интерметаллидов с низкой температурой хладноломкости [2, 4, 6].

На рис. 3 представлена зависимость адгезионной (1) и когезионной (2) прочности от остаточных напряжений первого рода в покрытии, полученном ЭИЛ стали Ст3 переходными металлами. Для металлов с неограниченной растворимостью в железе (Ni, Cr, V) достигается максимальная толщина покрытия при минимальной величине остаточных напряжений в нем. Поэтому особенность создания материала электрода для ЭИЛ состоит в необходимости учета физико-химических свойств материала катода. Именно по этой причине эффективность формирования покрытия из одного и того же материала оказывается разной при обработке различных сталей.

Главная задача при создании электродных материалов состоит в том, чтобы увеличить по возможности вклад жидкой фазы в эффект эрозии, так как реакционная способность жидкостей значительно выше, чем твердой фазы.

По этой причине продукты твердофазной составляющей эрозии практически не закрепляются на поверхности катода, благодаря чему коэффициент переноса и толщина покрытия оказываются низкими для хрупких материалов.

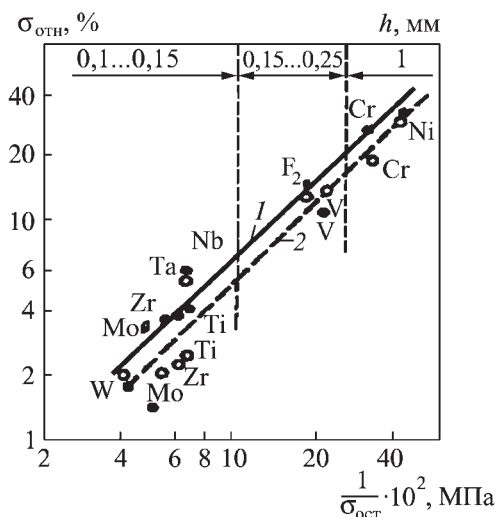


Рис. 3. Зависимость адгезионной (1), когезионной (2) прочности и максимально достижимых толщин слоя (h) от остаточных напряжений первого рода в покрытии:

$$1 - \sigma_{сц}/\sigma_{ост}; \quad 2 - \tau_{ср}/\tau_{ост}$$

Существует несколько путей варьирования соотношением жидко-паровой и твердой составляющих эрозии с целью увеличить вклад жидкой составляющей.

1) Введение пластифицирующей фазы для снижения внутренних напряжений, возникающих в материале электрода под действием циклических тепловых и механических нагрузок искрового разряда.

Для достижения высокой прочности сцепления покрытия с подложкой и эффективного формирования легированного слоя должна соблюдаться определенная взаимосвязь физико-химических свойств материалов электродов, а именно компоненты пластической связки легирующего сплава должны образовывать с материалом катода твердые растворы или интерметаллиды с низкой температурой хладноломкости, а также смачивать материал катода и иметь близкий с ним коэффициент термического расширения. Материал связки должен также смачивать тугоплавкую фазу композита, поскольку в этом случае эродируемая частица материала матрицы обволакивается легкоплавкой компонентой, что обеспечивает хорошее ее сцепление с легируемой поверхностью.

2) Обеспечение оптимального содержания пластической связки, зависящего от физико-химической природы компонентов легирующего сплава и от назначения покрытия.

В случае когда материал связки не смачивает тугоплавкую фазу композита, оптимальное содержание пластической связки тем больше, чем выше степень ковалентности межатомной связи тугоплавкого соединения [6].

В случае когда материал связки смачивает тугоплавкую фазу композита, оптимальное содержание связки тем больше, чем выше ее хрупкость и чем сильнее выражено ее взаимодействие с тугоплавкой фазой композита (образование твердого раствора, эвтектики, интерметаллида, тугоплавкого соединения на основе металла – связки).

При выборе оптимального содержания пластической связки в легирующем сплаве необходимо исходить не только из требования максимальной эффективности процесса, но также учитывать назначение покрытия.

На рис. 4 представлены концентрационные зависимости эффективности процесса формирования покрытий из сплавов системы TiB_2-Mo [9] в сочетании с относительным износом J , коэффициентом трения k при 500 °C и привесом массы δ в процессе окисления при 1150 °C. При содержании в легирующем сплаве Mo 20 % мас. эффективность процесса ЭИЛ наименьшая, однако этот же состав обеспечивает и минимальный износ.

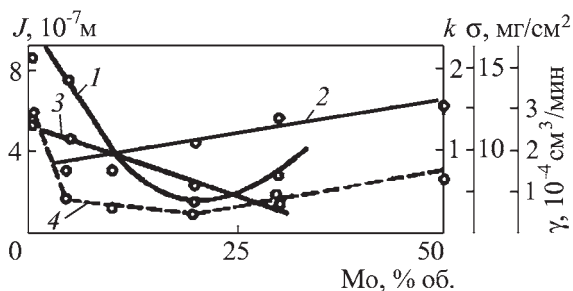


Рис. 4. Концентрационные зависимости характеристик электроискровых покрытий из сплавов систем TiB₂-Mo на стали 45 [10, 11]:

1 — относительный износ; 2 — коэффициент трения; 3 — привес массы в процессе окисления; 4 — производительность

Износостойкость электроискрового покрытия, как правило, изменяется немонотонно в зависимости от соотношения компонентов в легирующем сплаве: для составов с преимущественным содержанием твердой фазы износ велик из-за высокой хрупкости этой фазы; для составов с преимущественным содержанием мягкой составляющей износ велик из-за низкой прочности этой фазы. Поэтому для износостойких покрытий оптимальное содержание пластической добавки колеблется в достаточно широких пределах вблизи эквимолярного состава.

В рассматриваемом случае основными фазами покрытия являются твердая составляющая диборида титана TiB₂ (с микротвердостью 34,8 ГПа) и мягкая составляющая β-MoV (с микротвердостью 25 ГПа). Очевидно, при Mo 20 % мас. в легирующем сплаве обеспечивается оптимальное соотношение твердой и мягкой компонент в покрытии, при котором достигается минимальный износ.

Коэффициент трения *k* одноименных покрытий, полученных при температуре 500 °С, монотонно возрастает с увеличением содержания Mo в легирующем сплаве. Одновременно в покрытии увеличивается содержание фазы β-MoV. Эта фаза ответственна при повышенных температурах за схватывание трущихся поверхностей [10], что и объясняет наблюдаемую зависимость. Таким образом, оптимальный состав легирующего сплава для получения износостойкого покрытия необходимо выбирать с учетом изменения его триботехнических характеристик.

В процессе высокотемпературного окисления электроискровых покрытий из сплавов системы TiB₂-Mo прибыль массы δ уменьшается с ростом содержания Mo в сплаве. По данным дифференциального термического анализа (ДТА) [11], при 1250 °С фиксируется высокотемпературный пик, связанный с окислением β-MoV, которое приводит к образованию бо-

рата молибдена MoO₃-V₂O₅, ответственного за жаростойкость покрытия. Таким образом, в данном частном случае жаростойкость покрытия определяется количественным содержанием образующейся в покрытии жаростойкой фазы β-MoV.

Иногда целесообразно легировать титановые сплавы непосредственно жаростойкими материалами или металлами, образующими с материалом катода жаростойкие интерметаллиды, например никелем. Установлено [12], что при легировании сплава VT9 собственно металлом (Ni, Al) в поверхностном слое фиксируется фаза свободного металла. При легировании интерметаллидом NiAl свободный металл в покрытии не обнаруживается. Это обстоятельство в сочетании с тем фактом, что глубина проникновения жаростойких интерметаллидных фаз в несколько раз больше, чем при легировании металлом, объясняет экспериментально наблюдаемую повышенную жаростойкость слоя, полученного ЭИЛ интерметаллидом.

3) Создание "кольцевой" структуры сплава, в которой зерно дисперсной фазы обволакивается материалом связки и переносится на поверхность катода в результате интеркристаллитного разрушения [13].

4) Создание оптимального соотношения теплофизических констант материалов электродов, в котором теплопроводимость и температура плавления материала анода должны быть не более чем в 5–6 раз больше, чем катода [14].

5) Разупрочнение межзеренных границ сплава для снижения его эрозионной стойкости.

6) Создание защитной атмосферы в процессе ЭИЛ для предотвращения образования оксидных и нитридных фаз, вызывающих охрупчивание легирующего слоя (самофлюсующиеся добавки) [5, 15–18].

7) Введение микролегирующих и стабилизирующих искровой разряд добавок (минеральные ассоциации) [5, 17, 19–21].

Иногда вследствие чрезмерно большого вклада жидкофазной эрозии настолько увеличивается эрозионная стойкость материала, что не обеспечиваются требуемый уровень коэффициента переноса и достаточная производительность процесса. Такая ситуация реализуется для стандартных твердых сплавов марки ВК, в которых компоненты сплава (WC, Co) в наибольшей мере отвечают перечисленным выше условиям, обеспечивающим максимальный вклад жидкой фазы в эффект эрозии.

В этом случае повышение уровня эрозии и коэффициента переноса достигается разупрочнением межзеренных контактов частиц связки вследствие варьирования технологических параметров синтеза материалов (например, создания регулируемой пористости), а также усилением ковалентности связи по

зонам межкристаллитных сочленений вследствие введения неметаллов или металлоподобных соединений (например, бора и его соединений) [22, 23].

Эти критерии носят универсальный характер и могут быть применимы к электродным материалам на основе разных классов тугоплавких соединений — карбидов, боридов, нитридов. Следует отметить, что особенность ЭИЛ боридами состоит в гораздо меньшем коэффициенте переноса, который не превышает 20...30 % (в сравнении с 60...80 % для карбидов). Это связано с активным окислением бора в процессе обработки, продуктом которого является борный ангидрид, образующий тонкие диэлектрические слои (участки) на рабочих поверхностях электродов, понижающие эффективность ЭИЛ.

Существует две группы электродных материалов:

1. На основе металла с добавками, вводимыми в качестве упрочняющей фазы.

2. На основе тугоплавкого соединения с металлической добавкой, вводимой в качестве пластифицирующей связки.

Для обеих групп материалов главным условием формирования покрытия является образование неограниченных твердых растворов (или интерметаллидов) материалами электродов.

На основе данных о взаимной растворимости металлов, растворимости тугоплавких соединений в металлах [9] с учетом принципа выбора компонентов антифрикционной и износостойкой составляющих композиционного материала [24, 25], а также с использованием данных по смачиваемости тугоплавких соединений металлами [26] составлены предпочтительные варианты сочетания элементов материала легирующего электрода. Они обеспечивают эффективное формирование легированного слоя на сталях (табл. 3). Типичным примером первой группы электродных материалов являются сплавы хрома с добавками MgO, NbC, TaC, TiC, CaO; ко второй

группе относятся все сплавы на основе тугоплавкого соединения.

В работе [27] предложен оценочный параметр выбора материала легирующего электрода, исходя из условия его преимущественного переноса на катод. Это условие контролируется соотношением теплофизических констант материалов электродов, в основе которого лежит критерий Палатника [28].

Главным условием эффективности процесса ЭИЛ является преимущественный перенос материала анода на катод. Учитывая это условие, дополненное с учетом ковалентности межатомной связи материалов анода α_a^* и катода α_k^* и их взаимной растворимости, определяет критерий выбора материала легирующего электрода D_m :

$$D_m = \frac{C_k \rho_k \lambda_k (T_{пл}^k - T_{хл}^k)^2}{C_a \rho_a \lambda_a (T_{пл}^a - T_{хл}^a)^2} \frac{r_k}{(r_k - r_a)} \frac{1}{\alpha_a^* \alpha_k^*} \gg 1, \quad (1)$$

где $C_k, C_a, \rho_k, \rho_a, \lambda_k, \lambda_a$ — соответственно теплоемкость, плотность и теплопроводность катода и анода;

$T_{пл}^k, T_{пл}^a, T_{хл}^k, T_{хл}^a$ — температуры плавления и хладноломкости материалов анода и катода соответственно;

r_a и r_k — атомный радиус материала анода и катода соответственно.

Чем больше величина D_m , тем больше количество перенесенного на катод материала анода в жидко-паровой фазе; влияние последней учитывается коэффициентом $1/\alpha_a^* \alpha_k^*$. Для металлов этот коэффициент ~ 1 и основную роль играет взаимная растворимость материалов электродов, оцениваемая соотношением атомных радиусов материалов анода r_a и катода r_k . При ЭИЛ одноименными материалами $r_k = r_a$ и $D_m \rightarrow \infty$, что отвечает максимальной эффективности процесса ЭИЛ [29].

Для тугоплавких соединений, характеризующихся низкой взаимной растворимостью с металлами, ос-

Таблица 3

Предпочтительные варианты сочетаний материалов основы и связки легирующего электрода

Катод	Электрод	
	Основа	Связка
Железо и углеродистые стали	Cr, Mo, W, TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, Mo ₂ C, WC, Mo ₂ B ₅ , W ₂ B ₅	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, C, MgO, NbC, TaC, TiC, CaO
Быстрорежущие стали	TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, WC, W ₂ B ₅	V, Cr, Co, Ni, W, Mo
Титан и его сплавы	Cr, Mo, W, Ni, Al, TiC, TiB ₂ , TiN, ZrN, WC, W ₂ B ₅ , NiAl, TiAl, Ni ₃ Al	V, Cr, Fe, Co, Ni, Mo, Al, Zr, Nb
Алюминиевые сплавы	Cr, Cu, Al, Fe	Fe, Cu, Si, Zn, Ti

Результаты расчета критерия выбора материала электрода для ЭИЛ железа

Материал электрода	C , кал/(моль·°C)	ρ , г/см ³	λ , кал/(см·с·°C)	$T_{пл}$, К	$T_{хл}$, К	α^* из работы [8]	$\frac{r_k}{r_k - r_a}$	D_m
α -Fe	6,01	7,87	0,356	1812	273	~1	∞	∞
Cr	5,57	7,19	0,737	2176	700	1,05	127	75,1
W	5,93	19,26	0,116	3650	900	~1	3,64	9,1
Ti	5,98	4,5	0,209	1938	273	~1	7,1	13,4
Ta	5,83	16,6	0,535	3270	83	1,06	6,7	4,4
TiC	8,04	4,92	0,0162	3530	1173	8,4	—	1,26
WC	8,53	15,77	0,07	3058	—	5,49	—	2,49

новную роль играет ковалентность межатомной связи, определяющая их преимущественную эрозию в твердой фазе. Поэтому для тугоплавких соединений выражение (1) имеет вид

$$D_m = \frac{C_k \rho_k \lambda_k (T_{пл}^k - T_x^k)^2}{C_a \rho_a \lambda_a (T_{пл}^a - T_x^a)^2} \frac{1}{\alpha_a^* \alpha_k^*} \gg 1. \quad (2)$$

Оценочный размер параметра D_m по формулам (1) и (2) для случая ЭИЛ железа наиболее широко применяемыми в практике металлами и карбидами представлен в табл. 4. В расчетах использованы справочные данные по теплофизическим свойствам материалов [30]. Из представленных данных следует, что наибольшая величина параметра D_m отвечает хрому, образующему с железом неограниченные твердые растворы, наименьшая – карбиду титана, характеризующемуся максимальной ковалентностью межатомной связи. Этот результат согласуется с высокой эффективностью процесса ЭИЛ железа и сталей хромом и с низкой – карбидом титана [6].

Таким образом, проблема выбора и создания электродных материалов для ЭИЛ включает как один из важнейших моментов экспериментальное изучение обратного переноса материала с катода на анод с учетом взаимной растворимости материалов.

В процессе ЭИЛ в микрованне на катоде в зоне действия искры протекают микрометаллургические процессы, сопровождающиеся интенсивным фазообразованием, вследствие взаимодействия материалов электродов друг с другом и с элементами межэлектродной среды в условиях импульсных термомеханических нагрузок. При этом в легированном слое возникают различные фазы – стабильные и нестабильные в термодинамическом отношении. В частности, при ЭИЛ сталей переходными металлами образуются как твердые растворы между исходными фазами, так и новые двойные и тройные фазы [22].

Условия формирования легированного слоя оказываются наиболее благоприятными в случае образо-

вания материалами электродов неограниченных твердых растворов или интерметаллидов [22]. Этот же принцип взаимной растворимости является одним из основных при создании твердых сплавов [9]. В этой связи представляется актуальным материаловедческий аспект проблемы ЭИЛ – установление взаимосвязи эффективности процесса ЭИЛ с фазообразованием в легированном слое и термодинамической устойчивостью возникающих фаз.

На основе анализа литературных данных и собственных исследований можно отметить перспективность исследований по созданию многослойных покрытий, сочетающих графит, металлы и соединения, а также комбинированное использование ЭИЛ и других электрофизических методов, повышающих качественные характеристики легированного слоя. Практический и научный интерес представляет создание порошковых электродов, включающих минеральное сырье, а также получение электродных материалов с использованием самораспространяющегося высокотемпературного синтеза [31].

Использование физико-химических принципов взаимодействия материалов электродов в условиях искрового разряда впервые в мировой практике привело к созданию специальных электродных материалов для ЭИЛ, в том числе на безвольфрамовой основе. К таким материалам относятся твердые сплавы с добавками самофлюсующихся сплавов и минеральных ассоциаций, а также безвольфрамовые твердые сплавы [21].

Выводы

1. На основании обобщения результатов выполненных исследований и опыта применения различных классов материалов в технологии ЭИЛ разработана классификация электродных материалов, используемых в зависимости от их физико-химической природы. Эта классификация дает возможность свести все многообразие электродных материалов к наиболее типичным для ЭИЛ в газовой среде.

2. Установлены научные принципы создания электродных материалов на основе тугоплавких соединений. Они заключаются в использовании пластической связки из самофлюсующихся материалов, обеспечивающей снижение доли хрупкого разрушения эродируемого материала, высокую эффективность процесса формирования ЛС за счет разупрочнения межзеренных границ, создания защитной атмосферы для предотвращения образования оксидных и нитридных фаз, а также введения микролегирующих и стабилизирующих искровой разряд добавок минеральных ассоциаций.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Прядко Л.Ф., Егоров Ф.Ф.** Электродные материалы для электроискрового легирования. М.: Наука, 1988. 224 с.
2. **Верхотуров А.Д., Муха И.М.** Технология электроискрового легирования металлических поверхностей. К.: Техника, 1988. 188 с.
3. **Верхотуров А.Д.** Физико-химические основы процесса электроискрового легирования металлических поверхностей. Владивосток: Дальнаука, 1992. 175 с.
4. **Коваленко В.С., Верхотуров А.Д., Головкин Л.Ф., Подчерняева И.А.** Лазерное и электроэрозионное упрочнение материалов. М.: Наука, 1986. 277 с.
5. **Николенко С.В., Верхотуров А.Д.** Новые электродные материалы для электроискрового легирования. Владивосток: Дальнаука, 2005. 219 с.
6. **Самсонов Г.В., Верхотуров А.Д., Бовкун Г.А., Сычев В.С.** Электроискровое легирование металлических поверхностей. К.: Наукова думка, 1978. 220 с.
7. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А.** Классификация видов электроискрового легирования // Электрофизические и электрохимические методы обработки. 1983. № 3. С. 3–5.
8. **Трефилов В.И., Мильман Ю.В., Фирстов С.А.** Физические основы прочности тугоплавких металлов. К.: Наукова думка, 1975. 316 с.
9. **Чапорова И.Н., Чернявский К.С.** Структура спеченных твердых сплавов. М.: Металлургия, 1975. 247 с.
10. **Полотай В.В., Подчерняева И.А., Верхотуров А.Д. и др.** Триботехнические характеристики электроискровых покрытий на основе диборида титана // Порошковая металлургия. 1985. № 5. С. 86–88.
11. **Верхотуров А.Д., Лавренко В.А., Подчерняева И.А. и др.** Кинетика процесса формирования и высокотемпературное окисление электроискровых боридных покрытий на стали // Порошковая металлургия. 1986. № 5. С. 52–55.
12. **Верхотуров А.Д., Рогозинская А.А., Тимофеев И.И.** Формирование упрочненного слоя при электроискровом легировании сталей и титановых сплавов. К.: Знание, 1979. 28 с.
13. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Егоров Ф.Ф. и др.** Закономерности формирования покрытий на стали при электроискровом легировании гетерофазными материалами TiB₂-Mo // Порошковая металлургия. 1983. № 12. С. 61–63.
14. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А. и др.** Электроискровые покрытия из новых гетерофазных материалов. Владивосток, 1987. 60 с.
15. **А.с. 1496292** (не публикуемое). Электродный материал на основе карбида вольфрама для электроэрозионного нанесения покрытий / А.Д. Верхотуров, С.В. Николенко, И.М. Муха, В.Н. Шушунов.
16. **Верхотуров А.Д., Шевелёва Т.А., Николенко С.В., Столярова Н.С.** Влияние самофлюсующихся добавок в электродные материалы WC-Co на процесс формирования поверхностного слоя и его свойства при электроискровом легировании сталей // Электронная обработка материалов. 1990. № 2. С. 25–29.
17. **Николенко С.В.** Создание новых электродных материалов с использованием минерального сырья и самофлюсующихся добавок для электроискрового легирования инструментальных и конструкционных материалов: автореф. дис. ... канд. техн. наук. Комсомольск-на-Амуре, 1996. 24 с.
18. **А.с. 2129619.** Шихта электродного материала для электроискрового легирования / С.В. Николенко, А.М. Сундуков и др.
19. **А.с. 1750261** (не публикуемое). Электродный материал на основе карбида вольфрама для электроэрозионного нанесения покрытий / А.Д. Верхотуров, С.В. Николенко, Т.А. Шевелёва.
20. **Николенко С.В., Кондратьев А.И., Сундуков А.М.** Перспективные электродные материалы для электроискрового легирования сталей с применением минерального сырья // Электронная обработка материалов. 1997. № 1. С. 19–23.
21. **Шевелёва Т.А., Верхотуров А.Д., Николенко С.В.** Влияние добавки датолитового концентрата в электродные материалы TiC-Ni-Mo на свойства поверхностного слоя сталей после электроискрового легирования // Электронная обработка материалов. 1991. № 1. С. 26–30.
22. **Верхотуров А.Д.** Научные основы формирования легированного слоя и создания электродных материалов при электроискровом легировании: дис. ... д-ра техн. наук. Киев, 1984. 578 с.
23. **Муха И.М., Верхотуров А.Д., Гнедова С.В.** Материал легирующих электродов на основе твердых сплавов WC-Co с микродобавками бора // Электронная обработка материалов. 1981. № 5. С. 24–27.
24. **Рабинович Е.А.** Трение и износ самосмазывающихся металлических материалов // Проблемы трения и смазки. 1975. № 2. С. 81–85.
25. **Федорченко И.М., Пугина Л.И.** Композиционные спеченные антифрикционные материалы. К.: Наукова думка, 1980. 404 с.
26. **Панасюк А.Д., Фоменко В.С., Глебова Г.Г.** Стойкость неметаллических материалов в расплавах. Справочник. К.: Наукова думка, 1986. 415 с.
27. **Верхотуров А.Д., Подчерняева И.А., Горбунов Ю.А., Егоров Ф.Ф.** К вопросу выбора материала электродов и массоперенос при электроискровом легировании // Порошковая металлургия. 1985. № 2. С. 36–40.
28. **Палатник Л.С.** Фазовые превращения при электроискровой обработке металлов и опыт установления критерия наблюдаемых взаимодействий // Докл. АН СССР, 1953. Т. 89. № 3. С. 455–458.
29. **Артамонов А.Я., Бовкун Г.А., Казаченко Н.В. и др.** Повышение износостойкости легких сплавов // Порошковая металлургия. 1968. № 8. С. 91–94.
30. **Самсонов Г.В., Виницкий И.М.** Тугоплавкие соединения: Справочник. М.: Металлургия, 1976. 556 с.
31. **Левашов Е.А.** Физико-химические и технологические основы самораспространяющегося высокотемпературного синтеза. Бином, 1999.

УДК 621.793.79

В.А. Шулов, А.Г. Пайкин, О.А. Быценко, Д.А. Теряев, В.И. Энгелько, К.И. Ткаченко
(Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет))
E-mail: shulovva@mail.ru

Разработка технологического процесса ремонта и восстановления свойств лопаток компрессора ГТД из жаропрочной стали ЭП866Ш с применением сильноточных импульсных электронных пучков

Показано, что сильноточный импульсный электронный пучок микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток компрессора. Применение сильноточных импульсных электронных пучков позволяет удалять за один импульс окисленные при эксплуатации поверхностные слои лопаток из стали ЭП866Ш.

Ключевые слова: жаропрочная сталь, ремонт лопаток, электронный пучок, эксплуатационные свойства.

It is shown that intense pulsed electron beam of microsecond duration is a high effective instrument for repair of compressor blades. Application of intense pulsed electron beam allows one to ablate per a pulse the surface layers oxidized during operating.

Keywords: refractory steel, repair of blades, electron beam, service properties.

Введение

Ремонт и восстановление свойств лопаток компрессора и турбины газотурбинных двигателей после эксплуатации является одной из важнейших задач авиационного двигателестроения [1]. Проведение ремонтно-восстановительных операций позволяет значительно повысить ресурс эксплуатации изделия, при этом обеспечивается существенная экономия дорогостоящих материалов и средств на изготовление новых лопаток. В то же время исследований, посвященных разработке технологических процессов ремонта и восстановления эксплуатационных свойств деталей машин за последние пятнадцать лет, было проведено недостаточно.

В авиадвигателестроении для удаления нагара и поврежденных при эксплуатации поверхностных слоев лопаток компрессора и турбины после длительной наработки было предложено три способа: плазменно-электролитическое полирование, травление в плазме вакуумно-дугового разряда и абляция материала поверхностных слоев при облучении концентрированными импульсными потоками энергии [2–4].

При использовании первых двух способов скорость травления жаропрочных материалов достигает 10...15 мкм/ч при существенной неоднородности удаления материала с различных участков поверхности деталей сложной формы. Применение же мощных ионных пучков для удаления покрытий ZrN, NiCrAlY и TiSiB с поверхности лопаток из сплавов ВТ9, ЖС26НК и ВТ25У обеспечивает однородное распыление этих покрытий за счет абляции со скоростями 1; 0,4 и 0,04 мкм/имп. Поскольку скважность импульсов ионно-лучевых установок Темп-1 равна 5 с, то за

1 ч обработки удается удалить поверхностные слои толщиной 700, 280 и 28 мкм соответственно [4]. Последнее свидетельствует о высокой перспективности реализации обработки концентрированными импульсными потоками энергии для ремонта лопаток компрессора и турбины с защитными покрытиями.

Кроме мощных ионных пучков для этих целей могут быть использованы *сильноточные импульсные электронные пучки* (СИЭП), что было продемонстрировано в работах [5–7]. В этих публикациях облучение было проведено на ускорителях Надежда (ИСЭ, г. Томск) и GESA-1 (НИИЭФА им. Д.В. Ефремова, г. Санкт-Петербург), причем скорости абляции покрытий NiCrAlY и ZrN составляли 5 и 7 мкм/имп. при скважности 30 с, т.е. 600 и 940 мкм/ч, что технологически представляется наиболее приемлемым для практического использования.

Однако исследований кинетики абляции нагара и материала поврежденных при эксплуатации поверхностных слоев лопаток из стали ЭП866Ш в зависимости от режимов облучения в [5–7] проведено не было, что не позволяет выбрать оптимальные режимы обработки лопаток для реализации процесса облучения. В связи с этим целью данной работы являлась разработка технологических основ процесса ремонта и восстановления свойств лопаток компрессора из стали ЭП866Ш с применением СИЭП, формируемого в ускорителе GESA-1.

Методы исследования

В качестве объектов исследования использовали лопатки компрессора двигателя РД33 из стали ЭП866Ш

(15X16K5H2MBФAB-III по ТУ 14-1-2756–79) ферритного класса с карбидным упрочнением, химический состав и режимы термической обработки которой приведены ниже: Fe; 1,7Ni; 0,13C; 15Cr; 1,35Mo; 4,5Co; 0,6Mn; 0,18V; 0,2Nb; 0,6Si; 0,03N; 0,02S; 0,03P; 0,65W; закалка в струе аргона от 1100 °С; отпуск при 650 °С и 700 °С в течение 2 ч 30 мин.

Технологический процесс изготовления лопаток компрессора из этой стали хорошо освоен на ММП им. В.В. Чернышева и включает 50 операций, основными из которых являются: штамповка, фрезерование, вальцевание, шлифование, полирование, термическая обработка, виброшлифование и виброглянцевание. Выпускаемые по данной технологии лопатки полностью удовлетворяют требованиям разработчика и обеспечивают ресурс их эксплуатации в составе двигателя РД33 в течение более 1000 ч при температурах до 600 °С.

В работе исследовали лопатки, прошедшие наработку в течение 260 ч. Толщина слоя нагара на различных участках поверхности этих лопаток изменялась в пределах от 40 до 80 мкм. В состав сформированного при эксплуатации нагара, согласно результатам проведенного рентгенофазового анализа, входят углеводороды, шпинели, сульфаты, сульфиты и оксиды, прежде всего, хрома и железа. Кроме того, необходимо отметить присутствие на поверхности большого числа лопаток крупных забоин. Эта часть лопаток не подлежала ремонту по геометрическим соображениям, поэтому именно на них и были выполнены эксперименты по изучению кинетики удаления нагара и лежащих под ним окисленных поверхностных слоев толщиной до 20 мкм, содержащих Cr_2O_3 , Fe_2O_3 и $FeCr_2O_4$. Часть лопаток до облучения разрезали на электроэрозионном станке и исследовали методами: *электронной Оже-спектроскопии* (ЭОС), *сканирующей электронной спектроскопии* (СЭМ), *рентгеноструктурного анализа* (РСА) и *оптической металлографии* (ОМ) в поляризованном свете. Кроме этого, измеряли микротвердость HV и шероховатость Ra.

Обработку лопаток СИЭП проводили на ускорителе GESA-1 (энергия электронов – 115...150 кэВ; длительность импульса – 30...40 мкс; плотность энергии в пучке – 20...55 Дж/см²; площадь поперечного сечения пучка – 30...80 см²; неоднородность плотности по сечению пучка – 5 %). Лопатки после облучения также разрезали, а из полученных "образцов-свидетелей" изготавливали поперечные шлифы, в результате

чего определяли удельный унос вещества в зависимости от плотности энергии и числа импульсов. Кроме того, поверхность мишеней исследовали методами ЭОС, СЭМ, РСА и ОМ для определения толщин слоев, удаленных за импульс, перекристаллизованной и модифицированной областей мишени. Были реализованы сравнительные усталостные и коррозионные испытания серийных лопаток, а также лопаток, подвергнутых ремонту по серийной технологии и с применением СИЭП.

Экспериментальные данные и их обсуждение

Результаты исследований и испытаний исходных и облученных лопаток приведены на рис. 1–7 и в табл. 1. Внешний вид лопаток 7-й ступени ротора компрессора высокого давления ГТД из стали ЭП866Ш, прошедших наработку на двигателе в течение 260 ч и облученных на ускорителе GESA-1 при плотностях энергии в импульсе 20...22; 26...28 и 31...36 Дж/см² двумя импульсами представлен на рис. 1. Видно, что некоторые лопатки имели следы механических повреждений (забоины, вмятины, микротрещины). Отдельные детали не подлежали ремонту по геометрическим требованиям.

После облучения с плотностью энергии 20...22 Дж/см² двумя импульсами удаётся практически полностью удалить нагар с поверхности лопаток (рис. 3). Для удаления оксидных слоев было проведено облучение при более высоких плотностях энергии и, в частности, при 50...55 Дж/см² четырьмя импульсами (рис. 7), что позволило полностью удалить оксидные слои. Поскольку в этом случае на поверхности ремонтируемых лопаток образовались отдельные кратеры (рис. 2), для их удаления было реализовано облучение при небольших плотностях энергии в режиме плавления ($W = 20...22$ Дж/см²) четырьмя импульсами. После облучения был проведен вакуумный стабилизирующий отжиг при температуре (670±30) °С



Рис. 1. Внешний вид лопаток из стали ЭП866Ш после 260 ч эксплуатации на двигателе РД33 и облучения двумя импульсами на ускорителе GESA-1: слева направо – исходная лопатка после наработки, $W = 20...22$; 26...28 и 32...36 Дж/см²

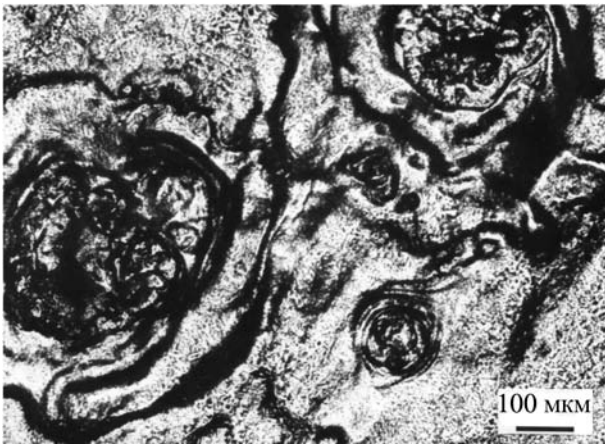


Рис. 2. Топография поверхности лопаток из стали ЭП866Ш после 260 ч эксплуатации на двигателе РД33 и облучения четырьмя импульсами на ускорителе GESA-1 с плотностью энергии 50...55 Дж/см²

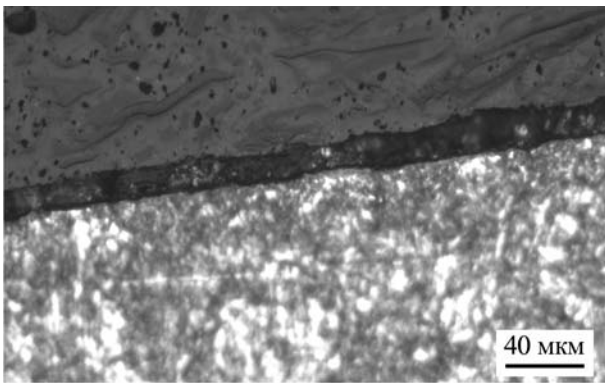


Рис. 3. Микроструктура материала в поверхностном слое серийных лопаток после эксплуатации на двигателе РД33

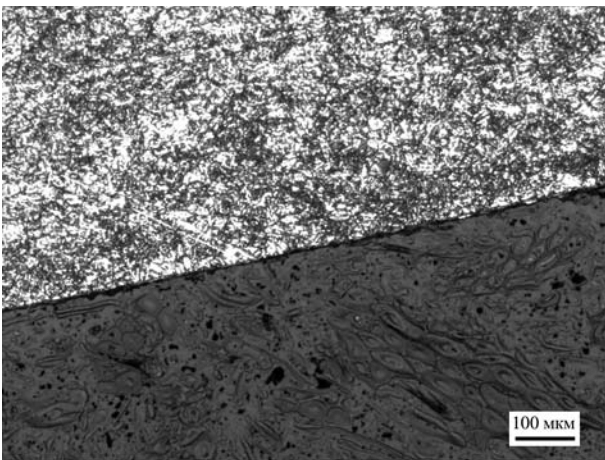


Рис. 4. Микроструктура материала в поверхностном слое серийных лопаток после эксплуатации на двигателе РД33 и удаления поврежденного при эксплуатации поверхностного слоя

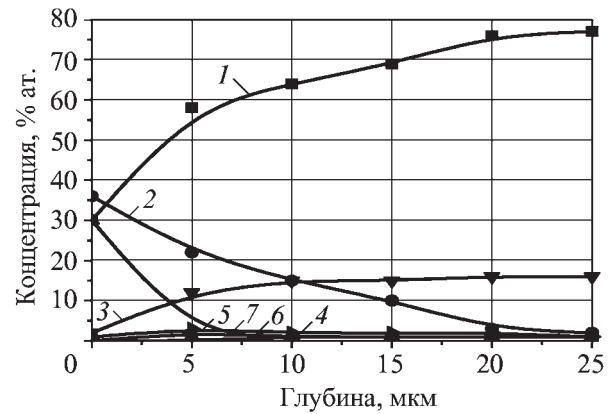


Рис. 5. Распределение элементов в поверхностном слое серийных лопаток после 260 ч эксплуатации (съемка с поверхности «малогоугольного» косого шлифа):

1 – Fe; 2 – O; 3 – Cr; 4 – Cl; 5 – Mo; 6 – C; 7 – S

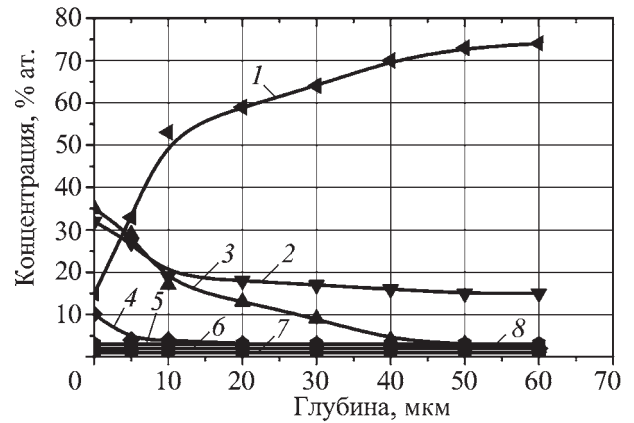


Рис. 6. Распределение элементов в поверхностном слое серийных лопаток после 260 ч эксплуатации и удаления окисленных слоев (съемка с поверхности при непрерывном травлении ионами аргона с энергией 3 кэВ):

1 – Fe; 2 – Cr; 3 – C; 4 – O; 5 – Ni; 6 – W; 7 – Mo; 8 – Co

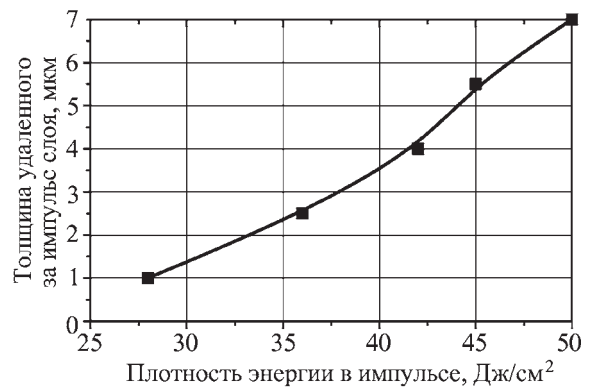


Рис. 7. Кинетика абляции с поверхности лопаток компрессора из стали ЭП866Ш

Таблица 1

Влияние электронно-лучевой обработки на физико-химическое состояние материала в поверхностных слоях и свойства лопаток КВД из стали ЭП866Ш

Состояние детали	Режим				Ra, мкм (±0,01)	HV (±30)	σ ₋₁ , МПа (±20)	h _о , мкм (±5)	Δm/S, мг/мм ² (±0,03)
	облучения		отжига						
	W, Дж/см ²	n, имп.	T, °C	τ, ч					
Исходное до эксплуатации	—	—	—	—	0,24	410	380	45	1,98
Исходное после эксплуатации	—	—	—	—	1,25	690	290	65	—
После эксплуатации и обработки СИЭП	20...22	2	—	—	0,32	470	310	50	2,12
После эксплуатации, обработки СИЭП и термической обработки	50...55	4	670	6	0,22	430	420	15	0,38
	20...22	2							
После эксплуатации, химической и механической обработок (серийная технология)	—	—	—	—	0,25	400	360	45	2,01

Примечание. HV – микротвердость при нагрузке P=1 Н; σ₋₁ – предел выносливости при 600 °C; частота нагружения 3000 Гц на базе 2·10⁷ циклов; h_о – толщина окисленного слоя после 600 ч термоэкспозиции на воздухе при 600 °C; Δm/S – удельный привес образцов после 200 циклов нагрева до 600 °C и охлаждения в морской воде до 20 °C.

в течение 2...6 ч для снятия остаточных растягивающих напряжений.

Исходя из данных рис. 7 не удалось выбрать число импульсов, достаточное для полного удаления газонасыщенных при эксплуатации поверхностных слоев лопаток из стали ЭП866Ш, поскольку для различных двигателей отличаются условия наработки и ее продолжительность, а значит, толщина этих слоев может существенно меняться. Поэтому перед операцией ремонта должна быть выполнена операция контроля толщины поврежденного при эксплуатации слоя, а также его состава и только после этого можно выбирать необходимое для полного удаления окисленных слоев число импульсов согласно рис. 7.

В качестве примера в табл. 2 приведено описание электронно-лучевого технологического процесса ремонта лопаток 7-й ступени ротора компрессора двигателя РД33. Для реализации технологического процесса электронно-лучевой обработки лопаток была спроектирована и изготовлена промышленная установка "Геза-ММП". Импульсный ускоритель "Геза-ММП" предназначен для электронно-лучевой обработки поверхности лопаток компрессора и турбины ГТД с целью повышения целого комплекса эксплуатационных свойств этих деталей, продолжительность эксплуатации которых, чаще всего, определяет ресурс всего изделия. Прототипом ускорителя "Геза-ММП"

являются исследовательские установки GESA-1 и GESA-2.

Ускоритель "Геза-ММП" снабжен безмасляными средствами откачки на базе криогенных и турбомолекулярных насосов, обеспечивающих выход на вакуум (13·10⁻⁵ Па) в течение 10 мин. Кроме того, в состав установки входят: электронный инжектор с многоострийным, взрывоэмиссионным катодом (предусмотрены быстрая замена катодов при переходе на облучение лопаток различных ступеней); камера транспортировки пучка; магнитная фокусирующая система; высоковольтный генератор, радиационная защита; стойка управления; пульт контроля, обеспечивающий фиксацию вольт-амперных характеристик и их компьютерный анализ; узел для помещения, закрепления, транспортировки, непрерывного и дискретного вращения лопаток. Комплект загружаемых лопаток составляет 40 шт.

Технические характеристики установки "Геза-ММП" могут варьироваться в следующих диапазонах: ускоряющее напряжение – 50...120 кВ; плотность тока на мишени – 5...30 А/см²; длительность импульса – 1...40 мкс; диаметр пучка – 6...10 см; неоднородность распределения плотности энергии в импульсе по сечению пучка – не выше 5 % (для лопаток из стали ЭП866Ш плотность энергии должна лежать в пределах 20...22 Дж/см²).

Технологический процесс ремонта лопаток компрессора из стали ЭП866Ш

Номер операции	Наименование операции	Режим обработки	Оборудование, контролируемые параметры
005	Определение толщин нагара и окисленных слоев	Изготовление микрошлифов	Концентрация кислорода – не более 2 % ат.
010	Удаление нагара СИЭП	Энергия электронов $E = 115...120$ кэВ; плотность энергии в импульсе $20...22$ Дж/см ² ; число импульсов $n = 2$ имп.	Ускоритель GESA-1. Изменения силы тока и напряжения во времени, остаточный вакуум
015	Удаление окисленных поверхностных слоев СИЭП	Энергия электронов $E = 115...120$ кэВ; плотность энергии в импульсе $50...55$ Дж/см ² ; число импульсов n определяется толщиной окисленных слоев (7 мкм/имп.)	Ускоритель GESA-1. Изменения силы тока и напряжения во времени, остаточный вакуум
020	Выглаживание микрорельефа СИЭП	Энергия электронов $E = 115...120$ кэВ; плотность энергии в импульсе $20...22$ Дж/см ² ; число импульсов $n = 4$ имп.	Ускоритель GESA-1. Изменения силы тока и напряжения во времени, остаточный вакуум
025	Контроль состояния поверхности	Изготовление микрошлифов, измерение шероховатости, проверка наличия кратеров и микротрещин	Микроскоп Versomet. Микротвердомер ПМТ-3. Проверка наличия кратеров, (250 ± 50) HV ($P = 1$ Н), $Ra = 0,12...0,15$ мкм
030	Термическая обработка (вакуумный отжиг)	Температура нагрева (670 ± 30) °С; термоэкспозиция $\tau = 6$ ч; вакуум не меньше 0,13 Па; охлаждение вместе с печью в вакууме	Микротвердомер ПМТ-3. Проверка отсутствия окисления, (320 ± 30) HV ($P = 1$ Н)

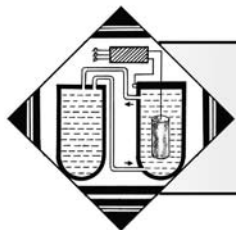
Выводы

1. Показано, что СИЭП микросекундной длительности является высокоэффективным инструментом для ремонта лопаток компрессора. Применение СИЭП позволяет удалять за один импульс нагар и газонасыщенные при эксплуатации поверхностные слои лопаток из стали ЭП866Ш. Толщина удаляемых за импульс при плотности энергии $48...50$ Дж/см² поверхностных слоев этих деталей составляет 7 мкм.

2. Экспериментально доказано, что после электронно-лучевого удаления нагара и газонасыщенных во время эксплуатации поверхностных слоев основные свойства лопаток ухудшаются (возрастает шероховатость поверхности, снижается предел выносливости, формируются остаточные растягивающие напряжения). Для достижения уровня эксплуатационных свойств исходных лопаток необходимо осуществлять технологический процесс ремонта лопаток в несколько операций: 005 – определение толщин нагара и окисленных слоев; 010 – удаление нагара СИЭП; 015 – удаление газонасыщенных поверхностных слоев СИЭП; 020 – выглаживание микрорельефа СИЭП; 025 – контроль состояния поверхности; 030 – финишная термическая обработка для снятия остаточных растягивающих напряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Сулима А.М., Шулов В.А., Ягодкин Ю.Д. Поверхностный слой и эксплуатационные свойства деталей машин. М.: Машиностроение, 1988. 240 с.
2. Мубождан С.А., Будиновский С.А., Помелов Я.А. Обработка поверхности жаропрочных сплавов в плазме вакуумно-дугового разряда // Материалы 6-й Международной конференции по модификации материалов пучками частиц и плазменными потоками. ТПУ, Томск, 23–28 сентября 2002 г. С. 561–563.
3. Смыслов А.М., Лизунов В.П., Гребенюк Г.П. Технология плазменно-электролитического полирования лопаток ГТД после длительной наработки // Авиационная промышленность. 1992. № 12. С. 50–51.
4. Пат. № 586735139 Российская Федерация. Способ ремонта деталей машин с помощью обработки их поверхности концентрированными импульсными потоками энергии / В.А. Шулов, Н.А. Ночовная, Г.Е. Ремнев, И.Г. Полякова, И.Ф. Исаков. Бюл. № 5. 1997. 12 с.
5. Использование сильноточных импульсных электронных пучков для модификации свойств лопаток ГТД / А.Г. Пайкин, А.Ф. Львов, В.А. Шулов и др. // Проблемы машиностроения и автоматизации. 2003. № 3. С. 41–49.
6. The recycling of metals / V.A. Shulov, V.I. Engelko, G. Mueller etc. // Vienna, 17–18 June 1999. P. 92–101.
7. Технологические основы модифицирования поверхности деталей из жаропрочных никелевых сплавов с жаростойким NiCrAlY покрытием с применением сильноточных импульсных электронных пучков / А.Г. Пайкин, А.В. Крайников, В.А. Шулов и др. // Физика и химия обработки материалов. 2008. № 3. С. 56–60.



Коэффициент скорости роста толщины покрытия при гетеродиффузии

Предложена методика расчета коэффициента скорости роста глубины проникновения при диффузии элемента покрытия в насыщаемый металл, основанная на экспоненциально затухающем процессе гетеродиффузии. Приведена проверка адекватности расчетов и эксперимента.

Ключевые слова: гетеродиффузия, покрытие, прирост массы, циркуляционный метод.

The design procedure of factor of growth rate of depth of penetration is offered at diffusion of an element of a covering in the sated metal, based on exponential fading process of heterodiffusion. Check of adequacy of calculations and experiment is resulted.

Keywords: heterodiffusion, covering, weight gain, circulating method.

Введение

Общепринятое выражение для роста толщины (y) покрытия при гетеродиффузии представляется в виде параболической зависимости:

$$y = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где k – коэффициент пропорциональности;
 τ – продолжительность процесса.

Такое представление роста толщины покрытия [1] качественно отражает тенденцию увеличения толщины слоя во времени. Формула выведена на основании того, что атомы, растворимые в металле, совершают хаотическое движение, но не учитывает того, что каждый последующий диффундирующий активный ион при гетеродиффузии встречает противодействие со стороны ранее растворенных в металле ионов.

Временная зависимость изменения параметров в системе, где учитывается зависимость протекания процесса от вышеобозначенных параметров, описывается выражением типа

$$y = 1 - e^{-k\tau}, \quad (2)$$

где y – фиксируемая во времени величина функции;
 k – коэффициент пропорциональности;
 τ – текущее значение времени.

Это типичное выражение, описывающее скорость изменения параметра. Естественно предположить, что в случае гетеродиффузии коэффициентом про-

порциональности будет величина, связанная с коэффициентом диффузии (в данном случае – для газа):

$$D = A e^{-\frac{Q}{RT}}, \quad (3)$$

где A – коэффициент, зависящий от типа кристаллической решетки;

Q – энергия активации, т.е. энергия, необходимая для того, чтобы "вырвать" атом с его места в решетке;

R – газовая постоянная;

T – абсолютная температура.

Окончательная формула для этой зависимости представляется в виде (уже не только для газа):

$$y = k_1 \sqrt{1 - e^{-k_2 D \tau}}, \quad (4)$$

где k_1, k_2 – коэффициенты пропорциональности.

Очевидно, что при $k_2 D \tau \ll 1$ приведенное выше выражение можно разложить в ряд и представить в виде

$$y^2 \cong k_1 D \tau - \frac{(k_2 D \tau)^2}{2}. \quad (5)$$

Если $(k_2 D \tau)^2 \ll k_1 D \tau$, выражение (5) совпадает с исходным выражением (1). В общем случае следует ожидать, что выражение (5) сможет представить скорость роста диффузионного слоя с достаточной степенью точности.

Следует отметить тот факт, что изучаемые процессы диффузии не могут быть описаны с помощью уни-

версальных формул, что обусловлено большим количеством полученных факторов при исследовании процессов в металлах и сплавах.

Известно, что ни одна из формул коэффициента диффузии не универсальна. И что расчеты величины D для сопоставления с данными эксперимента имеют смысл, если эти данные получены в условиях, исключая значительное влияние границ, дислокаций и других дефектов структуры, так как учесть это влияние теоретически пока не представляется возможным.

Методика проведения исследований

Исходя из этого положения был проведен сравнительный анализ результатов вычисления скорости роста толщины покрытия на основе экспериментальных усредненных данных с использованием формул (1) и (5).

Очевидно, что в самом начале процесса гетеродиффузии толщина покрытия равна нулю, а исходя из данных эксперимента на его начальной стадии можно вычислить коэффициент пропорциональности k_2 и на основе данных об усредненных значениях эксперимента вычислить ожидаемую величину y по формулам (1) и (5). Естественно, что дальнейшие усредненные значения толщины диффузионного слоя будут сравниваться с расчетными данными, чем и определится степень пригодности той и другой формулы.

В качестве опорных данных эксперимента были использованы величины толщины покрытий, полученные в работе [2].

Таким образом, следует сравнить результаты расчетов толщины слоя диффузии материала по двум формулам:

– параболическая форма зависимости, аналогичная выражению (1):

$$y = k\sqrt{\tau}; \tag{6}$$

– экспоненциальная форма уравнения, полученная для определения скорости образования слоя из выражения (4) заменой k_1 на m_0 и k_2 на k :

$$y^2 = m_0 \sqrt{1 - e^{-kD\tau}}. \tag{7}$$

В этом случае допускается, что m_0 – некая максимальная величина массы диффузии материала на 1 см^2 поверхности, определяемая данным режимом процесса, а k – коэффициент пропорциональности. Такая замена коэффициентов выражения (4) связана со следующим. В работе [2] приведены таблицы роста толщины слоя диффузии во времени, а также изменение массы диффузионного материала.

При изучении приводимых данных эксперимента отмечено, что измерение роста массы проводили с высокой степенью точности. Учитывается, что толщина слоя однозначно определяет массу диффундирующего материала. В первом приближении можно считать, что эта масса на площади 1 см^2 количественно равна толщине слоя, умноженной на некий коэффициент. Целесообразно определять скорость роста диффузионного слоя по приросту массы.

Вычисления проводят в следующей последовательности.

Для средних значений массы (например, для $\tau = 3$ и $\tau = 6$) составляют выражения согласно формуле (7). Из того и другого выражения определяют величины m_0 и e^{-3kD} , из последнего – e^{-kD} и e^{-4kD} . По этим величинам вычисляют значения прироста массы во времени.

Параболическая форма зависимости (6) изменения массы материала определяется следующим образом. Выбирают величину средней массы прироста \bar{m}_1 для $\tau = 1$, а последующие значения \bar{m}_3 , \bar{m}_4 и \bar{m}_6 вычисляют умножением \bar{m}_1 на величины $\sqrt{3}$, $\sqrt{4}$ и $\sqrt{6}$, соответственно.

Результаты и их обсуждение

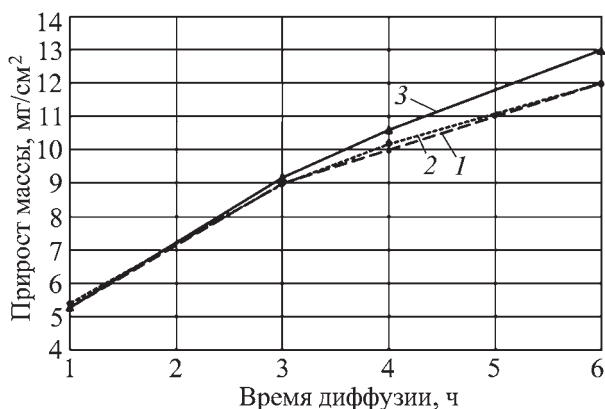
Результаты вычислений сведены в таблицу, а также представлены на рисунке. Следует отметить, что масса прироста

$$m = \rho S \Delta, \tag{8}$$

где ρ – удельный вес;

Значения прироста массы, определенные экспериментальным путем и по формулам (6) и (7)

T, К	Время диффузии, ч	Значение прироста массы, мг/см ²		
		Экспериментальное	Расчетное по уравнению (6)	Расчетное по уравнению (7)
1273	1	5,3	5,3	5,41
	3	9,0	9,18	8,99
	4	10,0	10,6	10,18
	6	12,0	12,985	11,99



Прирост массы диффузионного слоя, определенного экспериментальным и расчетными способами:

1 – эксперимент; 2, 3 – расчет по формулам (7) и (6) соответственно

S – 1 см^2 – выбранная величина площади покрытия;

Δ – толщина слоя.

Тогда

$$\Delta = \frac{m}{\rho S}. \quad (9)$$

Так как $\rho S = \text{const}$, то прирост толщины слоя протекает по тем же законам, что и прирост массы материала диффузии.

Выводы

1. Предложен способ описания коэффициента скорости роста покрытия при диффузии элемента покрытия в матричную фазу, основанный на экспоненциальном затухании процесса гетеродиффузии с ростом глубины проникновения атомов (ионов) от контрольной поверхности во времени.

2. Анализ выражения (6) показал, что при малых временах диффузии зависимость толщины диффузионного проникновения близка к параболической. Однако с увеличением времени диффузии возникает реакционный эффект торможения миграции атомов в насыщаемый металл, скорость роста покрытия ниже параболической и глубина проникновения достигает меньшего значения в зависимости от температуры и времени процесса.

3. Сравнение результатов расчета с экспериментальными данными подтверждает справедливость указанного подхода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Гуляев А.П. Металловедение. Учебник для вузов. 6-е изд., перераб. и доп. М.: Металлургия, 1986. 544 с.
2. Арзамасов Б.Н. Циркуляционный метод получения жаростойких и износостойких диффузионных покрытий на сплавах. М.: Машиностроение, 1980. 54 с.

Приятно осознавать, что журнал "Упрочняющие технологии и покрытия" стал индикатором научно-технического прогресса в нашей стране, занял прочные позиции в отражении новейших достижений в области упрочняющих технологий и покрытий, способствует продвижению России к вершине высокотехнологической продукции.

Примечательно, что в журнале публикуется информация о научных школах металлургов, их достижениях. Такая информация представляет огромный интерес и, в первую очередь, для научной элиты подрастающего поколения – аспирантов, магистров, бакалавров.

Журнал "Упрочняющие технологии и покрытия" уже имеет огромный авторитет в научном мире, несмотря на достаточно молодой возраст.

Тихоокеанский государственный университет сердечно поздравляет коллектив издательства "Машиностроение" с юбилеем журнала "Упрочняющие технологии и покрытия", желает больших творческих успехов в освоении такого важного информационного пространства, как упрочняющие технологии и покрытия материалов машиностроительного производства.

Заслуженный деятель науки РФ
д-р техн. наук, профессор

В.А. Лашко

УДК 669.017:621.785

А.А. Жуков, Л.А. Шапова (РГАТА им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск)
E-mail: root@rgata.ru

Статистическая оценка эксплуатационных свойств азотированного слоя

Получены корреляционно-регрессионные зависимости предела выносливости и износостойкости азотированного слоя от толщины и твердости упрочненного слоя.

Ключевые слова: статистическая оценка, азотирование, показатели качества, эксплуатационные свойства.

Correlative-regression dependences of endurance limit and wear resistance of the nitrogenized layer from thickness and hardness of the layer are received.

Keywords: statistical estimation, nitriding, parameters of quality, service properties.

Азотирование является наиболее эффективным способом обеспечения работоспособности и эксплуатационной надежности взаимно сопрягаемых деталей, работающих в условиях трения и износа. К таким деталям относят валы, оси, плунжерные пары, зубчатые колеса, направляющие втулки, поршневые кольца, кулачки, упоры и другие детали, рабочие поверхности которых должны обладать высокой твердостью, износостойкостью, контактной выносливостью. Анализ литературных и производственных данных [1–3, 7, 8] показывает, что необходимый комплекс эксплуатационных свойств упрочняемых деталей обеспечивается за счет оптимального сочетания толщины и твердости азотируемого слоя. Эти две характеристики являются основными показателями качества азотированного слоя, которые в значительной степени определяют эксплуатационные характеристики азотируемых зубчатых колес – предел контактной выносливости и износостойкость.

Влияние твердости и толщины упрочненного слоя на эксплуатационные характеристики цементуемых зубчатых колес исследовано в работах [4–6]. Установлена экстремальная зависимость предела выносливости от толщины слоя, при этом оптимальные значения толщины слоя выбираются в зависимости от толщины или модуля зуба.

Согласно ГОСТ 21354–87 [7] для азотированных зубчатых колес предел контактной выносливости можно оценить по соотношению: $\sigma_{Hlim} = 17HRC + 200$ ($\sigma_{Hlim} = 1050$ МПа). Однако во многих случаях указанная зависимость не подтверждается, т.е. не обеспечивается стабильное качество зубчатых колес.

В работах [5, 8, 9] предлагается для оценки эксплуатационной надежности зубчатых колес использовать не только традиционные показатели – твердость и толщину слоя, а также твердость сердцевины зуба и относительную толщину слоя. При этом установлено [5], что наибольшая контактная выносливость на образцах диаметром 6 мм, изготовленных из сталей

12ХН3А и 18ХГТ, получена при отношении толщины упрочненного слоя h к радиусу образца $R = 0,2...0,3$.

Исследование влияния твердости сердцевины на предел выносливости выполнены в работах [9, 10]. Установлены оптимальные значения твердости для достижения максимальных или близких к ним значений предела выносливости. Однако широкий интервал рекомендуемой твердости 29...43 HRC обуславливает нестабильное качество цементуемых зубчатых колес. Тем не менее, влияние твердости сердцевины на эксплуатационную надежность установлено и учет этого показателя очевиден и необходим.

Следовательно, для более точной оценки и прогноза эксплуатационных характеристик поверхностного слоя зубчатых колес после ХТО необходимо учитывать влияние абсолютной h и относительной h/R толщины слоя, твердость поверхности HV_n и сердцевины HV_c зуба. Учитывая сложный и многофакторный характер взаимосвязи между эксплуатационными характеристиками и показателями качества упрочняемого слоя использование аналитических методов в данном случае практически невозможно, поэтому для решения данной задачи использовали метод статистического анализа, который успешно применяется для решения многих трудноформализуемых задач.

Основная цель данной работы заключается в построении статистических моделей для оценки предела контактной выносливости и износостойкости азотируемых образцов в зависимости от показателей качества азотируемого слоя. Статистическая оценка этих показателей для различных марок сталей приведена в работе [11]. Таким образом, данная работа является продолжением работы [11] по данной тематике.

Исследование влияния толщины и твердости азотированного слоя на предел выносливости

В качестве исходных данных для статистического анализа использовали собственные производственные данные ОАО "НПО "Сатурн" и эксперименталь-

Таблица 1

Исходные данные для статистического анализа влияния толщины h и твердости HV на предел выносливости σ_{Hlim} азотированного слоя различных сталей

18X2H4BA				38XHMΦA				20XH3MΦA			
h , мм	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа	HV _n	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа	h , мм	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа	HV _n	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа	h , мм	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа	HV _n	$\sigma_{Hlim}/\sigma_{Hlimk}$, МПа
0,08	570/300	550	570/280	0,06	580/280	600	580/380	0,04	600/480	550	570/430
0,12	600/340	560	580/300	0,08	590/320	620	590/320	0,10	660/570	560	580/450
0,16	620/400	580	590/300	0,10	610/380	650	600/400	0,20	700/580	580	590/480
0,20	680/470	600	600/320	0,12	630/420	670	620/410	0,30	700/585	600	600/500
0,24	680/480	610	620/380	0,20	680/480	670	630/450	0,35	690/580	610	620/520
0,28	675/500	620	640/400	0,32	680/480	700	650/470	0,40	688/576	620	640/530
0,30	676/500	630	650/510	0,36	680/478	720	665/474	0,45	686/575	650	670/550
0,38	680/510	648	665/420	0,38	679/480	723	668/476	0,50	687/576	680	680/560
0,40	680/510	650	670/500	0,40	678/480	725	670/476	0,60	688/575	700	700/570
0,45	660/510	660	676/470	0,44	670/476	740	680/480				
0,50	665/500	680	680/450	0,48	668/476	748	690/500				
0,60	660/500	700	700/500	0,50	668/476	750	700/520				
				0,52	665/474	755	705/525				
				0,58	665/476	760	710/540				
				0,60	650/475	780	720/550				

Примечание. σ_{Hlim} – предел выносливости гладких образцов, σ_{Hlimk} – предел выносливости надрезанных образцов.

ные данные работ [1, 12, 13]. Для оценки влияния концентраторов напряжений исследования выполняли на гладких и надрезанных образцах диаметром 7,5 мм, надрез V-образной формы с углом 60° и глубиной 0,3 мм согласно ГОСТ 25.502–79 [14]. Азотирование образцов в зависимости от марки стали производили при температуре $t = 520...540$ °С в течение 48...60 ч. Исходные данные для статистического анализа представлены в табл. 1.

Анализ результатов, приведенных в табл. 1, показывает, что азотирование во всех случаях приводит к повышению предела выносливости как на гладких, так и на надрезанных образцах. Однако следует отметить, что влияние надреза на уменьшение предела выносливости на сталях различно. В качестве показателя

чувствительности к надрезу может служить отношение $K_H = \frac{\sigma_{Hlim} - \sigma_{Hlimk}}{\sigma_{Hlim}}$.

Математическая обработка результатов показала, что для стали 18X2H4BA $K_H = 0,3 \pm 0,07$, для стали 38XHMΦA $K_H = 0,279 \pm 0,05$ и для стали 20XH3MΦA $K_H = 0,185 \pm 0,02$. Меньшее значение K_H в последнем случае свидетельствует о меньшей чувствительности к надрезу стали 20XH3MΦA.

В результате корреляционного анализа по программе STATISTICA 6.0 для оценки степени влияния толщины и твердости поверхности на предел выносливости были рассчитаны парные коэффициенты корреляции r (табл. 2). Стали в табл. 2 расположены в

Таблица 2

Парные коэффициенты корреляции предела выносливости от толщины $r_{h-\sigma_{Hlim}}$ и твердости $r_{HV-\sigma_{Hlim}}$ азотированного слоя

Сталь	20XH3MΦA	38XHMΦA	18X2H4BA
$r_{h-\sigma_{Hlim}}$	0,976/0,978	0,973/0,978	0,965/0,938
$r_{HV-\sigma_{Hlim}}$	0,966/0,961	0,952/0,962	0,947/0,966

Примечание. В числителе представлены коэффициенты корреляции для гладких, в знаменателе – для надрезанных образцов.

порядке уменьшения коэффициента корреляции для предела выносливости от толщины азотированного слоя.

Из табл. 2 следует, что значения коэффициентов корреляции зависимости предела выносливости от толщины и твердости азотированного слоя для всех сталей высоки ($r > 0,9$), что свидетельствует о существовании сильной корреляции между этими признаками. Положительные значения коэффициента корреляции указывают на прямую связь предела выносливости от показателей качества азотированного слоя.

В результате статистического одномерного корреляционного анализа по программе STATISTICA 6.0 были получены зависимости предела выносливости гладких (рис. 1) и надрезанных (рис. 2) образцов из исследуемых сталей от толщины и твердости азотированного слоя.

Исследование влияния толщины и твердости поверхности азотированного слоя на предел выносливости показывает, что:

- твердость поверхности оказывает линейное прямо пропорциональное влияние на предел выносливости гладких и надрезанных образцов всех исследуемых сталей (рис. 1, 2). Следует отметить, что исследуемые значения твердости находились в рекомендуемых по ГОСТ 21354–87 пределах, при которых допустимое контактное напряжение при максимальной нагрузке не вызывает остаточной деформации или хрупкого разрушения поверхностного слоя;

- толщина азотированного слоя оказывает сложное влияние на предел выносливости. С ростом толщины слоя от 0,08 до 0,28 мм предел выносливости возрастает до определенного максимального значения на всех исследуемых сталях, затем не изменяется или незначительно снижается с дальнейшим увеличением толщины слоя.

Анализ графических зависимостей, приведенных на рис. 1 и 2, позволяет определить величину толщины и твердости азотированного слоя для достижения максимально возможного или необходимого значения предела выносливости. Максимальный предел выносливости порядка 675...700 МПа на гладких и 450...470 МПа на надрезанных образцах может быть

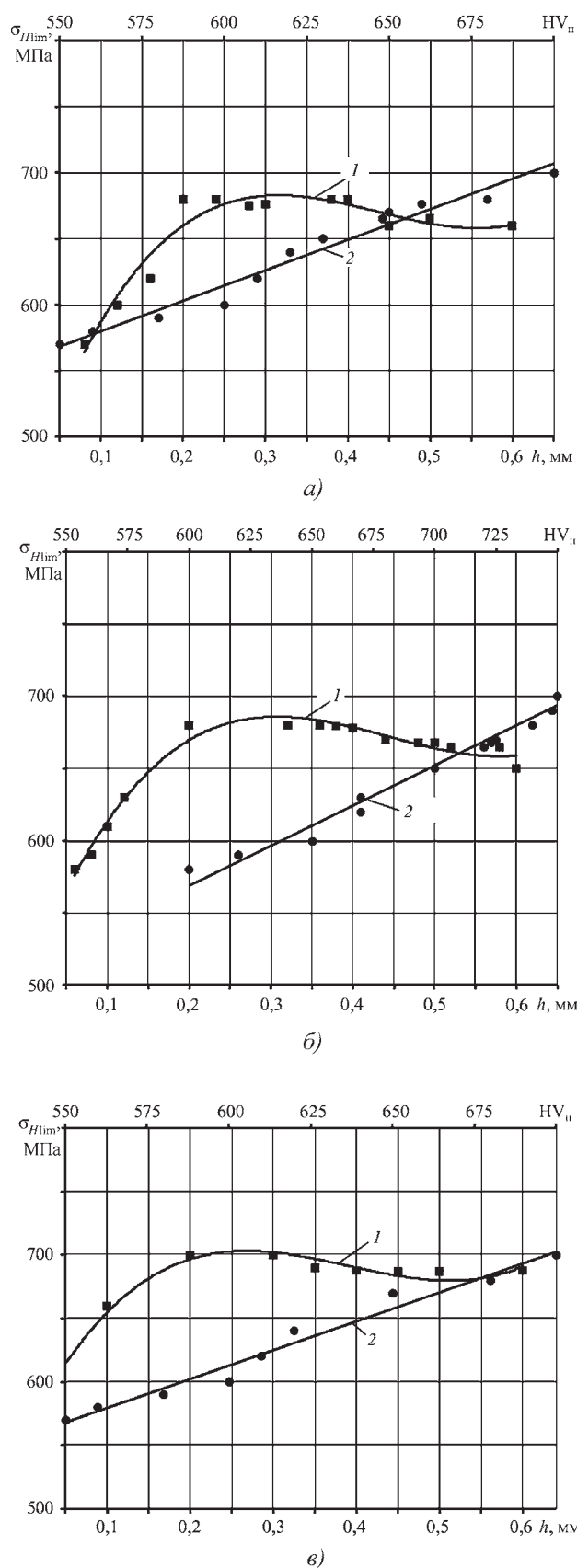
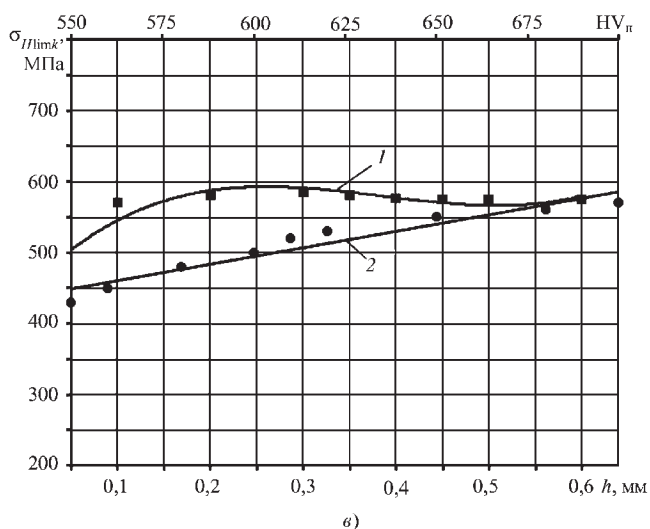
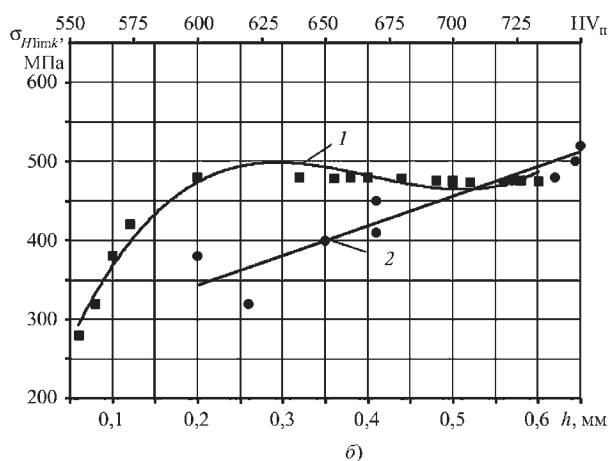
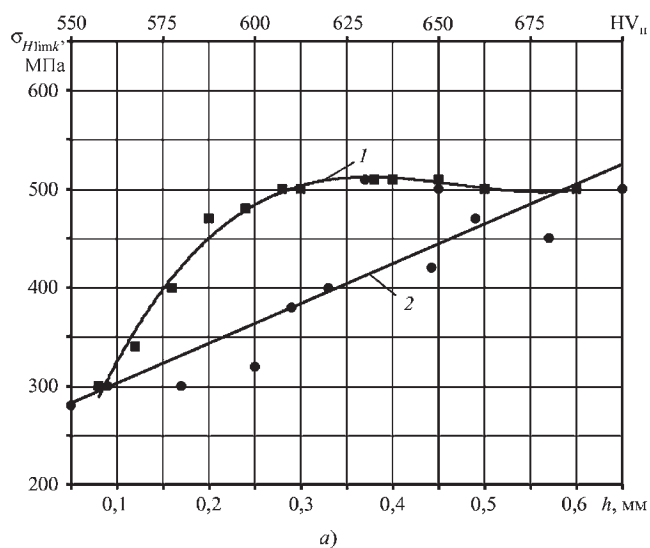


Рис. 1. Зависимость предела выносливости гладких образцов σ_{Hlim} от толщины (1) и твердости (2) азотированного слоя:

a – сталь 18X2H4BA ($\sigma_{Hlim} = 411,2 + 1882h - 4669h^2 + 3566h^3$; $\sigma_{Hlim} = 59,85 + 0,924HV_{0.05}$); *б* – сталь 38XHMΦA ($\sigma_{Hlim} = 500,9 + 1459h - 3632h^2 + 2728h^3$; $\sigma_{Hlim} = 71,44 + 0,829HV_{0.05}$); *в* – сталь 20XНЗМΦA ($\sigma_{Hlim} = 556,6 + 1325h - 3769h^2 + 3221h^3$; $\sigma_{Hlim} = 73,54 + 0,898HV_{0.05}$)



обеспечен при величине твердости слоя соответственно в пределах 660...700 и 650...700 ед. на стали 18X2H4BA. Максимальный предел выносливости 700...725 МПа для гладких и 520...550 МПа для надрезанных образцов может быть получен, соответствен-

Рис. 2. Зависимость предела выносливости надрезанных образцов σ_{Hlimk} от толщины (1) и твердости (2) азотированного слоя:

a – сталь 18X2H4BA ($\sigma_{Hlimk} = 100 + 2836h - 6316h^2 + 4498h^3$; $\sigma_{Hlimk} = 608,3 - 1,619HV_{\pi}$); *б* – сталь 38XHMΦA ($\sigma_{Hlimk} = 139,7 + 3019h - 8090h^2 + 6703h^3$; $\sigma_{Hlimk} = 328,4 - 1,121HV_{\pi}$); *в* – сталь 20XH3MΦA ($\sigma_{Hlimk} = 444,3 + 1379h - 4008h^2 + 3478h^3$; $\sigma_{Hlimk} = 51,91 - 0,911HV_{\pi}$)

но, при значении твердости слоя в 750...780 ед. на стали 38XHMΦA, 670...700 и 525...580 МПа соответственно для гладких и надрезанных образцов при значении твердости слоя в пределах 650...780 ед. на стали 20XH3MΦA.

Толщина слоя не менее 0,2 мм на стали 20XH3MΦA обеспечивает максимальный предел выносливости 700 МПа на гладких и 580 МПа на надрезанных образцах. На стали 38XHMΦA максимальный предел выносливости – 680 и 480 МПа соответственно на гладких и надрезанных образцах может быть достигнут при толщине слоя от 0,2 до 0,44 мм.

Для обеспечения максимального предела выносливости 680 и 500 МПа соответственно для гладких и надрезанных образцов из стали 18X2H4BA толщина слоя должна быть не менее 0,28 мм.

Рекомендуемые показатели (толщина слоя и твердость поверхности) должны быть контролируемы, так как являются критериями оценки эксплуатационной пригодности азотированных деталей. При этом следует обращать внимание на то, что основные показатели качества деталей должны находиться во взаимном динамическом равновесии, т.е. в оптимальном сочетании их величин. Показатели качества азотированных деталей, соответствующие технической документации, находятся в фиксированных интервалах (часто весьма широких) и их значения не способствуют обеспечению высоких и стабильных значений прочности и долговечности деталей. Так как эксплуатационный уровень предела выносливости формируется под взаимным влиянием показателей качества азотированного слоя, построенные однофакторные модели – парные уравнения регрессии – обычно оказываются недостаточными. В связи с этим была построена двухфакторная модель – уравнение линейной двухфакторной регрессии для сталей 38XHMΦA и 20XH3MΦA.

С помощью программы STATISTICA 6.0 было получено линейное уравнение двухфакторной регрессии для предела выносливости от толщины и твердости азотированного слоя $\sigma_{Hlim} = f(HV_{\pi}, h)$, МПа:

– для стали 38XHMΦA:

$$\begin{aligned} \sigma_{Hlim} &= 206,73 + 0,344h + \\ &+ 0,434HV_{\pi} + 0,898hHV_{\pi}; \end{aligned} \quad (1)$$

$$r^2 = 0,9898;$$

Таблица 3

Зависимость предела выносливости σ_{Hlim} сталей от критерия работоспособности K_p

38ХНМФА ($HV_c = 262$); $R = 3,75$ мм				20ХНЗМФА ($HV_c = 248$); $R = 3,75$ мм			
h , мм	HV_n	K_p	σ_{Hlim} , МПа	h , мм	HV_n	K_p	σ_{Hlim} , МПа
0,05	610	0,018	570	0,04	590	0,015	600
0,08	620	0,029	600	0,06	618	0,024	610
0,1	670	0,042	610	0,07	620	0,028	625
0,13	670	0,054	630	0,09	640	0,038	650
0,15	700	0,067	650	0,1	650	0,043	660
0,18	725	0,085	670	0,14	675	0,064	680
0,2	730	0,095	680	0,22	700	0,107	700
0,5	730	0,238	720	0,52	700	0,253	750

– для стали 20ХНЗМФА:

$$\begin{aligned} \sigma_{Hlim} &= 438,7 + 0,182h + \\ &+ 0,214HV_n + 0,3hHV_n; \end{aligned} \quad (2)$$

$$r^2 = 0,9812.$$

Адекватность двухфакторной модели оценивали критерием Фишера F . Расчетные значения критерия Фишера для предела выносливости азотированного слоя сталей 38ХНМФА и 20ХНЗМФА, соответственно $F_p = 3,3$ и $F_p = 2,6$, а табличные – $F_T(0,99; 11; 14) = 4,41$ и $F_T(0,95; 5; 8) = 3,69$. Так как $F_p \leq F_T$ модель можно считать адекватной.

Коэффициенты при членах уравнения регрессии показывают, насколько в среднем повышается предел выносливости за счет увеличения соответствующего фактора на единицу при фиксированном уровне другого фактора, входящего в уравнение регрессии. Из уравнений регрессии (1) и (2) предел выносливости определяется в большей степени совместным влиянием показателей качества азотированного слоя, чем по отдельности.

Известно, что недостаточная толщина слоя не обеспечит требуемой работоспособности даже при наличии достаточной твердости поверхности, так же как и пониженная твердость поверхности при повышенной толщине слоя [8]. Кроме этого анализ производственных данных ОАО "НПО "Сатурн" показывает, что использование в качестве показателей твердость и толщину азотированного слоя не обеспечивает стабильного качества зубчатых колес.

Таким образом, для повышения достоверности оценки работоспособности и стабильности качества разработан критерий. Сущность предлагаемого критерия заключается в одновременном учете твердости и толщины азотированного слоя. При этом согласно рассмотренным выше рекомендациям в критерий

входят: твердость поверхности HV_n и сердцевины HV_c зуба и относительная толщина слоя h/R . Это позволило получить безразмерный критерий работоспособности $K_p = \left(\frac{HV_n - HV_c}{HV_c} \right) \frac{h}{R}$.

Такой подход позволит в количественной форме оценить свойства материала изделия в том объеме, который в данных условиях испытания или работы нагружен наиболее интенсивно. В какой-то мере это оценка соответствия поля сопротивления материала детали полю нагружения. В табл. 3 приведены зависимости предела выносливости от критерия работоспособности.

На рис. 3 приведены зависимости предела выносливости образцов из стали 38ХНМФА и 20ХНЗМФА при контактных испытаниях от критерия качества (работоспособности) K_p , наблюдается очень тесная

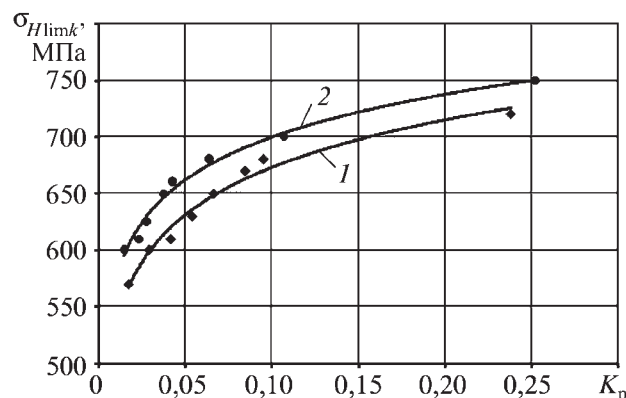


Рис. 3. Зависимость предела выносливости надрезанных образцов σ_{Hlimk} от показателя работоспособности K_p :
 1 – сталь 38ХНМФА ($\sigma_{Hlimk} = 812,72 + 60,623 \ln(K_p)$);
 2 – сталь 20ХНЗМФА ($\sigma_{Hlimk} = 826,08 + 54,886 \ln(K_p)$)

зависимость: коэффициент корреляции в этом случае равен 0,981 и 0,9851 соответственно.

Универсальность предложенного критерия качества подтверждается испытаниями образцов из разных марок сталей. На рис. 3 приведены зависимости характеристик предела выносливости от критерия K_p для образцов из сталей 38ХНМФА и 20ХНЗМФА. Зависимости для обеих марок сталей имеют аналогичный характер. При этом максимальный предел выносливости σ_{lim} наблюдается при одном и том же значении критерия качества ($K_p = 300...350$).

Исследование влияния толщины и твердости азотированного слоя на износостойкость

Долговечность зубчатых колес во многом определяется состоянием их поверхности и, в первую очередь, ее износостойкостью.

В настоящее время не установлено определенного влияния показателей качества азотированного слоя на износостойкость деталей. В связи с этим исследовали одну из самых распространенных характеристик качества и работоспособности азотированного слоя – износостойкость в зависимости от толщины и твердости упрочненного слоя.

Для статистической оценки величины износостойкости сталей от толщины и твердости азотированного слоя использовали производственные и экспериментальные данные работ [1, 15]. Исходные данные для статистического анализа представлены в табл. 4.

Результаты этого анализа, полученные по программе STATISTICA 6.0, представлены в виде графических зависимостей и статистических однофакторных корреляционных уравнений на рис. 4.

Интенсивность изнашивания снижается с ростом толщины и твердости упрочненного слоя (рис. 4).

Таблица 4

Исходные данные для статистического анализа влияния толщины h и твердости HV_n азотированного слоя на интенсивность изнашивания I_h стали 18X2H4BA

Влияние толщины слоя		Влияние твердости слоя	
h , мм	$I_h \cdot 10^6$, мкм/мин	HV_n	$I_h \cdot 10^6$, мкм/мин
0,015	145	400	42
0,030	104	470	50
0,067	67	500	45
0,080	63	560	52
0,090	58	570	52
0,100	54	600	36
0,110	42	670	34
0,200	32	700	30
0,250	28	720	25
0,500	20	750	20

Анализ графических зависимостей показал, что минимальное значение интенсивности износа ($I_h = 20 \cdot 10^6$ мкм/мин) достигается при толщине слоя h более 0,2 мм, при этом значение твердости HV_n азотированного слоя должно быть более 670 ед.

Практическая значимость статистической оценки влияния показателей качества азотированного слоя заключается в возможности использования полученных статистических зависимостей для прогнозирования эксплуатационных свойств азотированных деталей.

Предложенный критерий качества (работоспособность) K_p позволит конструктору обоснованно и целенаправленно, не снижая требований по прочности и долговечности, изменять значения показателей уп-

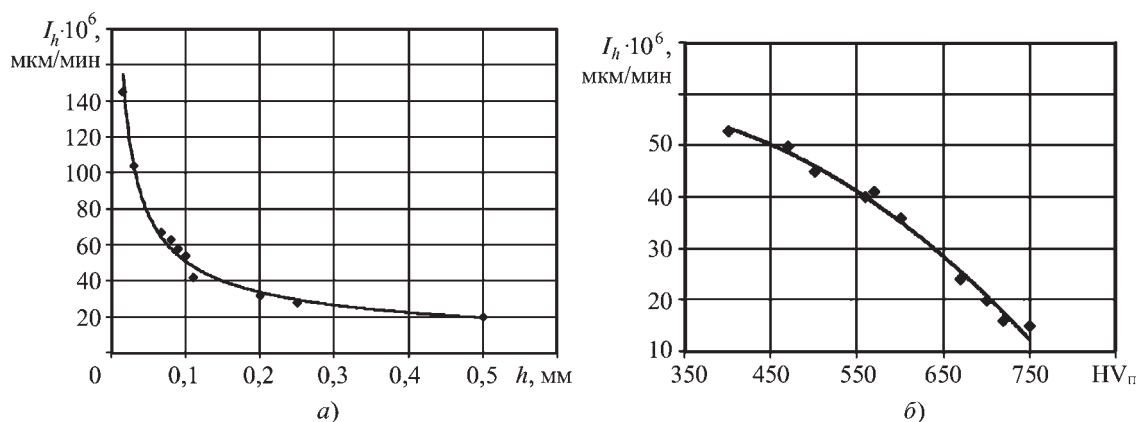


Рис. 4. Зависимость интенсивности изнашивания I_h от толщины h (а) ($I_h \cdot 10^6 = 13,04h^{-0,58}$) и твердости HV_n (б) ($I_h \cdot 10^6 = 47,74 + 0,085HV_n - 0,00018HV_n^2$) азотированного слоя стали 18X2H4BA

рочнения деталей: снижать или повышать твердость и толщину азотированного слоя, что позволит создать надежную основу для стабилизации эксплуатационных свойств деталей на требуемом высоком уровне.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лактин Ю.М., Коган Я.Д., Шпис Г.-И., Бомер З.** Теория и технология азотирования. М.: Металлургия, 1991. 320 с.
2. **Чаттерджи-Фишер Р., Эйзелл Ф.В., Хоффман Р.И.** и др. Азотирование и карбонитрирование: Пер. с нем; под ред. А.В. Супова. М.: Металлургия, 1990. 279 с.
3. **Арзамасов Б.Н., Братухин А.Г., Елисеев Ю.С., Панайоти Т.А.** Ионная химико-термическая обработка сплавов. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 1999. 400 с.
4. **Тескер Е.И.** Контактная прочность цементованных и нитроцементованных зубчатых колес // Металловедение и термическая обработка металлов. 1988. № 2. С. 6–12.
5. **Короткин В.Н., Харитонов Ю.Д., Онишков Н.П., Нахимович И.А.** Влияние силовых и геометрических параметров теоретически точного контакта поверхностно упрочненных зубчатых передач на выбор характеристик упрочненного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 8. С. 42–49.
6. **Асами К.** Усталостная прочность стали, подвергаемой цементации в вакууме // ВЦП. 1983. № Е-32918. 36 с.
7. **ГОСТ 21354–87.** Передачи зубчатые цилиндрические эвольвентные внешнего зацепления. Расчет на прочность. М.: Изд-во стандартов, 1988. 125 с.

8. **Зинченко В.М.** Инженерия поверхности зубчатых колес методами химико-термической обработки. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2001. 303 с.
9. **Оловянный В.А., Зинченко В.М., Георгиевская Б.В., Кузнецов В.В.** Структурные параметры и критерии оценки прочности и долговечности // Металловедение и термическая обработка металлов. 1989. № 8. С. 42–45.
10. **Боголюбова И.В., Георгиевская Б.В., Зинченко В.М.** Исследование механизма разрушения образцов из стали 12Х2Н4А в зависимости от режимов химико-термической и термической обработки // Металловедение и термическая обработка металлов. 1988. № 6. С. 2–4.
11. **Жуков А.А., Щапова Л.А.** Статистический анализ влияния химического состава сталей на показатели качества азотированного слоя // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 3. С. 48–52.
12. **Солодкин Г.А., Волков Г.М., Ратгауз Л.Я.** Прогнозирование предела выносливости сталей, упрочненных химико-термической обработкой // Металловедение и термическая обработка металлов. 1989. № 8. С. 37–41.
13. **Богуслаев В.А., Качан А.Я., Мозговой В.Ф., Корневский Е.Я.** Технология производства авиационных двигателей. Запорожье: Изд-во комплекс ОАО "Мотор Сич", 2000. Т. 1. 945 с.
14. **ГОСТ 25.502–79.** Расчеты и испытания на прочность в машиностроении. Методы механических испытаний металлов. Методы испытаний на усталость. М.: Изд-во стандартов, 1979. 27 с.
15. **Суслов А.Г.** Направления работ брянской технологической школы по решению проблемы "Обеспечения и повышения качества изделий машиностроения и технологической оснастки" // Справочник. Инженерный журнал. Приложение. 2004. № 11. С. 2–5.

От имени технологов Воронежа поздравляем журнал с юбилеем – 5-летием успешной работы!

Материалы журнала отличаются глубоким содержанием и пользуются большим спросом на предприятиях и в учебных заведениях г. Воронежа.

Мы надеемся на дальнейшее плодотворное сотрудничество и взаимную поддержку по выпуску журнала и расширению его тиража.

Желаем редакции журнала успехов в работе и выхода на международный уровень.

Àáí àðàèüí ù é àèðàèòì ð Áî ðí í àæñêîí ã
 ì àðáí è-àñêîí ã çàáí àà, ä-ð òáóí . í àóé,
 èàóðààòì ðáì èè Ì ðààèðàèüñòàà ÐÕ

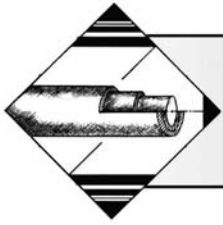
À.À. Áí í ààðü

Í àó-í ù é ðóêîí áî àèðàèü çàáí àà, ä-ð òáóí . í àóé,
 ï ðí ò áññî ð, çàñë. èçí á. ÐÑÕÑÐ çàñë. ðááí òí èè ÁØ ÐÕ,
 çàñë. ñí çààðàèü èí ñí è-àñêîí é òáóí èèè,
 èàóðààòì ðáì èè Ì ðààèðàèüñòàà ÐÕ

À.Ì . Ñì í èáí òáâ

Çàâááòð ù èè áàçí áí é èàò ááðí é ÁÃÕÇ
 ï ðí ò áññî ð, çàñë. ðááí òí èè ÁØ ÐÕ

À.È. Áí èäü ðáâ



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 631.3.02.004.67:621.922

Ю.А. Кузнецов, Н.В. Митюрева
(ФГОУ ВПО "Орловский государственный аграрный университет")
E-mail: kusnes@orel.ru

Шлифование деталей из алюминиевых сплавов, упрочненных микродуговым оксидированием

Приведены результаты исследований абразивного шлифования упрочненных микродуговым оксидированием деталей из алюминиевых сплавов кругами на основе карбида кремния. Проанализировано влияние режимов шлифования на качество обрабатываемого материала.

Ключевые слова: упрочнение, деталь, шлифование, режимы, характеристика круга.

The results of abrasive grinding of aluminium alloys elements hardened by microarc oxidation, applying silicon carbide wheels are given in the article. The grinding modes influence on the processed material quality.

Keywords: hardening, element, polishing, modes, wheel, characteristics.

Повысить долговечность деталей из алюминиевых сплавов позволяет *микродуговое оксидирование* (МДО). Структуры МДО-покрытий состоят из двух слоев: верхнего рыхлого, пористого слоя и плотного, бездефектного внутреннего. Внешний слой покрытия необходимо удалять, так как при работе он будет осыпаться и служить дополнительным абразивом. После этого внутренний слой необходимо подвергать окончательной механической обработке, так как точность размеров и формы, шероховатость поверхности, а также физико-механические свойства материала, полученные при окончательной механической обработке, оказывают существенное влияние на работу эксплуатируемых соединений.

Шлифование является окончательной операцией механической обработки, в процессе которой формируется поверхностный слой материала детали и микрогеометрия поверхности. Важно знать, в какой степени влияют характеристики шлифовального круга и оптимальные с точки зрения производительности режимы на основные показатели шлифования МДО-покрытий и качество обрабатываемых покрытий.

Упрочняющие покрытия, полученные МДО, по своим механическим свойствам можно отнести как к группе материалов, которые шлифуются инструментами из электрокорунда, так и к материалам, для обработки которых применяются абразивные инструменты из карбида кремния. В связи с этим для исследований были выбраны два вида абразивного

материала – электрокорунд белый марки 25А и карбид кремния зеленый марки 63С.

Зернистость шлифовальных кругов является одним из важнейших технологических факторов, определяющих все показатели шлифования. Для операций предварительного и окончательного шлифования применяются в основном круги зернистостью 16, 25 и 40, поэтому для исследований были взяты эти значения зернистости.

Влияние твердости круга на его изнашивание и затупление носит сложный характер (рис. 1). При обработке МДО-покрытий слишком твердым кругом шлифование сопровождается интенсивным налипанием металла на площадки износа абразивных зерен, так как с повышением твердости кругов абразивные зерна удерживаются связкой прочнее, самозатачивание таких кругов затруднительно и период стойкости их будет мал. При использовании слишком мягкого круга шлифование протекает с преобладающим самозатачиванием (осыпанием) и сопровождается повышенным расходом абразива, что также нежелательно. С учетом этого можно предположить, что твердость кругов, близкая к оптимальной, при шлифовании МДО-покрытий будет соответствовать среднемягким значениям твердости (СМ1, СМ2). Эксперименты проводили кругами М1, М2, СМ1 и СМ2.

Структура круга характеризует количественное соотношение абразивных зерен, связки и пор в единице объема круга, т.е. структура определяет его строение.

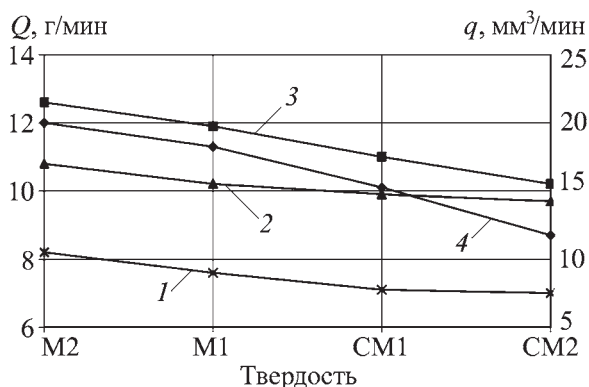


Рис. 1. Влияние твердости кругов на производительность Q шлифования (1, 2) и на изнашивание q кругов (3, 4): 1, 3 – материал круга 25А; 2, 4 – материал круга 63С

Уменьшение структуры приводит к увеличению количества режущих кромок на поверхности круга, но при этом уменьшается расстояние между режущими кромками и свободное пространство для размещения стружки. При шлифовании микропористых покрытий, характеризующихся пониженной тепло- и температуропроводностью, высокая концентрация абразивных зерен приведет к нежелательному увеличению контактной температуры шлифования. С другой стороны, уменьшение структуры характеризуется уменьшением связки, а значит, абразивные зерна на рабочей поверхности круга удерживаются слабее, что будет благоприятствовать работе инструмента в режиме самозатачивания. Следовательно, при обработке микропористых покрытий ни увеличение структуры кругов, ни ее уменьшение не приведут к явному повышению их стойкости. Поэтому очевидно, что оптимальный номер структуры абразивного инструмента при шлифовании МДО-покрытий соответствует средним номерам гостированного ряда структуры (5...7).

Связка всех исследуемых кругов – керамическая.

Перед началом опыта круги подвергали правке. При шлифовании каждым кругом измеряли следующие параметры процесса:

1. Стойкость круга до его затупления;
2. Износ круга;
3. Производительность обработки;
4. Шероховатость обработанной поверхности;
5. Микротвердость поверхностного слоя обрабатываемого покрытия.

При шлифовании МДО-покрытий большую стойкость показали круги из карбида кремния зеленого. Зерна этого материала имели форму неправильного многогранника с острыми выступающими гранями, которые более легко разрушались, образуя новые режущие кромки. Поэтому круги из карбида кремния

зеленого обладали большой самозатачиваемостью. С другой стороны, зерна электрокорунда имели округлую форму с большим радиусом сопряжения граней. С увеличением размера этих зерен условия резания ими ухудшались и усилия резания возрастали. Однако прочность крупных зерен электрокорунда выше, поэтому они не скалывались, а изнашивались более интенсивно из-за худших условий резания. Таким образом, при шлифовании МДО-покрытий круги из карбида кремния зеленого марки 63С обладали большей стойкостью между правками, чем круги из электрокорунда белого 25А.

Производительность шлифования была выше при обработке инструментами из карбида кремния, что объясняется их лучшей режущей способностью. С ростом зернистости производительность снижалась, причем в большей степени для кругов из электрокорунда (рис. 2). При обработке кругами зернистостью 16 количество снимаемого за 1 мин материала кругом из карбида кремния составила 9,9 г, а электрокорундовым – 9,2 г. При зернистости 40 производительность составила 9,1 и 6,1 г/мин соответственно.

На микротвердость МДО-покрытий существенное влияние оказывает как характеристика абразивных кругов, так и изменение их режущих свойств во времени (затупление). С увеличением зернистости кругов микротвердость обрабатываемого покрытия снижается. Так при шлифовании острыми кругами зернистостью 40 из обоих абразивных материалов микротвердость покрытия снижалась и по мере затупления инструмента происходило дальнейшее снижение микротвердости. Круг зернистостью 25 из карбида кремния зеленого начал воздействовать на качество покрытия после 30...35 мин работы. При шлифовании таким же кругом из электрокорунда микротвердость покрытия уменьшалась после первых минут работы. Наименьшее влияние на качество

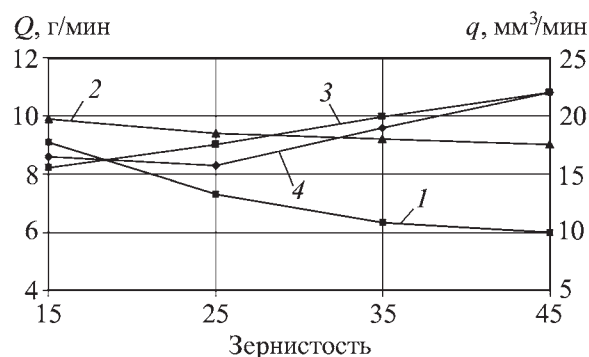


Рис. 2. Влияние зернистости на производительность Q шлифования (1, 2) и на изнашивание q кругов (3, 4): 1, 3 – материал круга 25А; 2, 4 – материал круга 63С. Твердость кругов – CM2

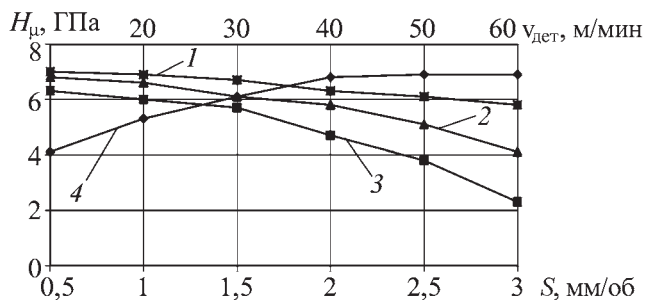


Рис. 3. Влияние скорости продольной подачи стола (1, 2, 3) и скорости вращения детали (4) на микротвердость МДО-покрытия:

1 – $t = 0,005$ мм/ход, $v_{дет} = 30$ м/мин; 2 – $t = 0,01$ мм/ход, $v_{дет} = 30$ м/мин; 3 – $t = 0,02$ мм/ход, $v_{дет} = 30$ м/мин; 4 – $t = 0,01$ мм/ход, $S_{пр} = 1,0$ м/мин

МДО-покрытия оказывали инструменты с зернистостью 16. Круг этой зернистости из карбида кремния зеленого не влиял на покрытие на протяжении всего периода стойкости (53 мин), а из электрокорунда белого – на протяжении 32 мин своей работы.

Наряду с характеристиками шлифовальных кругов, режимы шлифования оказывают существенное влияние как на экономические показатели процесса (производительность, расход мощности, износ круга и др.), так и на качество обрабатываемого материала. Ремонтным предприятиям необходимы рекомендации, применение которых обеспечило бы хорошее качество деталей, упрочненных МДО при высокой производительности и низкой стоимости их обработки. Поэтому для обеспечения качественной обработки деталей из алюминиевых сплавов, упрочненных МДО, необходимо изучить вопросы, связанные с обрабатываемостью МДО-покрытий и изменением их физико-механических свойств при действии различных условий шлифования.

Согласно проведенным исследованиям оптимальная глубина шлифования – 0,005...0,040 мм/ход [1]. Отмечено также, что на качество МДО-покрытий при их шлифовании значительное влияние оказывает скорость продольного перемещения стола и особенно сочетание высокой скорости продольной подачи с большими глубинами резания (рис. 2). Если производится шлифование с продольной подачей $S_{пр} = 3,0$ м/мин, то уже при глубине шлифования $t = 0,02$ мм значительно снижается микротвердость и на шлифованной поверхности образуются прижоги.

Увеличение скорости вращения детали при постоянстве остальных режимов приводит к уменьшению их влияния на обрабатываемое покрытие. С увеличе-

нием скорости вращения детали микротвердость покрытия возрастает, так как уменьшается длительность соприкосновения точек контакта при шлифовании и сокращается тепловое воздействие круга на покрытие. При скорости вращения изделия более 40...50 м/мин, постоянных значениях глубины шлифования и продольной подачи ($t = 0,01$ мм, $S_{пр} = 1,0$ м/мин) обеспечивается неизменность исходных свойств покрытия (рис. 3).

Увеличение скорости вращения изделия желательное также с точки зрения повышения производительности. Так как величина продольной подачи при круглом шлифовании назначается в долях ширины круга на оборот изделия, увеличение числа оборотов последнего приводит к увеличению и скорости продольной подачи стола, в результате чего время шлифования сокращается.

Было исследовано влияние количества подаваемой в зону резания охлаждающей жидкости (СОЖ) на микротвердость МДО-покрытия. Установлено, что СОЖ оказывает влияние на изменение микротвердости шлифуемых покрытий только в случае ее подачи в количестве менее 2 л/мин. Значительное влияние на шероховатость шлифуемой поверхности оказывает и выхаживание. С увеличением количества ходов выхаживания шероховатость поверхности уменьшается тем интенсивнее, чем больше была глубина шлифования.

Выводы

Таким образом, для шлифования упрочненных МДО поверхностей деталей из алюминиевых сплавов были рекомендованы круги на основе карбида кремния зеленого зернистостью 16, твердостью СМ2, керамической связкой, открытой структурой. Были проведены исследования с использованием шлифовального круга марки 63С16СМ29КЗБ. Для сохранения исходных свойств МДО-покрытий и обеспечения высокого качества поверхности их чистовое шлифование необходимо производить при следующих условиях: глубина $t = 0,005...0,01$ мм/ход, продольная подача $S_{пр} = 1,0...1,5$ м/мин, скорость вращения детали $v_{дет} = 40...50$ м/мин, скорость круга $v_{кр} = 30$ м/с, количество СОЖ – 4...6 л/мин, выхаживание – 2 прохода.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Кузнецов Ю.А., Митюрёва Н.В., Гришин Н.Н. Качество упрочненных шлифованных поверхностей деталей из алюминиевых сплавов // Механизация и электрификация сельского хозяйства. 2008. № 11. С. 39–40.



ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

УДК 628.141.15(07)

В.Н. Белобородов, А.Н. Ли (СибНИИГиМ, г. Красноярск),
В.И. Емелин (Сибирский федеральный университет, г. Красноярск),
Г.Н. Долматов (Красноярский государственный аграрный университет)
E-mail: izotor@krasinet.ru

Технология нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов

Рассмотрены результаты исследования и производственной апробации технологии бестраншейного ремонта трубопроводов способом нанесения внутритрубных композиционных покрытий. При этом дана классификация предложенных вариантов реализации этого способа, рассмотрены их достоинства и недостатки, а также характеристики рекомендованных технологических материалов, конструктивные схемы разработанного оборудования, параметры и режимы его работы.

Ключевые слова: бестраншейный ремонт трубопроводов, композиционные покрытия, применяемые технологические материалы и оборудование.

The results of investigation and production approval of trenchless pipelines repair technology by means of inside polymeric coverings are offered. Meanwhile classification of variants of this method realization is presented; their advantages and disadvantages are considered, there are also considered characteristics of recommended technological materials, developed equipment constructive schemes, parameters and regimes of its operation.

Keywords: trenchless repair of pipelines, composite coverings, applied technological materials and equipment.

Актуальность работы по бестраншейному ремонту трубопроводов обусловлена большой протяженностью трубопроводов в России (2,4 млн км) и огромным объемом ремонта (около 70 % их протяженности требуют ремонта или замены). По сравнению с преимущественно применяемым в настоящее время в России траншейным методом ремонта бестраншейный полностью или практически полностью исключает работы по рытью траншей, разрушению и последующему восстановлению асфальта и зеленых насаждений, вывозу и последующему завозу грунта при ведении работ в городских стесненных условиях, снижает вероятность транспортных пробок, уменьшает опасность травматизма и загрязнения окружающей среды. Поэтому данный метод характеризуется меньшими затратами, трудоемкостью и длительностью работ более чем в 2–3 раза.

Из множества известных бестраншейных способов ремонта трубопроводов обращает на себя внимание технология внутритрубного нанесения композиционных покрытий, получившая название Phvenix ("Феникс"), а в России она наиболее широко известна как способ комбинированного рукава. Этот способ был разработан в Японии, затем усовершенствован груп-

пой Le Joint Interne Gruppe и применен по ее лицензии фирмой Imbema. В России этот способ впервые был широко применен Московским водоканалом [1]. Несмотря на большой вклад этих фирм, а также позднее подключившихся – Preusag Wasser und Rorttechnik GmBX, Epros. International. Ltd. UK, Clean Water Works Ins., – этот способ требует дальнейшего совершенствования с целью упрощения конструкции рукава и оборудования, возможности изготовления рукава непосредственно на объекте, ускорения пропитки клеем тканевой оболочки и выполнения работ при более низких температурах. В этом направлении часть из указанных задач (прежде всего по упрощению конструкции рукава) авторами была решена ранее [2, 3]. В данной статье приведены и проанализированы результаты решения дополнительных задач и сделаны обобщения всех решений.

Сущность рассматриваемого способа заключается в изготовлении, пропитке полимерным составом и введении в трубопровод одно- или многослойной тканевой оболочки под защитой пленочного рукава. После отверждения полимерного состава в трубопроводе образуется композиционное покрытие, толщина которого зависит от числа слоев тканевой оболочки

(≥ 2 мм) в виде новой, соединенной со старой, дополнительной пластмассовой трубы. Использованный пленочный рукав для ввода оболочки в трубопровод и полимеризации клея удаляют.

Весь процесс бестраншейного ремонта трубопроводов рассматриваемым способом включает три периода (подготовительный, главный и заключительный), каждый из которых содержит ряд операций. Так, подготовительный период включает телеинспекцию трубопровода, разработку проекта производства работ, отрывку прямков (если есть необходимость) и др. В главный период входят очистка и прогрев трубопровода (при необходимости), нанесение и полимеризация покрытия, контроль качества. К операциям заключительного периода относят испытание отремонтированного трубопровода, его промывка, приемка, засыпка прямков, восстановление асфальтового покрытия и зеленых насаждений. Операции подготовительного и заключительного периодов могут быть выполнены с перерывами по времени и с использованием серийно выпускаемых машин. Операции главного периода должны быть реализованы без перерывов или с кратковременным перерывом в несколько минут и с использованием пока что несерийного вновь изготавливаемого оборудования.

Выше были перечислены только укрупненные операции 1-го уровня, которые включают несколько операций 2-го уровня. Так, например, операция нанесения и отверждения покрытия (1-й уровень) содержит следующие операции 2-го уровня: транспортирование и расстановку необходимого оборудования; его подключение к источникам энергии и заправку расходными технологическими и эксплуатационными материалами; пропитку полимерным составом тканевой оболочки; изготовление комбинированного рукава (эта операция в различных вариантах рассматриваемой технологии может быть выполнена как в подготовительный период в стационарных условиях, так и в главный период в условиях объекта); ввод комбинированного рукава в трубопровод, его перемещение и выдержку по времени для отверждения полимерного состава.

Путем лабораторного исследования и отработки технологии в производственных условиях для реализации про-

цесса ремонта были выбраны следующие технологические материалы: полиамидная фильтровальная ткань толщиной 1 мм (артикул 56035), эпоксидная смола ЭД-20, ее отвердитель ПЭПА и полиэтиленовая пленка толщиной 150...200 мкм. Также экспериментально определены пропорции между компонентами для приготовления полимерного состава. При этом разработано, изготовлено, испытано и рекомендовано для применения несколько вариантов способа и оборудования на уровне изобретений [4–14], выбираемых в зависимости от условий выполнения технологических операций. Разработанный комплекс вариантов рассматриваемого способа в виде классификации показан на рис. 1, анализ достоинств и недостатков каждой пары этих вариантов представлен в таблице, а разработанные конструктивно-технологические схемы реализации предложенных вариантов даны на рис. 2 и 3.

После нанесения покрытия и его отверждения на каждом участке обязательно должна быть выполнена телеинспекция. Поверхность покрытия должна иметь сплошную глянцевую поверхность без вздутий и пузырей.

Завершающей операцией в главном периоде процесса бестраншейного ремонта является стыковка восстановленных участков трубопровода, которая может быть выполнена сварочным или бессварочным методами, каждый из которых может быть реализован несколькими способами.

Сварочный метод стыковки может быть осуществлен двумя способами: с использованием пакера и вварки катушки с более толстыми стенками.



Рис. 1. Классификация вариантов реализации способа внутритрубного нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов

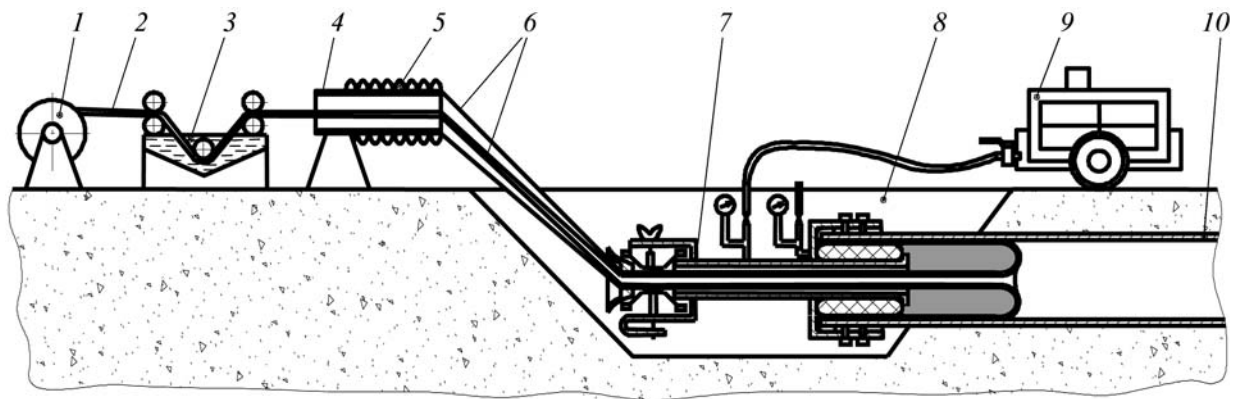


Рис. 2. Конструктивно-технологическая схема бестраншейного ремонта трубопроводов способом комбинированного рукава:
 1 – барабан; 2 – тканевая оболочка; 3 – ванна с клеем; 4 – устройство для изготовления комбинированного рукава; 5 – пленочный рукав; 6 – комбинированный рукав; 7 – устройство для герметичного ввода комбинированного рукава в трубопровод; 8 – прямик; 9 – компрессор; 10 – трубопровод

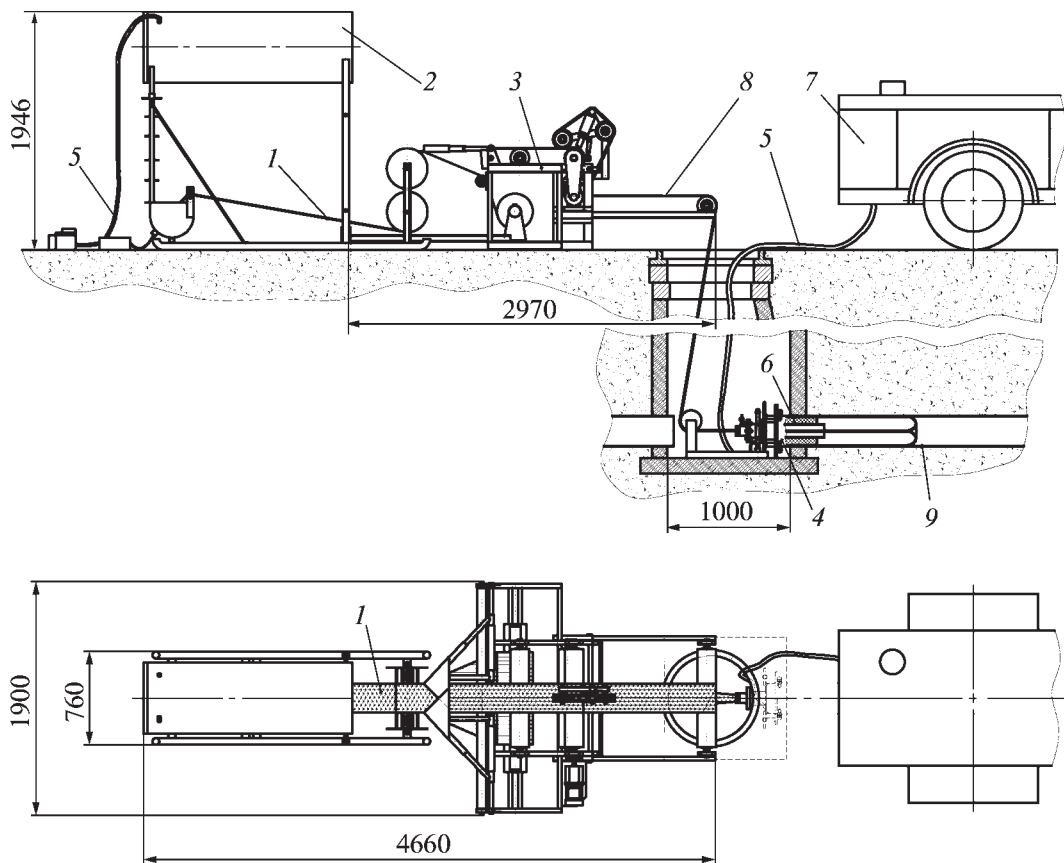


Рис. 3. Общий вид комплекса оборудования для бестраншейного ремонта трубопроводов:
 1 – тканевая оболочка; 2 – установка для ускоренной пропитки тканевых оболочек полимерным составом; 3 – установка для изготовления комбинированных рукавов; 4 – устройство для герметичного ввода комбинированного рукава в трубопровод; 5 – шланги; 6 – пневмоманжета; 7 – компрессор; 8 – комбинированный рукав; 9 – ремонтный трубопровод

В первом случае, кроме пакера, используют вырезанную катушку из ремонтируемого трубопровода. Учитывая, что применяемое композиционное покрытие

не является жаростойким, то перед сваркой этой катушки необходимо по периметру трубы удалить нанесенное композиционное покрытие на глубину

Сравнение различных вариантов реализации способа нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов

Варианты	Преимущества 1-го варианта	Недостатки 1-го варианта
1. Использование свернутой в спираль несшитой тканевой оболочки. 2. Использование сшитой в виде рукава тканевой оболочки	Качественное приклеивание тканевой оболочки к стенкам прямолинейных трубопроводов без образования складок, в случае отклонения их диаметра от номинального. Исключение операции сшивки тканевой оболочки	Невозможность применения при ремонте криволинейных участков трубопровода из-за раздвижки спирали
Ввод рукава в трубопровод через: 1) гидрозатвор или барокамеру; 2) пневмо- или механический затвор	Исключение отжима клеевого состава при прохождении рукава через гидрозатвор или барокамеру. Снижение сопротивления при вводе рукава в трубопровод	Нетехнологичность применения воды при отрицательных температурах воздуха. Значительные габариты гидрозатвора. В случае применения барокамеры недостатков нет
Ввод и прижатие рукава к стенкам трубопровода с использованием: 1) воздуха; 2) воды	Более технологично, экономично и менее трудоемко	Нецелесообразность применения при ремонте криволинейных участков трубопровода с углами поворота более 30° из-за образования складок и неполного проклеивания более длительная полимеризация клея из-за меньшей теплоотдачи воздуха в случае его применения для нагрева
Ввод рукава в трубопровод с выворотом: 1) под давлением; 2) под вакуумом	Возможность восстановления участков трубопровода со сквозными дефектами. Меньшая длительность ввода рукава, особенно при ремонте трубопроводов больших диаметров на протяженных участках, так как время создания давления не зависит от длины участка, создание же вакуума пропорционально длине участка	Потребность в специальных вводных устройствах. Невозможность визуального контроля качества приклеивания рукава в процессе его ввода
1. Протяжка тканевой оболочки через трубопровод без ее выворота с помощью лебедки с последующим вводом внутрь оболочки полиэтиленового рукава способом выворота. 2. Протяжка через трубопровод лебедкой тканевой оболочки с ранее вложенным в нее полиэтиленовым рукавом, изготовленным одновременно с оболочкой	Более качественное приклеивание тканевой оболочки к внутренней поверхности трубопровода	По сравнению со вторым вариантом недостатков нет
1. Ввод и перемещение комбинированного рукава (тканевая оболочка вложена в пленочный рукав) в трубопроводе способом выворота. 2. Ввод и перемещение комбинированного рукава лебедкой с последующим его раздувом и прижатием к стенкам трубопровода	Более качественное приклеивание тканевой оболочки к стенкам трубопровода	Потребность в специальных устройствах для герметичного ввода рукава в трубопровод

0,15...0,20 м от каждого из концов трубопровода. После этого катушку устанавливают на место и сваривают с восстановленными участками трубопровода. Затем на весь неизолированный участок трубопровода наносят с

нахлестом на оклеенные участки многослойное композиционное покрытие. Для чего на пакер надевают полиэтиленовый рукав, соответствующий внутреннему периметру трубопровода, и наматывают на него пропи-

танную эпоксидным составом ткань на длину не менее 3 периметров трубопровода. Далее пакер доставляют к месту стыковки участков трубопровода и через подводящий воздух шланг производят его разжатие. При этом происходит раздвижка слоев пропитанной клеем ткани до контакта со стенками трубопровода. После полимеризации клея давление воздуха в пакере сбрасывают и его вместе с полиэтиленовым рукавом извлекают из трубопровода.

Конструктивно-технологическая схема стыковки участков трубопровода вторым способом показана на рис. 4, а, который заключается в следующем. Еще до нанесения покрытия на эти участки от новой толстостенной трубы (с толщиной стенок в 1,5–2,0 раза большей, чем старая) отрезают катушку на длину катушки от старой трубы. Затем от новой катушки отрезают два кольца шириной по 0,2...0,3 м каждый и приваривают на концы восстанавливаемых участков. После этого на них наносят покрытие с последующим его удалением после полимеризации клея на половину ширины кольца. Затем приваривают оставшуюся часть новой катушки. Для усиления изоляции на концах восстановленных участков в местах приварки колец на них рекомендуется с нахлестом наложить внутренние бандажи шириной 0,3...0,4 м в виде 2- или 3-слойного покрытия из пропитанной клеем ткани с использованием торообразной заглушки по аналогии с использованием пакера.

Бессварочный метод стыковки восстановленных участков трубопровода рекомендуется осуществлять также двумя способами с использованием тканеклевого и труботканеклевого наружных бандажей.

По первому из этих способов на ранее вырезанную из ремонтируемого трубопровода катушку наносят композиционное покрытие с использованием пакера или торообразной заглушки. При этом концы покрытия на 0,15...0,20 м заводят и приклеивают к наружной поверхности концов катушки. Затем устанавливают катушку на место и из 3 или 4 слоев пропитанной эпоксидным составом ткани устраивают наружный бандаж (рис. 4, б). С целью повышения надежности этот бандаж еще до окончания полимеризации смолы рекомендуется стянуть хомутом из листовой стали толщиной 2...4 мм и шириной 0,3...0,4 м.

Второй способ стыковки от предыдущего отличается тем, что вместо хомутов рекомендуется использовать стальную трубу длиной на 1,0...1,2 м длиннее вырезанной катушки с зачеканкой ее внутреннего свободного пространства полимер-цементным составом (рис. 4, в).

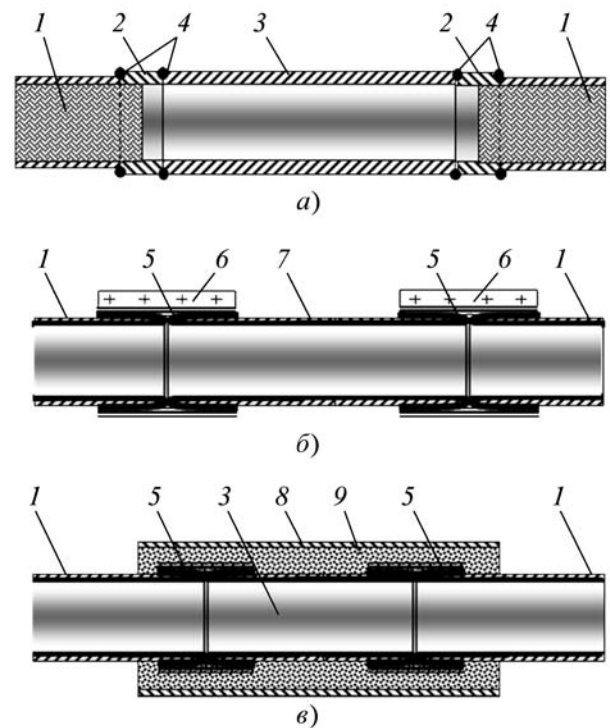


Рис. 4. Способы соединения восстановленных участков трубопровода:

а – сваркой с использованием катушки из толстостенной трубы; б – без сварки с использованием тканеклевого бандажа; в – без сварки с использованием труботканеклевого бандажа; 1 – оклеенный участок трубопровода; 2 – кольца из толстостенной трубы; 3 – катушка из толстостенной трубы; 4 – сварные стыки; 5 – тканеклеевой бандаж; 6 – хомут из листовой стали; 7 – катушка из старой трубы; 8 – труба; 9 – полимербетон

Фотофрагменты разработанного технологического процесса показаны на рис. 5. Процесс и разработанное оборудование с использованием авторских патентов на изобретения [4–14] успешно прошли апробацию в производственных условиях на объектах: Есаульской оросительной системы Березовского района Красноярского края (640 м – Ø 300 мм; 236 м – Ø 700 мм), водопровода в Дивногорске (400 м – Ø 219 мм; 200 м – Ø 150 мм), трубопровода под взлетной полосой аэропорта Домодедово (60 м – Ø 273 мм; без прекращения полетов самолетов); водопровода из железобетонных труб в Канске (165 м – Ø 800 мм); трубопровода в Саяногорске под дорожной насыпью (72 м – Ø 300 мм); технологического водопровода на железнодорожной станции Зыково Красноярской железной дороги (1500 м – Ø 150 мм, без остановки движения поездов).



Рис. 5. Фотофрагменты выполнения операций бестраншейного ремонта трубопроводов способом комбинированного рукава:
а, б – взламывание асфальта и копание грунта при устройстве приемков; *в* – сушка и прогрев трубопроводов; *г* – применяемые скребковые, щеточные и поршневые устройства для очистки трубопроводов; *д* – обеспыливание трубопроводов; *е, ж, з* – пропитка тканевых оболочек клеем в ванне, лотке и установке ускоренной пропитки под вакуумом; *и* – изготовление комбинированного рукава в полевых условиях; *к* – ввод комбинированного рукава с его выворотом и использованием пневмозатвора; *л* – то же, но без выворота способом протяжки через колодец; *м, н* – трубопровод до и после его ремонта

Выводы

1. Составлена классификация предложенных вариантов реализации способа нанесения композиционных покрытий при бестраншейном ремонте трубопроводов, выявлены достоинства и недостатки этих вариантов.
2. Выбраны технологические материалы и определены их характеристики исходя из требуемого качества ремонта.
3. Рассмотрены конструктивные схемы разработанного оборудования, определены параметры и режимы его работы.
4. Предложены четыре конструктивные схемы соединения восстановленных участков трубопровода.
5. Разработанное и изготовленное оборудование применяется на объектах для бестраншейного ремонта трубопроводов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Храменков С.В., Примин О.Г., Орлов В.А. Бестраншейные методы восстановления водопроводных и водоотводящих сетей. М.: ТИМР, 2000. 179 с.
2. Белобородов В.Н., Ли А.Н., Савченко В.Т. Технология оклеечной изоляции внутренней поверхности трубопроводов // Мелиорация и водное хозяйство. 1999. № 4. С. 42–44.
3. Белобородов В.Н., Ли А.Н., Савченко В.Т. Отечественная бестраншейная технология восстановления трубопроводов // РОБТ. 2004. № 8. С. 5–10.
4. А.с. 1780854 SU, В 05 С 7/08. Устройство для нанесения жидкости на внутреннюю поверхность труб / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, М.Н. Белобородов и др.

5. А.с. 1796290 SU, В 08 В 9/04. Устройство для очистки внутренней поверхности трубопроводов / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, М.Н. Белобородов и др.

6. Пат. 2145028 РФ, И 6 Т 58/10, В 29 С 63/34. Способ оклейки внутренней поверхности трубопровода тканью / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко.

7. Пат. 2148203 РФ, F 16 L 58/10. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко и др.

8. Пат. 2151655 РФ, В 05 С 7/08. Устройство для нанесения жидкости на внутреннюю поверхность трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко и др.

9. Пат. 2198341 РФ, F 16 L 58/10. Способ восстановления трубопровода и устройство для его осуществления / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко, В.И. Емелин.

10. Пат. 2212578 РФ, F 16 L 58/10. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода и устройство для его осуществления / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко и др.

11. Пат. 2248497 РФ, F 16 L 58/10. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко, В.И. Емелин.

12. Пат. 2293241 РФ, F 16 L 1/00. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.И. Емелин.

13. Пат. 2337270 РФ, F 16 L 58/10. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.И. Емелин и др.

14. Пат. 2340829 РФ, F 16 L 58/00. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.И. Емелин и др.



ЛИТЕЙНЫЕ ПРОТИВОПРИГАРНЫЕ ПОКРЫТИЯ: справочник

Н.И. Давыдов

Цена 440 р.

2009. – 240 с.: ил. ISBN: 978-5-94275-438-9

Систематизирован практический материал по литейным противопригарным покрытиям, используемым для получения качественных отливок.

Рассмотрена природа пригара (наиболее распространенного дефекта отливок) и дано обоснование эффективности применения покрытий как средства предотвращения указанного дефекта.

Описаны свойства покрытий и методы их испытаний, а также некоторые сведения о современных приборах и оборудовании, в том числе используемых за рубежом. Представлены справочные данные об исходных материалах и составах покрытий, рекомендуемых для изготовления в условиях потребителя, а также о марках, свойствах и области применения промышленно выпускаемых противопригарных композиций. Приведены сведения о покрытиях, используемых за рубежом. Дана необходимая информация, касающаяся оборудования для изготовления покрытий, а также технологии их нанесения и отверждения.

Для инженерно-технических работников литейного производства, может быть полезен аспирантам и студентам.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромьинский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

Отчет о Международной научно-практической конференции "Инженерия поверхностного слоя деталей машин" 9–11 декабря 2009 г.

Конференция проходила в Кузбасском государственном техническом университете (КузГТУ) с 9 по 11 декабря 2009 г., где были представлены 38 докладов по широкому кругу проблем:

- современные тенденции развития методов формирования и трансформации наноструктурного состояния поверхностного слоя и создания нанокomпозиционных машиностроительных материалов;
- новые методы комбинированного упрочнения деталей машин и нанесения многофункциональных покрытий;
- технологическое управление качеством и эксплуатационными свойствами изделий;
- неразрушающий контроль ответственных изделий на основе применения современных физических методов и средств;
- обеспечение развития эффективного взаимодействия с российскими учеными, работающими за рубежом, закрепление их в российской науке и образовании, использование их опыта, навыков и знаний для развития отечественной системы науки, образования и высоких технологий.

Конференция проведена при поддержке гранта "Инженерия поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла ответственных деталей машин", выполняемого в рамках ФЦП "Научные и научно-педагогические кадры инновационной России" на 2009–2013 гг. по мероприятию: 1.5 "Проведение научных исследований коллективами под руководством приглашенных исследователей", государственный контракт № 02.740.11.5049 от 20.07.2009 г.

В соответствии с программой проведения конференции участники конференции рассмотрели ключевые проблемы и перспективы развития методов формирования и трансформации состояния поверхност-

ного слоя, создания нанокomпозиционных машиностроительных материалов, комбинированного упрочнения деталей машин и нанесения многофункциональных покрытий, а также были рассмотрены вопросы технологического управления качеством и эксплуатационными свойствами изделий, неразрушающего контроля на основе применения современных физических методов и средств.

По итогам проведения конференции ее участники приняли следующие рекомендации:

1. В целях обеспечения развития эффективного взаимодействия с российскими учеными, работающими за рубежом, и для укрепления международных отношений между Российской Федерацией и Республикой Беларусь принять решение о создании совместного Российско-Белорусского центра упрочняющих технологий на базе Механико-машиностроительного факультета КузГТУ и Механико-технологического факультета Белорусского национального технического университета (БНТУ) (Республика Беларусь, г. Минск).

2. Для повышения результативности научно-исследовательских работ развить практику проведения КузГТУ и БНТУ совместных научно-исследовательских работ в соответствии с представленной проблематикой конференции.

3. В целях повышения качества образования и подготовки кадров высшей квалификации рекомендовать развитие системы взаимного обмена студентами, магистрантами и аспирантами между университетами.

4. Провести 2-ю Международную научно-практическую конференцию "Инженерия поверхностного слоя деталей машин" в апреле 2010 г.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромьинский 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 01.12.09 г. Подписано в печать 27.01.10 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,88. Заказ 99. 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