

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 5 (53)

май

2009

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:

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



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Сайфуллин Р.Н., Нафиков М.З. О возможности восстановления изношенных валов электроконтактной приваркой стальных проволок с порошковым покрытием . 3



МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Гурьянов Г.Н. Особенности волочения стальной заготовки с покрытием кадмия . 7



ТЕРМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Дураков В.Г., Дампилон Б.В., Гнусов С.Ф. Роль мелкодисперсных выделений карбида ванадия в повышении износостойкости покрытий из хромистого чугуна . 10



ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Воронкова М.Н., Потапов Н.Н. Технология нанесения упрочняющих покрытий плазменным напылением при восстановлении деталей оборудования промышленности строительных материалов 15

Любимов В.В., Иванов А.В., Витальский Д.В. Выбор параметров ионной модификации поверхностей деталей машин и инструментов 18

Тарасов А.Н., Павловский Н.Р., Тилипалов В.Н., Ильин В.В. Электроимпульсно-дуговое легирование углеродистых сталей через подслоя электропроводящей эмали 22

Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В., Дуда И.М. Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF-устройств для газотермического напыления покрытий 27

Хромов В.Н., Коренев В.Н., Барабаш В.В. Оценка объемных наноструктурированных покрытий при газопламенном напылении с использованием водородно-кислородного пламени 33



ХИМИЧЕСКАЯ, ХИМИКО-ТЕРМИЧЕСКАЯ И ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ ОБРАБОТКА

Жуков В.А., Корытов С.В., Навоев А.П. Влияние параметров топливopодачи в дизелях на выбор упрочняющей обработки зубчатых колес механизма привода агрегатов 38



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Барабаш М.А., Колмыков Д.В., Гончаров А.Н., Колмыков В.И. Повышение износостойкости восстановленных деталей цементацией при ремонте машин 44



ПЕРСПЕКТИВНОЕ ОБОРУДОВАНИЕ И СИСТЕМЫ АВТОМАТИЗАЦИИ

Перекрестов А.П. Определение интенсивности изнашивания в агрессивных газовых средах, являющихся компонентами перерабатываемого и перекачиваемого природного газа 48

Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 5 (53)
May
2009

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:

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

- ➔ **GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING**
 - Sayfullin R.N., Nafikov M.Z. On the possibility of restoring outworn arbors by electro-contact welding of steel wires with powder coating. 3
- ➔ **MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING**
 - Guryanov G.N. Features of drawing steel Preparations with a covering of cadmium . . 7
- ➔ **THERMAL PROCESSING**
 - Durakov V.G., Dampilon B.V., Gнусov S.F. The Role of the fine-dispersed vanadium carbide in the increase of the wear-resistance chromium iron 10
- ➔ **PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY**
 - Voronkova M.N., Potapov N.N. Technology drawing of strengthening coverings plasming raise at restoration of details of the equipment of the industry of building materials 15
 - Lybimov V.V., Ivanov A.V., Vital'sky D.V. Choice of parameters of ionic updating of surfaces of details of machines and tools 18
 - Tarasov A.N., Pavlovsky N.R., Tilipalov V.N., Ilyin V.V. Electric-impact arc alloying of carbonaceous steels from the precoat of electroconductive enamel 22
 - Tyurin Y.N., Kolisnichenko O.V., Duda I.M. Comparative analysis of cumulative-detonation and HVOF thermal spray installations efficiency 27
 - Chromov V.N., Korenev V.N., Barabash V.V. Estimation of volumetric nanopatterning flame coatings at spraying by hydrogen-oxygen flame 33
- ➔ **CHEMICAL, CHEMICO-THERMAL AND ELECTROCHEMICAL PROCESSING**
 - Zhukov V.A., Korytov S.V., Navoev A.P. Influence of fuel distribution's parameters of internal combustion engines on choice of type of strengthening for gear drive 38
- ➔ **PROCESSING BY COMBINED METHODS**
 - Barabash M.A., Kolmickov D.V., Goncharov A.N., Kolmickov V.I. Increasing of the endurance of retread parts by cementation when repairing of machines 44
- ➔ **PERSPECTIVE EQUIPMENT AND AUTOMATION SYSTEMS**
 - Perekrestov A.P. The determine of wear intension in aggressive gas medium, appearing the components of the processed and swaping natural gas 48

Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses



Р.Н. Сайфуллин, М.З. Нафиков (Башкирский ГАУ, г. Уфа)

О возможности восстановления изношенных валов электроконтактной приваркой стальных проволок с порошковым покрытием

Показана возможность изготовления стальных проволок с покрытием из металлических порошков. При электроконтактной наплавке таких проволок на изношенных поверхностях валов формируется композитное износостойкое покрытие.

Ключевые слова: восстановление деталей, электроконтактная приварка, напекание порошков.

The possibility of making steel wires with the coating of the metallic powders is shown. Under electro-contact welding of such wires a composite wearproof coating is formed.

Keywords: restoring outworn components, electro-contact welding, agglomeration of powders.

Состояние вопроса

Электроконтактные способы восстановления изношенных валов можно отнести к числу прогрессивных и ресурсосберегающих. Эти способы, основанные на методах шовной сварки, отличаются от электродуговых методов восстановления малым нагревом детали, отсутствием выгорания легирующих элементов, минимальными припусками на последующую механическую обработку наплавленного металла и др.

В качестве присадочного материала при электроконтактных способах восстановления используют стальные ленты и проволоки, а также металлические порошки. Достоинства перечисленных присадочных материалов широко известны. Но каждый из них имеет и свои специфические недостатки.

Необходимость предварительного раскроя ленты и закрепления ее на восстанавливаемой поверхности усложняет технологический процесс и ограничивает номенклатуру восстанавливаемых деталей. Даже при оптимальных режимах процесса не удается исключить дефектов наплавки в виде пор, трещин, выкрашивания наплавленного слоя. В наплавленном слое формируются значительные по величине растягивающие остаточные напряжения.

К недостаткам стальных проволок можно отнести и структурную неоднородность металлопокрытия, повышенный износ инструмента – ролика-электрода.

При напекании металлических порошков трудно регулировать толщину и плотность нанесенного слоя, велики потери присадочного материала, сложно

обеспечить стабильное качество металлопокрытия при восстановлении длинных шеек валов.

Для уменьшения перечисленных выше недостатков может быть перспективно применение при электроконтактных способах восстановления сочетания присадочных материалов, позволяющее получать композитные металлопокрытия. Например, известен способ приварки к изношенной поверхности стальной сетки с подачей в зону формирования соединения металлического порошка [1].

Ниже рассмотрена возможность восстановления изношенных валов стальной проволокой с нанесенными на ее поверхность порошком.

Нанесение порошка на присадочную проволоку

Выпускаемые промышленностью пустотелые присадочные проволоки с порошковым наполнителем предназначены для дуговых видов сварки и не могут применяться при электроконтактных способах наплавки. В Башкирском ГАУ предложено для формирования электроконтактным способом на изношенных поверхностях комбинированных металлопокрытий применять стальную присадочную проволоку сплошного сечения с напеченным на нее слоем металлического порошка.

Были проведены эксперименты, подтверждающие возможность изготовления такой проволоки. В зажимах стыковой сварочной установки МС-801 крепили сварочную электродную проволоку Св-08 (ГОСТ 2246–70) диаметром 1,8 мм, пропущенную через бункер с порошком ПЖР 3.200.28 ГОСТ 9849–86. После

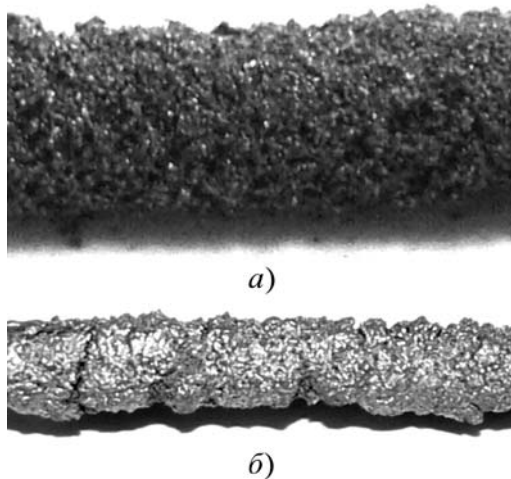


Рис. 1. Порошковая проволока:
a – при оптимальных выдержке и токе; *б* – при продолжительной выдержке

включения тока порошок притягивался к проволоке и припекался к ее поверхности.

Масса напеченного порошка и прочность сцепления его с проволокой определяются величиной тока (температурой нагрева проволоки) и длительностью выдержки. При недостаточных токе и выдержке порошковый слой легко осыпается с поверхности проволоки, при избыточной выдержке оплавляется и растрескивается (рис. 1). При оптимальных выдержке ($t \approx 40...45$ с) и токе напеченный на проволоку слой хоть и получается хрупким и при сгибании или навивке вокруг цилиндрической детали трескается, но при этом не осыпается. Проволока с таким слоем может навиваться на катушки большого диаметра (более 300 мм) без нарушения сплошности порошкового слоя.

Особенности приварки порошковой проволоки на деталь

Порошковую проволоку можно приварить на изношенные цилиндрические детали при помощи установок для восстановления деталей электроконтактной приваркой конструкции "Ремдеталь": 011-1-05, 011-102Н, 01-11.022М и др. Шаг наплавки по винтовой линии S устанавливается значительно (примерно в 2...3 раза) больше, чем при наплавке обычной стальной проволоки. Порошковая проволока разогревается импульсами тока, ее основа – стальная проволока осаживается и приваривается к детали.

Порошок, покрывающий проволоку, выдавливается из контактов, прессуется наплавляющим роли-

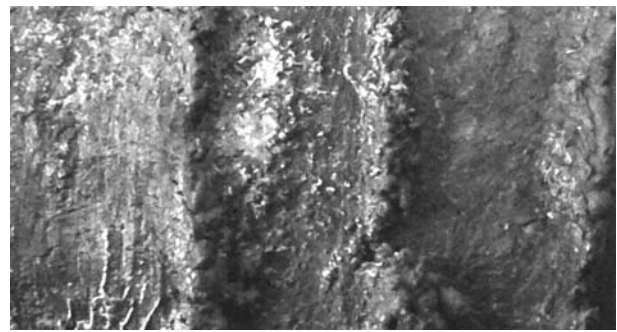


Рис. 2. Поверхность покрытия после электроконтактной приварки порошковой проволоки

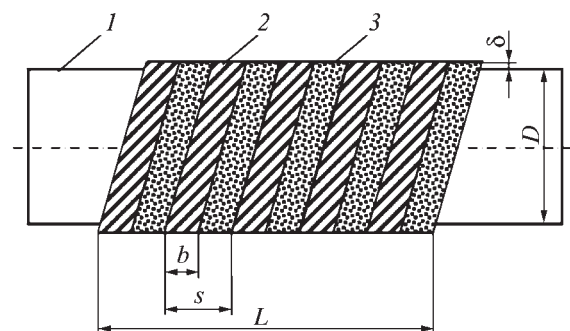


Рис. 3. Схема приваренного слоя проволоки с напеченным слоем порошка:
 1 – деталь; 2 – проволока; 3 – порошок

ком и деформируемой стальной основой, припекается к поверхности детали и сварному валику. Образуется композитное покрытие, содержащее чередующиеся витки из присадочной проволоки и металлического порошка (рис. 2). Схема приваренного слоя приведена на рис. 3.

Присадочная проволока при наплавке испытывает трехмерную пластическую деформацию. Наиболее прочное сварное соединение стальной проволоки с основой детали образуется при значении осевой составляющей деформации порядка $\epsilon_{oc} = 0,42...0,46$. Режим наплавки необходимо подбирать именно из этого условия [2].

При наплавке композитных проволок необходимо использовать ролики-электроды шириной не менее 15 мм.

Методика расчета плотности напекаемого на деталь порошка

Для определения плотности порошковой зоны на покрытии произведем следующие расчеты (см. рис. 3).

Из проволоки длиной $L_{пр}$ и диаметром d на деталь диаметром D наваривается сварной валик длиной L_b , шириной b и высотой δ . Относительная осевая деформация присадочной проволоки

$$\varepsilon_{ос} = (L_b - L_{пр}) / L_{пр}.$$

Отсюда длина наплавленного валика

$$L_b = L_{пр} (1 + \varepsilon_{ос}).$$

Объемы присадочной проволоки и сварного валика практически равны между собой:

$$V_{пр} = \frac{\pi d^2}{4} L_{пр} = V_b = b \delta L_b.$$

Таким образом, среднюю толщину металлопокрытия можно определить без ее непосредственного измерения:

$$\delta = \frac{\pi d^2}{4(1 + \varepsilon_{ос})b}.$$

Число витков покрытия при наплавке шейки длиной L с шагом S

$$n = L/S. \quad (1)$$

Длина одного витка покрытия

$$L_{ед} = \sqrt{(\pi D)^2 + S^2}. \quad (2)$$

Определим число витков покрытия как отношение длины сварного валика к длине одного витка:

$$n = L_b / L_{ед}. \quad (3)$$

Приравняв (1) и (3), с учетом (2) определим длину восстанавливаемой шейки при наплавке присадочной проволоки длиной $L_{пр}$:

$$L = \frac{S L_b}{\sqrt{(\pi D)^2 + S^2}}.$$

Объем нанесенного слоя (из порошка и проволоки)

$$V = \pi D L \delta.$$

Объем напеченного на деталь порошка

$$V_{п} = V - V_{пр} = \pi D L \delta - L_{пр} \frac{\pi d^2}{4}.$$

Плотность напеченного порошка

$$\rho_{п} = \frac{M_{п}(1 - k_{п})}{V_{п}},$$

где $M_{п}$ – масса использованного порошка; $k_{п}$ – коэффициент потерь порошка (принимается 5 %).

Результаты экспериментальных исследований

Экспериментально найденная зависимость ширины наплавленного стального валика от диаметра восстанавливаемой детали показана на рис. 4. Регулированием тока наплавки добивались оптимального значения осевой деформации присадочной проволоки $\varepsilon_{ос} = 0,45$. Шаг наплавки по винтовой линии устанавливали из соотношения $S = (2...3)b$.

При поисковых экспериментах была также определена зависимость массы напеченного на проволоку Св-08 диаметром 1,8 мм порошка ПЖР 3.200.28 от времени выдержки (рис. 5). Масса напекаемого порошка определялась весовым методом. Температура нагрева проволоки при напекании на нее порошка поддерживалась в пределах 1300...1350 °С.

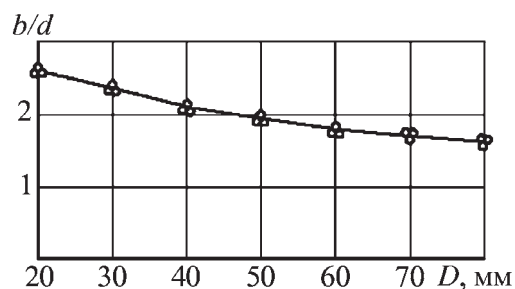


Рис. 4. Экспериментальные значения относительной ширины b/d наплавленного валика при ЭКН валов различных диаметров (при $\varepsilon_y = 0,44...0,46$)

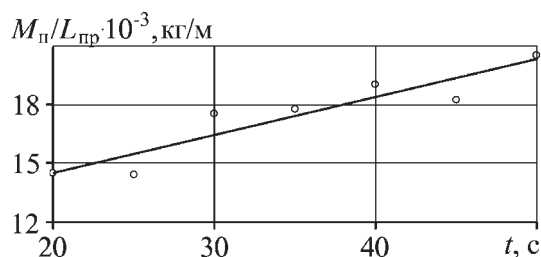


Рис. 5. Зависимость погонной массы напеченного на проволоку порошка от времени напекания

Свойства композитного покрытия

Наплавленное электроконтактным способом покрытие имеет две разделенные друг от друга зоны (см. рис. 3). Зона покрытия, образованная деформированным металлом проволоки, имеет высокую прочность и жесткость. Прочность образуемого сварного соединения приближается к прочности основного металла детали. Эта часть покрытия воспринимает силовую нагрузку в подвижном сопряжении и исполняет роль своеобразного каркаса. Вторая зона покрытия образована из порошка, она пористая и хорошо впитывает и удерживает смазку.

Как показали ускоренные износные испытания, проведенные по схеме буксового трения, износостойкость композитного покрытия в 1,4...1,5 раза выше износостойкости металлопокрытия, сформированного электроконтактной приваркой проволоки без покрытия.

Порошок достаточно прочно сцепляется с деталью и витками проволоки, не выкрашивается, его можно механически обрабатывать точением или шлифованием.

Плотность порошкового покрытия

Плотность напекаемого на поверхность восстанавливаемой детали порошковой зоны покрытия зависит от погонной массы нанесенного на проволоку порошка и от технологических параметров режима электроконтактной наплавки детали – прежде всего от шага наплавки по винтовой линии и эффективного значения тока наплавки.

По приведенным выше аналитическим зависимостям были подсчитаны значения плотности для случая наплавки шейки диаметром $D = 50$ мм проволокой Св-08 диаметром $d = 1,8$ мм с порошком ПЖР 3.200.28. При вычислениях принято $\varepsilon_{oc} = 0,45$, $S = 2b = 7$ и $S = 3b = 10,5$ мм. На рис. 6 показан график зависимости плотности ρ порошкового покрытия от продолжительности t напекания порошка на присадочную проволоку.

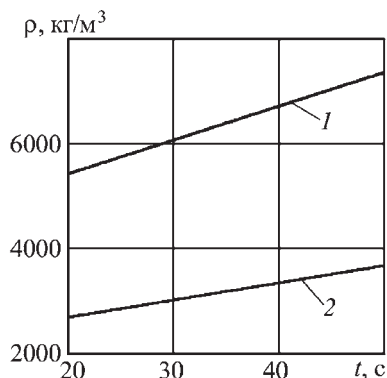


Рис. 6. Плотность нанесенной на поверхность восстанавливаемой детали порошковой зоны покрытия в зависимости от длительности процесса напекания порошка на проволоку. Шаг наплавки:

$1 - S = 2b$; $2 - S = 3b$

Выводы

1. Показана возможность нанесения на присадочную стальную проволоку металлического порошка и формирования электроконтактным способом на восстанавливаемой поверхности вала композитного покрытия, состоящего из чередующихся зон, образуемых из проволоки и порошка.

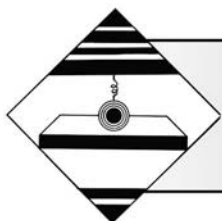
2. Износостойкость сформированного слоя существенно выше износостойкости покрытия из проволоки без порошка.

3. Результаты настоящего исследования можно использовать при разработке технологии механизированного нанесения металлических порошков на присадочные проволоки.

4. Предлагаемый способ восстановления деталей после дальнейших исследований может найти производственное применение для восстановления деталей подвижных сопряжений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Фархшатов М.Н., Гаскаров И.Р., Юнусбаев Н.М. Уменьшение потерь порошковых материалов при электроконтактной приварке // Механизация и электрификация сельского хозяйства, 2005. № 11. С. 32.
2. Нафиков М.З. Формирование сплошного металлопокрытия при электроконтактной наплавке валов // Упрочняющие технологии и покрытия. 2006. № 9. С. 24–29.



УДК 621.778

Г.Н. Гурьянов (ООО "ФЕНИКС +", г. Белорецк)

Особенности волочения стальной заготовки с покрытием кадмия

Приведены результаты исследования процесса волочения стальной проволоки с кадмиевым покрытием. Волочение стальной кадмированной заготовки характеризуется повышенной обрывностью вследствие охрупчивающего влияния кадмия на сталь и потерей легкодеформируемого покрытия. Использование инструмента с развитой гидродинамической подачей смазки в очаг деформации позволило значительно снизить температуру волочения, потерю кадмиевого покрытия и обрывность переднего конца проволоки.

Ключевые слова: волочение, проволока, покрытие кадмия, пластичность, разрушение, толщина покрытия.

Results of research of process of drawing steel wire with covering of cadmium are resulted. Drawing of steel preparation with a covering of cadmium is characterized by the raised frequency of breakages owing to decrease in plasticity of steel from action of cadmium and loss of a covering. Use of the tool with the developed hydrodynamical submission of greasing in the center of deformation has allowed to lower considerably temperature of drawing, loss of a covering and destruction of the forward end of a wire.

Keywords: drawing, wire, covering of cadmium, plasticity, destruction, thickness of the covering.

Введение

Кадмиевое покрытие наносится на поверхность метизов гальваническим способом. Кадмий имеет низкий предел текучести 10 МПа и невысокую температуру плавления (~320 °С). Значительное различие сопротивления деформации кадмия и стали вызывает затруднения в обеспечении стабильности их совместной деформации при волочении кадмированной проволоки [1].

Цель работы: показать особенности волочения стальной кадмированной заготовки.

Методика исследования

Исследовали влияние режимов волочения на потери кадмиевого покрытия. На патентованную заготовку из стали марок 50 и У9А осаждали покрытие с толщиной слоя 18 и 30 мкм¹. В качестве подмазочного слоя при волочении использовали известково-солевое покрытие. Смазкой служил мыльный порошок.

Волочение осуществляли на однократном стане с барабаном диаметром 550 мм со скоростью 1 м/с по маршруту:

2,90 – 2,60 – 2,40 – 2,20 – 1,85 – 1,70 – 1,60 – 1,50 – 1,40 мм.

¹ Работу по разработке режимов нанесения покрытия выполнили сотрудники ВНИИМетиза (г. Магнитогорск) Е.М. Романова и Х.Ф. Сеничева.

Для волочения использовали обычные одинарные и стандартные сборные волокна конструкции Орлова–Колмогорова.

Образцы проволоки отбирали после различной степени деформации и определяли весовым способом толщину покрытия.

Результаты исследования

Кривые 1 и 4 на рис. 1 отражают изменение толщины слоя покрытия, когда не было бы потерь покрытия. Кривые 1 и 4 построены по зависимости:

$$h_i = h_0 / \sqrt{\mu_i},$$

где h_0 , h_i – толщина слоя покрытия перед волочением и после i -го прохода маршрута волочения;

$\mu_i = d_0^2 / d_i^2$ – коэффициент вытяжки на i -м проходе проволоки;

d_0 , d_i – соответственно исходный диаметр заготовки и диаметр после i -го прохода.

Как видно из рис. 1, основная масса покрытия теряется на первых проходах при волочении на одинарных волокнах. Особенно это выражено при деформировании заготовки из стали У9А с большей толщиной покрытия 30 мкм.

Снятое покрытие со временем уплотняется и образуется кадмиевая "пробка" перед волокой, которая осложняет поступление смазки в очаг деформации. Это приводит к повышению температуры волочиль-

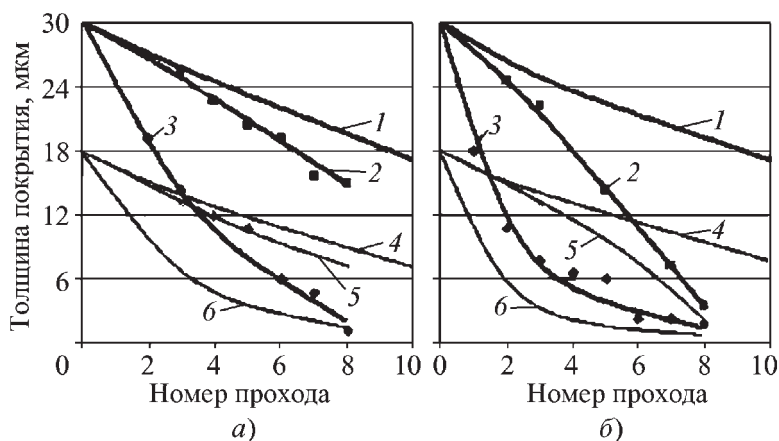


Рис. 1. Величина толщины кадмиевого покрытия на проволоке по маршруту волочения:

a – сталь 50; *б* – сталь У9А; 1, 4 – изменение толщины покрытия при отсутствии потерь кадмия соответственно при его исходной толщине слоя 30 и 18 мкм; 2, 5 – сборные волокни; 3, 6 – одинарные волокни

ного инструмента и интенсивности снятия покрытия, что вызывает чрезмерное натяжение проволоки перед входом в очаг деформации, которое способствует ее обрыву.

После остановки стана охлаждение усиливает механическую связь кадмия покрытия и находящегося в "пробке". Поэтому при последующем включении волочильного стана наблюдали повышение частоты обрыва проволоки, особенно в момент пуска стана.

На рис. 2 приведены кадмиевые "пробки" вместе с отрезками проволоки после обрыва ее переднего конца. На светлой поверхности кадмия виден мыльный порошок темного цвета, изменивший свою первоначальную окраску под действием повышенной температуры на рабочей поверхности инструмента.

Обсуждение результатов исследования

Образование кадмиевых "пробок" можно объяснить следующим образом. При недостаточной толщине смазочного слоя может возникнуть налипание

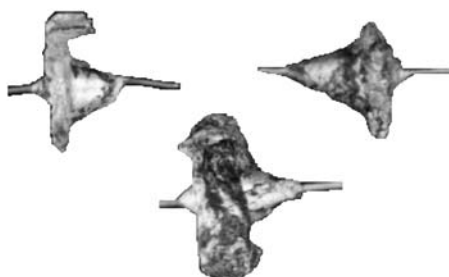


Рис. 2. Образцы проволоки после обрыва ее переднего конца вместе с "пробками" из снятого кадмиевого покрытия

кадмия на рабочую поверхность волокни. В результате образуется поверхность среза в толщине покрытия, разделяющая его на две части. Одна часть вместе с сердечником проходит через рабочую зону волокни, а другая часть объема кадмия снимается (скальпируется) и движется в обратном направлении движению проволоки, образуя материал для формирования "пробки".

Повышенная частота разрушения кадмированной проволоки при волочении может быть вызвана другой причиной. В отдельные промежутки времени температура на границе раздела основы и покрытия в очаге деформации может приблизиться к температуре плавления кадмия или достичь ее. В этом случае кадмий может оказать физико-химическое влияние на пластичность и прочность стальной основы (эффект Ребиндера [4]), которое приводит к разрушению стали под действием растягивающего осевого напряжения волочения.

Повышенное содержание углерода в сердечнике из стали У9А способствует усилению эффекта Ребиндера, что обусловило более повышенную частоту разрушения высокопрочной проволоки в сравнении с проволокой из стали 50.

Приведем некоторые результаты исследования пластичности при растяжении проволоочных образцов из углеродистой стали (1,1 % С) диаметром $d_0 = 1,1$ мм с кадмиевым покрытием толщиной 18 мкм при различных температурах в интервале от 24 до 600 °С [5].

Перед нанесением покрытия патентованная заготовка была протянута с суммарной степенью деформации 30 %. Деформацию образцов осуществляли со скоростью растяжения $0,015 \text{ с}^{-1}$ и $0,05 \text{ с}^{-1}$ на разрывной машине ЦД 10/90, снабженной нагревательной камерой. Точность поддержания температуры в камере печи ± 5 °С. Диаметр шейки после разрушения образца измеряли под микроскопом с 10-кратным увеличением. Пластичность оценивали по минимальному диаметру шейки $d_{\text{ш}}$ в месте разрушения по формуле

$$\varepsilon = 2\sqrt{3} \ln(d_0/d_{\text{ш}}).$$

Для выяснения влияния покрытия на пластичность также проводили испытания образцов проволоки без покрытия.

На рис. 3 приведены результаты исследования. Некоторое снижение пластичности при температурах до 320 °С можно объяснить деформационным старением [6].

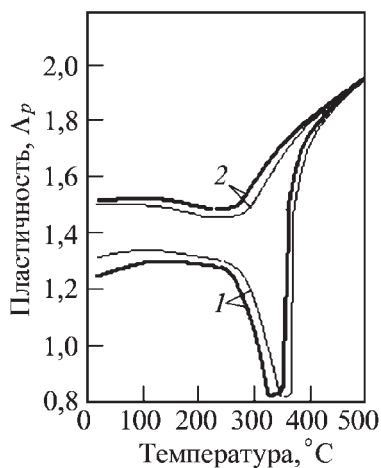


Рис. 3. Зависимость пластичности проволочных образцов из углеродистой стали (1,1 % C) с покрытием кадмия (1) и без него (2) от температуры и скорости растяжения [5]

Пластические свойства образцов с покрытием при этих температурах определяются наряду с деформационным старением также содержанием водорода, который проник в стальную основу при гальваническом нанесении кадмия и электрохимическом травлении поверхности стали перед покрытием заготовки.

Различие в пластичности кадмированных образцов при деформировании с неодинаковой скоростью исчезает при температурах выше 250 °C. Подобное снижение отрицательного влияния водорода на пластические свойства с увеличением скорости и температуры деформирования отмечены в работе [7].

При температурах в интервале 320–350 °C, близких к температуре покрытия кадмия, пластичность снижается вследствие проявления эффекта Ребиндера.

Появление высокотемпературной границы действия адсорбционного эффекта можно объяснить следующим образом.

С повышением температуры деформирования увеличивается вероятность протекания пластической деформации за счет теплового воздействия. Благодаря этому концентрация напряжений в концевой части трещин, образовавшихся при волочении или испытании, уменьшается. Это приводит к восстановлению пластичности [4].

Использование сборных волок позволило значительно снизить потери покрытия. Однако для умень-

шения потерь кадмия при волочении высокопрочной проволоки сборными волоками необходим инструмент с более развитой гидродинамической подачей смазки и интенсивным охлаждением.

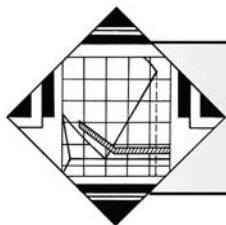
Следует отметить, что при экспериментальном исследовании использовали однократный стан волочения и относительно малую скорость волочения 1 м/с, что ограничило повышение температуры в очаге деформации. В производственных условиях при волочении проволоки указанного размера используют скорости волочения на порядок выше.

Вывод

Волочение стальной кадмированной заготовки характеризуется повышенной частотой обрыва вследствие охрупчивающего влияния кадмия на сталь и потерей легкодеформируемого покрытия. Использование инструмента с развитой гидродинамической подачей смазки в очаг деформации позволило значительно снизить температуру волочения, потерю кадмиевого покрытия и частоту обрыва переднего конца проволоки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Перлин И.Л., Ерманок М.З. Теория волочения. М.: Металлургия, 1971. 447 с.
2. Ильин В.А. Цинкование и кадмирование. Л.: Машиностроение, 1971. 88 с.
3. Загурский И.Н., Иванова З.К., Озеров А.М. Кадмирование стальной проволоки в борфтористоводородных электролитах // Защита металлов, 1973. Т. 9. № 2. С. 22–23.
4. Никитин В.И. Физико-механические явления при воздействии жидких металлов на твердые. М.: Атомиздат, 1967. 441 с.
5. Колмогоров В.Л., Гурьянов Г.Н., Богатов А.А. К разработке технологических процессов изготовления кадмированных изделий / Изв. вуз. Черная металлургия. 1984. № 12. С. 131.
6. Бабич В.К., Гуль Ю.П., Долженков И.Е. Деформационное старение стали. М.: Металлургия, 1972. 320 с.
7. Мороз Л.С., Чечулин Б.Б. Водородная хрупкость металлов. М.: Металлургия, 1967. 240 с.



В.Г. Дураков, Б.В. Дампилов, С.Ф. Гнюсов

(Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, г. Томск)

Роль мелкодисперсных выделений карбида ванадия в повышении износостойкости покрытий из хромистого чугуна

Исследовано влияние ванадия на структуру и свойства покрытий из белого хромистого чугуна, полученных методом электронно-лучевой наплавки в вакууме. Ванадий, введенный в наплавочный порошковый материал (до 6 % по массе) в процессе наплавки, входит в состав сложного карбида типа M_3C_3 . Термическая обработка покрытий (отжиг при 1100°C) позволяет сформировать бимодальное распределение упрочняющих частиц в матрице, состоящих из крупных карбидов $(Cr, Fe)_3C_3$ и мелкодисперсных карбидов V_2C и VC . Это значительно повышает микротвердость и абразивную износостойкость покрытий.

Ключевые слова: хромистый чугун, электронно-лучевая наплавка, карбид ванадия.

Effect of vanadium additive on the structure and properties of the white chromium iron coatings obtained by electron-beam surfacing in vacuum has been investigated. Up to 6 % wt. of vanadium admixed to the source powder mixture resulted in precipitation of complex carbides M_3C_3 during electron-beam surfacing. The resulting coatings were annealed 1100°C to form the bimodal distribution of the reinforcing particles in the matrix composed of both coarse $(Cr, Fe)_3C_3$ and ultrafine carbides V_2C and VC . Such a treatment allowed us to effectively increase both microhardness and abrasive wear resistance of the coatings.

Keywords: chromium iron, electron-beam facing, vanadium carbide.

Введение

Одним из основных факторов малого ресурса рабочих поверхностей деталей механизмов и машин в горно-добывающей и перерабатывающей промышленности является интенсивный абразивный износ, особенно в условиях Крайнего Севера. Это обусловлено тем, что основной период работы данной техники приходится на область отрицательных температур по мерзлому грунту. Эффективным способом повышения износостойкости инструмента является нанесение на его рабочую поверхность износостойкого покрытия.

Наиболее прогрессивной технологией нанесения износостойких покрытий является электронно-лучевая наплавка (ЭЛН) в вакууме [1]. ЭЛН обладает рядом особенностей, которые выгодно отличают ее от других методов нанесения покрытий: рафинирование наплавляемого металла благодаря вакуумной среде; возможность плавной и точной регулировки мощности электронного луча, что способствует минимальному проплавлению основы и, следовательно, сохранению шихтового химического состава в покрытии; простота задания необходимых размеров наплавочной ванны; небольшие размеры ванны расплава, а

следовательно, концентрированный ввод энергии до 10^5 Вт/см² и значительный перегрев ванны в зоне действия электронного луча способствует полному или частичному растворению твердых частиц в сварочной ванне, а минимальное время ее существования за счет большой скорости охлаждения (до 10^4 К/с) расплавленного металла формируют пересыщенный твердый раствор легирующих элементов в матрице, либо выделения мелкодисперсных фаз, создавая объемно-упрочненные покрытия "тугоплавкое соединение – металлическая связка". Все это делает ЭЛН-технологию универсальной, позволяющей получать порошковые покрытия с различными функциональными характеристиками и толщиной до 5 мм.

Выбор состава наплавочного порошкового материала для ЭЛН был обусловлен необходимостью создания безникелевых (из-за дороговизны никеля) износостойких дисперсно-упрочненных покрытий на железной основе. В качестве такого материала был выбран белый хромистый чугун, легированный ванадием для формирования дополнительного дисперсного упрочнения покрытия. Анализ результатов работ [2–4] по ЭЛН композиционных порошковых материалов системы "металлическая связка – карбиды металлов" показал возможность формирования одно-

родной дисперсно-упрочненной структуры с мульти-модальным распределением частиц упрочняющей фазы по размерам. Это способствует увеличению микротвердости и износостойкости покрытия в 1,5...2 раза. Однако использование уже готовых порошков карбидов (особенно карбида титана, который слабо растворяется в матрице) с широким распределением частиц по размерам не позволяет в ходе наплавки полностью растворить в жидкометаллической ванне расплава крупные частицы упрочнителя. Можно надеяться, что введение в исходную композиционную смесь отдельных карбидообразующих элементов позволит сформировать более однородную и мелко-дисперсную структуру покрытия, а последующая термическая обработка обеспечит дополнительное выделение карбидов из твердого раствора. Особенно перспективным в этом отношении является ванадий, который обладает высокой реакционной способностью и образует дисперсные карбиды уже в жидком металле и в дальнейшем стоек к коагуляции при высоких температурах. Следует отметить также, что твердость карбидов ванадия VC (~3000 HV [7]) значительно выше твердости основных карбидов (Cr, Fe)₇C₃ (~1550 HV [7]) хромистого чугуна. Таким образом, есть все основания ожидать образование в покрытии дисперсных карбидов ванадия наряду с крупными первичными карбидами (Cr, Fe)₇C₃ в процессе ЭЛН.

Использование высокотехнологичного метода электронно-лучевой наплавки покрытий в сочетании с композиционным материалом на основе хромистого чугуна, легированного ванадием, позволит получить дисперсно-упрочненные покрытия с высоким комплексом физико-механических свойств.

Целью данной работы является исследование процессов формирования структуры и свойств износостойких дисперсно-упрочненных композиционных покрытий на основе хромистого чугуна, легированного ванадием, нанесенных методом электронно-лучевой наплавки в вакууме.

Материал и методы эксперимента

Покрытия наносили методом электронно-лучевой наплавки в вакууме на подложки размером 120×25×4 мм, изготовленные из стали 30. В качестве наплавочного материала использовали промышленный порошок хромистого чугуна марки ПГ–С27 (табл. 1, № 1) с добавлением ванадия до 6 % масс. (табл. 1, № 2, № 3, № 4) дисперсностью 150...300 мкм. Толщина наплавленного покрытия составила ~3 мм. Для исключения деформации подложки и более интенсивного ее охлаждения при наплавке ее прижимали струбцинами к массивной стальной заготовке.

Таблица 1

Химический состав наплавочных порошковых смесей, % по массе

№	V	Cr	C	Si	Ni	Mn	Fe
1	0	26,70	4,30	1,00	1,60	1,20	ост.
2	2	26,17	4,21	0,98	1,57	1,18	
3	4	25,63	4,13	0,96	1,54	1,15	
4	6	25,10	4,04	0,94	1,50	1,13	

С целью дополнительного выделения дисперсных карбидов в матрице часть образцов подвергали отжигу при температуре $T_{отж} = 1100$ °С в течение одного часа. Данная температура отжига была выбрана исходя из двух соображений. Из работы [8] известно, что образование дисперсных частиц карбида ванадия наблюдается в температурном интервале 1050... 1150 °С. Нормализация хромистого чугуна в этом же температурном интервале приводит к увеличению износостойкости на 40 % [9].

Микроструктуру покрытий исследовали с помощью оптического микроскопа "AXIOVERT 25CA". Структурно-фазовое состояние покрытий определяли с использованием *микрорентгеноспектрального анализа* (МРСА) на установке "КОМЕВАХ MICRO-VEAM" и рентгенофазового анализа на установке ДРОН-3. Микротвердость ($H_{\mu 1,962}$) покрытий определяли на микротвердомере ПМТ-3. Твердость по шкале HRC измеряли на твердомере TP5006. Испытания покрытий на стойкость к абразивному изнашиванию проводили согласно ГОСТ 23.208–79 "Метод испытания материалов на износостойкость при трении о нежесткозакрепленные абразивные частицы" (кварцевый песок). В качестве эталона использовали образцы, изготовленные из стали 45 в отожженном состоянии.

Результаты и их обсуждение

Анализ металлографических исследований наплавленных покрытий показал, что их структура представляет собой однородную матрицу (рис. 1, а, точка 4) с включениями карбидов, различающихся морфологическим строением. Это протяженные шестигранные призмы иногда с внутренней полостью (рис. 1, а, точки 1 и 2), разветвленные выделения (рис. 1, а, точка 3) и мелкие округлые включения (рис. 1, а, точка 5). Из работы [9] известно, что первичные карбиды типа Cr_7C_3 в виде шестигранных призм с внутренней полостью, выпадающие из жидкометаллической фазы, представляют собой аусте-

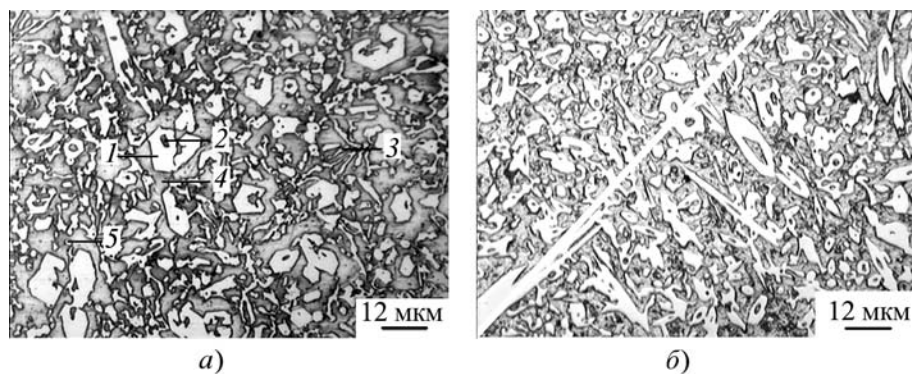


Рис. 1. Микроструктура покрытия ПГ–С27 непосредственно после наплавки (а) и дополнительной термической обработки (б)

нитно-карбидную эвтектику. Согласно данным рентгеноструктурного анализа основной объем матрицы представлен γ -фазой (аустенит, 95 %) и α -фазой (5 %). Карбидная подсистема представлена карбидами $(Cr,Fe)_7C_3$ и $(Cr,Fe)_{23}C_6$. Причем основная масса карбидных выделений как первичных (шестигранные призмы), так и разветвленных, представляет собой карбид $(Cr,Fe)_7C_3$. Только отдельные мелкие выделения представляют собой карбид $(Cr,Fe)_{23}C_6$. По-видимому, феррит (α -фаза) образуется во внутренних полостях карбидов в виде шестигранных призм за счет интенсивного ухода углерода из твердого раствора на образование карбидов.

Термическая обработка наплавленных покрытий, наряду с процессами перекристаллизации в карбидной подсистеме, приводит к увеличению объемного содержания выделившегося карбида $(Cr,Fe)_7C_3$, особенно за счет доли мелких округлых выделений (рис. 1, б). Уменьшение концентрации углерода и ле-

гирующих элементов в твердом растворе матрицы привело к интенсивному развитию $\gamma \rightarrow \alpha$ превращения в ней. По данным рентгеноструктурного анализа матрица упрочненного слоя на 90 % представлена α -фазой.

Микроструктура покрытий ПГ–С27 с добавлением ванадия непосредственно после наплавки не имеет видимых изменений с микроструктурой покрытий ПГ–С27 без ванадия, рис. 1, а и 2, а. Карбиды представлены также в виде протяженных шестигранных призм с внутренней полостью (рис. 2, а, точки 1, 2), разветвленных выделений (рис. 2, а, точки 3, 4) и мелких округлых включений (рис. 2, а, точки 6, 7).

Согласно данным рентгеноструктурного анализа матрица представлена γ - и α -фазой, а упрочняющая фаза – карбидом типа $(Cr,Fe)_7C_3$. Карбид ванадия рентгенографическим методом не выявляется (рис. 3, а). Однако известно [10, 11], что ванадий за счет высокой способности к карбидообразованию в таких сталях, как Р6М5, 12Х1МФ, образует собственные нанокристаллические ($< 0,1$ мкм) карбидные частицы, которые рентгенографическим методом не выявляются. С помощью микрорентгеноспектрального анализа покрытий ПГ–С27 с добавлением ванадия удалось определить элементный состав фаз в характерных точках, указанных на рис. 2, а (табл. 2). Оказалось, что ванадий присутствует в основном в составе карбида типа M_7C_3 и в небольшом количестве в твердом растворе матрицы. Присутствие ванадия в составе сложного карбида типа M_7C_3 вместо образования собственных карбидов VC и V_2C , по-видимому, обусловлено процессом быстрого охлаждения сильно перегретой и малой по объему ванны расплава.

Термическая обработка наплавленных покрытий ПГ–С27+V за счет процессов выхода атомов ванадия из твердого раствора матрицы и частичной перекристаллизации карбида типа M_7C_3 приводит к интенсивному выделению субмикроструктурного (< 1 мкм) карбида V_2C (рис. 2, б и 3, б). Выделение в первую очередь низкоуглеродистого карбида V_2C согласно данным [6] обусловлено минимальным значением химического потенциала углерода для

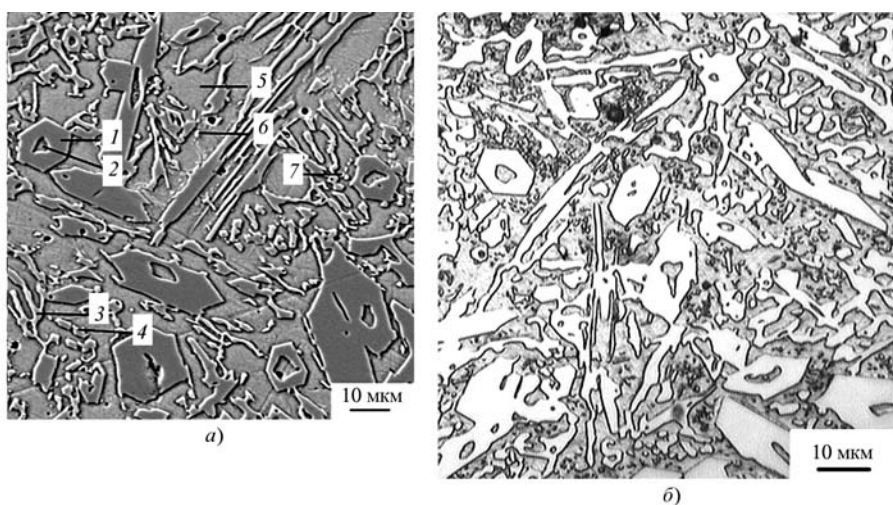


Рис. 2. Микроструктура покрытия ПГ–С27 + 4 % по массе V непосредственно после наплавки (а) и термической обработки (б)

Таблица 2

Результаты микрорентгеноспектрального анализа покрытия ПГ–С27 + 4 вес. % V в характерных точках (см. рис. 2, а)

Содержание в % по массе							
Элемент \ №	1	2	3	4	5	6	7
V	5,44	0,71	3,73	3,42	0,74	1,02	2,06
Cr	53,71	16,44	42,30	42,43	13,35	16,65	26,37
Mn	–	0,48	–	0,04	0,81	0,60	0,29
Fe	32,99	80,89	44,30	45,15	82,03	74,22	62,46
Ni	0,23	2,73	0,36	0,50	2,78	2,12	1,55

данного карбида. Фазовый состав матрицы в ходе отжига за счет полного $\gamma \rightarrow \alpha$ -превращения становится однофазным (α -твердый раствор (рис. 3)).

Таким образом, введение в наплавочную шихту ванадия после термической обработки позволяет сформировать в покрытии бимодальное распределение по размерам карбидных частиц, отличающихся химическим строением. Крупные карбидные частицы представляют собой карбид типа M_7C_3 , а мелкие – V_2C . Необходимо отметить, что крупные карбидные частицы дополнительно отличаются морфологическим строением: шестигранные призмы с внутренней полостью и разветвленные (игольчатые) выделения. Согласно результатам авторов [2] можно с уверенностью предположить, что данная структура покрытия с бимодальным распределением упрочняющих частиц по размерам позволит увеличить ее износостойкость.

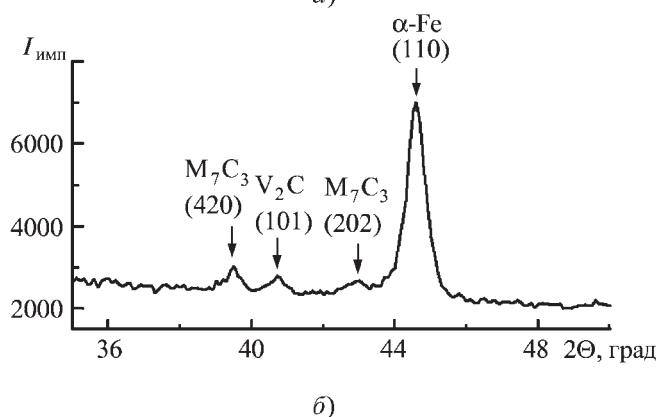
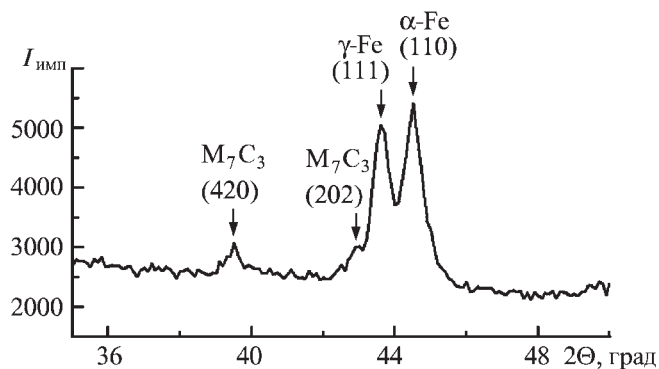


Рис. 3. Фрагменты дифрактограмм, полученных с образцов упрочненного слоя ПГ–С27 + 4 % по массе, непосредственно после наплавки (а) и дополнительной термической обработки (б)

Действительно, введение в исходную шихту ванадия способствовало изменению свойств покрытий по кривым с максимумом (рис. 4). Причем наиболее существенное повышение свойств характерно для по-

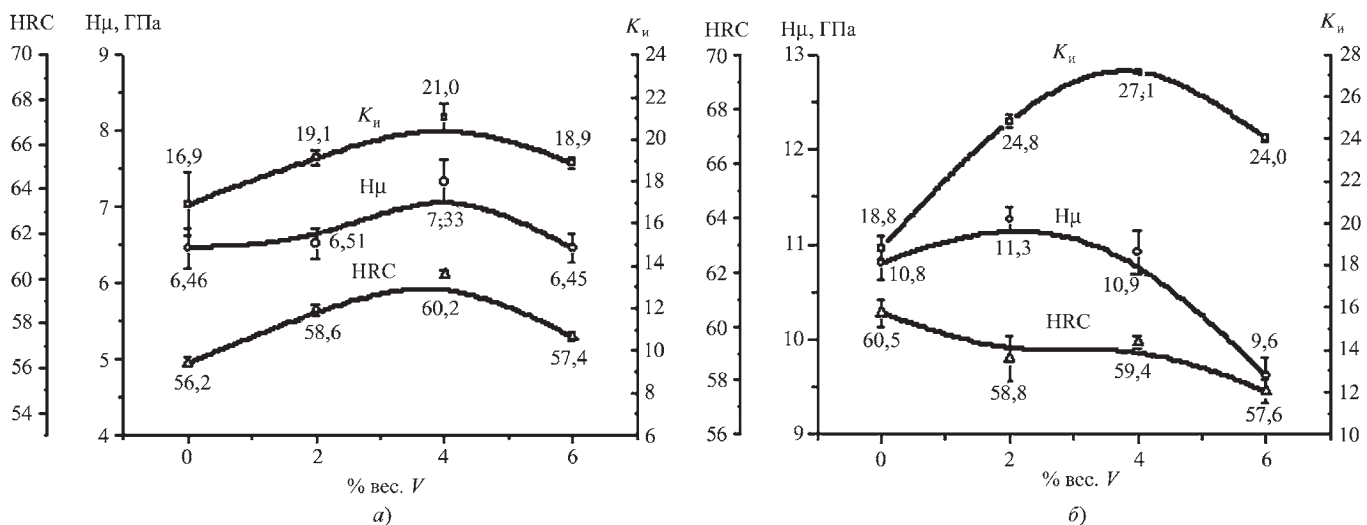


Рис. 4. Зависимость твердости (HRC), микротвердости ($H_{\mu, 0,981}$) и коэффициента абразивной износостойкости ($K_{И}$) от содержания ванадия в покрытиях после наплавки (а) и термической обработки (б)

крытий, прошедших дополнительную термическую обработку (рис. 4, б). Максимальное значение износостойкости наблюдается у образцов, в состав покрытий которых дополнительно вводится 4 % ванадия (рис. 4).

Выводы

В процессе электронно-лучевой наплавки порошковых материалов на основе хромистого чугуна ПГ–С27 с ванадием в покрытиях на основе аустенитной матрицы выделяются карбиды типа M_7C_3 , в состав которых входит ванадий. Термическая обработка данных покрытий приводит к интенсивному выделению субмикроструктурных (<1 мкм) частиц карбида V_2C за счет процессов выхода атомов ванадия из твердого раствора матрицы и перекристаллизации карбида типа M_7C_3 . В покрытии удастся сформировать бимодальное распределение по размерам карбидных частиц, отличающихся фазовым и химическим составом. Крупные карбидные частицы представляют собой карбид типа M_7C_3 , а мелкие – V_2C . Крупные карбидные частицы дополнительно отличаются морфологическим строением: шестигранные призмы с внутренней полостью и разветвленные (игольчатые) выделения. Данное структурно-фазовое состояние покрытия ПГ–С27 + 4 % V позволяет увеличить его износостойкость в 1,45 раза по сравнению с износостойкостью покрытия ПГ–С27.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Панин В.Е., Белок С.И., Дураков В.Г., Прибытков Г.А., Ремпе Н.Г. Электронно-лучевая наплавка в вакуу-

ме: оборудование, технология, свойства покрытий // Сварочное производство, 2000. № 2. С. 34–38.

2. Гнюсов С.Ф., Дураков В.Г., Маков Д.А. Формирование износостойких аустенитных покрытий с регулируемым карбидным упрочнением // ФИХОМ. 2004. № 6. С. 54–60.

3. Гнюсов С.Ф., Дураков В.Г., Гнюсов К.С. Электронно-лучевая наплавка карбидосталей. Ч. 1. Особенности технологии наплавки и подготовки композиционных наплавочных смесей // Сварочное производство. 2007. № 11. С. 8–12.

4. Гнюсов С.Ф., Гнюсов К.С., Дураков В.Г. Электронно-лучевая наплавка карбидосталей. Ч. 2. Особенности формирования структуры и свойств покрытий сталь Р6М5 + WC // Сварочное производство. 2007. № 12. С. 12–15.

5. Цыпин И.И. Белые износостойкие чугуны. Структура и свойства. М.: Металлургия, 1983. 120 с.

6. Елагина О.Ю. "Особенности формирования карбидных фаз с позиций термодинамического подхода" // Перспективные материалы. 2006. № 4. С. 17–22.

7. Самсонов Г.В., Винницкий И.М. Тугоплавкие соединения. М.: Металлургия, 1976. 558 с.

8. Самсонов Г.В., Упадхая Г.Ш., Нешпор В.С. Физическое металловедение карбидов. Киев: Наукова думка, 1974. 455 с.

9. Герек А., Байка Л. Легированный чугун – конструкционный материал. Пер. с польск. М.: Металлургия, 1978. 208 с.

10. Гнюсов С.Ф., Хазанов И.О., Советченко Б.Ф., Дегтяренко Е.А., Киселев А.С., Трущенко Е.А., Азаров Н.А., Советченко П.Б. Применение эффекта сверхпластичности сталей в инструментальном производстве. Томск: Из-во Научно-технической литературы, 2008. 240 с.

11. Хромченко Ф.А. Ресурс сварных соединений паропроводов. М.: Машиностроение, 2002. 352 с.

Уважаемые читатели!

Продолжается подписка

на научно-технический и производственный журнал
"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"

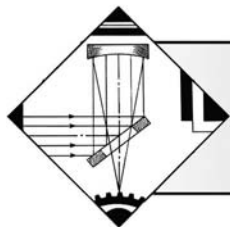
Подписные индексы по каталогам:

"Роспечать" – 85159, "Пресса России" – 39269, "Почта России" – 60252.

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

Россия, 107076, Москва, Стромьинский пер., д. 4,
ООО "Издательство Машиностроение"

Тел.: (499) 269-66-00 (отдел реализации), (499) 268-40-77 (редакция);
e-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru



УДК 669...867:621.791.927.55

М.Н. Воронкова (БГТУ им. В.Г. Шухова, г. Белгород),
Н.Н. Потапов (ОАО ЦНИИТМАШ, г. Москва)

Технология нанесения упрочняющих покрытий плазменным напылением при восстановлении деталей оборудования промышленности строительных материалов

Приведены результаты экспериментальных исследований, направленных на изучение возможности использования износостойких плазменных покрытий при восстановлении и упрочнении изношенных поверхностей деталей оборудования предприятий строительной промышленности. Показана целесообразность нанесения многослойного покрытия с чередованием хрупких и вязких слоев. Установлен оптимальный состав плазмообразующего газа для уменьшения термического воздействия плазменной струи на деталь.

Ключевые слова: плазменное напыление, плазменное покрытие, упрочнение, восстановление.

In article results of the experimental researches directed on studying of an opportunity of use of wearproof plasma coverings at restoration and hardening of worn out surfaces of details of the equipment of the enterprises of a building industry are resulted. The expediency of drawing of a multilayered covering with alternation of fragile and viscous layers is shown. The optimum structure plasma-formation gas for reduction of thermal influence of a plasma jet by a detail is established.

Keywords: *plasma spraying, plasma covering, hardening, restoration.*

В условиях интенсивной эксплуатации оборудования промышленности строительных материалов (ПСМ) важное значение имеет оперативное и качественное восстановление его узлов и элементов.

Одним из наиболее эффективных методов восстановления является нанесение на поверхность деталей металлизированных покрытий путем нанесения порошкового материала.

В настоящее время известны различные методы и способы получения покрытий. Одним из наиболее перспективных способов восстановления работоспособности изношенных деталей является нанесение покрытий плазменным напылением [1–4].

Однако при плазменном напылении покрытий из сплавов, обеспечивающих достаточную износостойкость деталей, возникает проблема технологической прочности покрытия и обеспечения его равномерности [2, 4].

В настоящее время для нанесения износостойких покрытий разработаны порошковые смеси, включающие износостойкие компоненты, самофлюсующиеся сплавы и экзотермические порошки [1, 2].

Авторами статьи был проведен комплекс экспериментальных исследований с целью выяснения воз-

можности использования серийно выпускаемых порошковых смесей для нанесения плазменных покрытий с требуемыми эксплуатационными свойствами.

Для этого в качестве материалов покрытия использовали порошковые смеси ПС–12НВК–01, ВСНГН–35, ПН–12Н–01 [1, 2].

Все покрытия наносили на образцы с предварительным напылением подслоя из алюминид никеля толщиной 0,1...0,15 мм, толщина слоя покрытия не превышала 1,0 мм. Напыление осуществлялось на плазменной установке УПУ–8М плазмотроном ПП–25.

Испытания прочности сцепления покрытия с основой проводили на испытательной машине РМ–50 по штифтовому методу.

Стойкость покрытий к износу оценивали по показателю относительной износостойкости, который определяли путем сравнения интенсивностей изнашивания исследуемых покрытий с закаленной сталью 45.

Результаты исследований показали, что различный удельный вес компонентов, входящих в порошковые смеси, не гарантирует равномерного их рас-

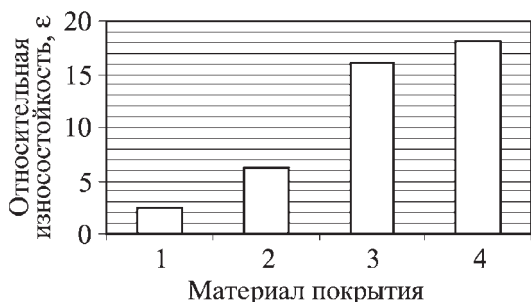


Рис. 1. Относительная износостойкость покрытий:
 1 – порошковая проволока ПП-Пн-200Х15С1ГРТ; 2 – электроды Т-590; 3 – покрытие из сплава ПС-12НВК-01; 4 – покрытие из сплава ВСНГН-35

пределения в покрытии, что снижает стойкость к абразивному износу и устойчивость к воздействию ударных нагрузок.

С целью устранения указанных недостатков было принято решение производить напыление многослойного покрытия с чередованием хрупких и вязких слоев с последующим оплавлением.

Результаты исследований показали, что стойкость к абразивному износу может быть обеспечена путем нанесения на поверхность детали слоя порошковой смеси, содержащей 35 % карбида вольфрама.

Для получения покрытия, устойчивого к воздействию ударных нагрузок и с целью облегчения дальнейшей механической обработки, напыляли слой из самофлюсующегося сплава с последующим его оплавлением.

В результате оплавления напыленные слои смешиваются и образуют покрытие композиционного типа, которое обладает хорошей износостойкостью, плотностью, прочностью сцепления, имеет высокую твердость и сопротивление ударам.

Дальнейшие исследования показали, что наибольшую износостойкость имеет многослойное покрытие из сплава ВСНГН-35 (рис. 1).

Однако процесс многослойного плазменного напыления не исключает деформации деталей, вызванной тепловым воздействием плазменной струи.

Анализ имеющихся в литературе экспериментальных данных [1–4] по снижению теплового воздействия плазменной струи на деталь показал перспективность следующих методов:

- применение аргоновой плазмы, имеющей быстрый спад температуры вдоль потока;
- изменение дистанции напыления;
- разделение плазменного и металлизационного потоков путем отбора плазменной струи на срезе со-

пла в специальной конструкции плазматрона (Л.К. Дружинин и др.).

Преимущества применения аргоновой плазменной струи заключается в быстром спаде ее температуры вдоль потока, однако для получения необходимой мощности напыления требуются значительные величины рабочих токов (до 700...800 А), которые превышают номинальные значения (300...400 А) для серийно выпускаемых установок.

Проведенные авторами данной статьи исследования показали, что снижение величины рабочих токов возможно изменением содержания азота в плазмообразующем газе. Установлено, что эффективная область регулирования токов находится в пределах содержания азота от 0 до 25 %.

При содержании в плазмообразующем газе азота до 25 % происходит также удлинение плазменной струи и значительные изменения тока и напряжения дуги. При этом достигаются номинальные режимы оборудования по току.

Сопоставление длины плазменной струи и дистанции напыления при содержании в плазмообразующем газе азота до 25 % позволило установить оптимальную дистанцию напыления, экстремальное значение которой для самофлюсующихся сплавов составило 130 мм.

Результаты исследований представлены на рис. 2–4.

Толщина напыленного слоя и его равномерность определяются сочетанием значений параметров процесса [1, 2, 4]. Одну и ту же толщину напыленного слоя можно получить при различных сочетаниях параметров напыления. Однако при этом прочность сцепления напыленного слоя с основой будет различной.

В процессе проведения исследований путем оптимизации были установлены оптимальные режимы напыления износостойких покрытий на поверхности изношенных деталей оборудования промышленности строительных материалов (табл.).

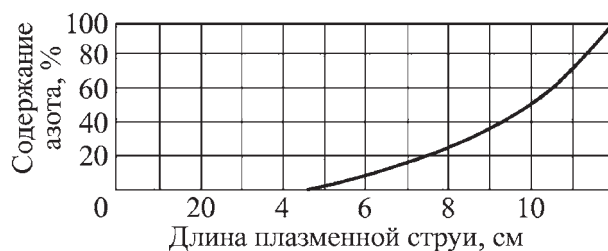


Рис. 2. Зависимость длины плазменной струи (изотерма 1000 °С) от содержания азота

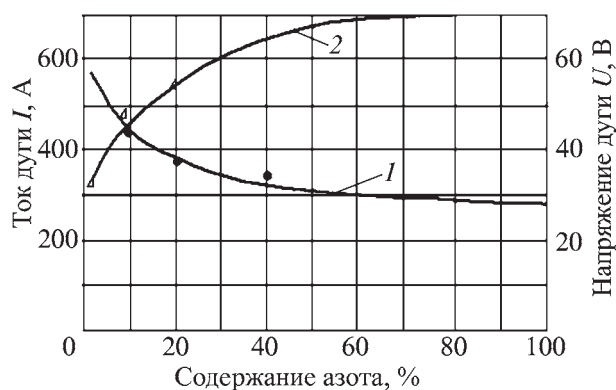


Рис. 3. Зависимость тока *I* и напряжения *U* плазменной струи от содержания азота

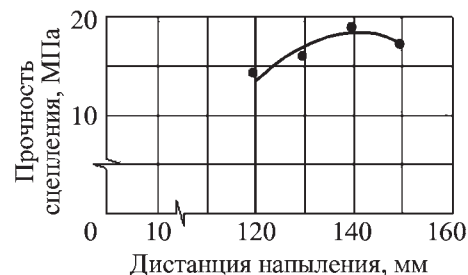


Рис. 4. Зависимость прочности сцепления покрытия ПГ-12Н-01 с основой от дистанции напыления

Оптимальные режимы напыления покрытий

Толщина покрытия, мм	Прочность сцепления, МПа	Мощность, кВт	Дистанция напыления, мм	Время напыления, с
0,30	17,75	25,0	139,5	11,50
0,35	17,50	24,9	138,5	18,25
0,40	17,00	24,9	136,0	24,50
0,45	16,57	24,9	137,0	29,10
0,50	15,60	23,8	110,0	30,00
0,55	14,85	22,4	94,5	30,00

Результаты приведенных в статье исследований были использованы при разработке технологии нанесения износостойких покрытий при восстановлении рабочих поверхностей шнековых валов винтового конвейера.

Выводы

1. Для обеспечения стойкости покрытия к абразивному износу, получения покрытия, устойчивого к воздействию ударных нагрузок и с целью облегчения

дальнейшей механической обработки покрытий, следует производить напыление многослойного покрытия с чередованием хрупких и вязких слоев с последующим оплавлением.

2. Для уменьшения деформаций деталей, возникающих при термическом воздействии плазменной струи, установлен оптимальный состав плазмообразующего газа с содержанием азота до 25 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов: справочник / Ю.С. Борисов, Ю.А. Харламов, С.Л. Сидоренко, Е.Н. Ардатовская. Киев: Наукова думка, 1987. 543 с.
2. Нанесение покрытий плазмой / В.В. Кудинов, П.Ю. Пекшев, В.Е. Белашенко и др. М.: Наука, 1990. 408 с.
3. Пузряков А.Ф. Теоретические основы технологии плазменного напыления / А.Ф. Пузряков. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003. 360 с.
4. Упрочняющие и восстанавливающие покрытия / А.М. Цун, Г.С. Гун, В.В. Кривошапов и др. Челябинск: Металлургия, Челябинское отделение, 1991. 160 с.

УДК 621.9.047.7

В.В. Любимов, А.В. Иванов, Д.В. Витальский (Тульский государственный университет)

Выбор параметров ионной модификации поверхностей деталей машин и инструментов

Предложена методика выбора условий процесса ионной имплантации азота в стали и сплавы с учетом геометрических и размерных характеристик поверхностей образцов. Методика позволяет рекомендовать схему обработки, предварительные режимы процесса (величину ускоряющего напряжения, величину тока термоэлектронной эмиссии, время обработки), обеспечивающие повышение микротвердости и износостойкости поверхности на 50–80 % в зависимости от материала заготовки.

Ключевые слова: ионная имплантация, схема обработки, режимы процесса, микротвердость, износостойкость.

The technique of a choice of conditions of process of ionic implantation of nitrogen in steel and alloys in view of geometrical and dimensional characteristics of surfaces of samples is offered. The technique allows to recommend the scheme of processing, preliminary modes of process (size of an accelerating voltage, size of a current of thermionic issue, time of processing), providing increase of microhardness and wear resistance of a surface for 50–80 % depending on a material of workpiece.

Keywords: ionic implantation, scheme of processing, modes of process, microhardness, wear resistance.

Введение

Одним из наиболее перспективных путей повышения эксплуатационных свойств поверхностей деталей машин и инструментов является использование упрочняющих технологий, одной из которых является ионная имплантация азота (ИИА) в поверхностные слои деталей из сталей и сплавов. Несмотря на развитие и совершенствование оборудования и технологической базы, не решен ряд задач, например, связанных с рекомендациями условий проведения процесса ионной имплантации для многообразия геометрических конфигураций и материалов деталей машин и инструментов. Для некоторых типовых вариантов поверхностей деталей в работах [1–5] ранее рекомендованы условия и режимы ИИА, позволяющие получить необходимую износостойкость поверхностей образцов. Однако при анализе публикаций по выбору условий проведения ионной имплантации для различных материалов выявлены лишь разрозненные данные, представляющие собой частные случаи ионного модифицирования [1, 2, 4, 5]. В связи с этим в данной работе разработаны рекомендации по выбору условий проведения процесса ионной имплантации азота в поверхностные слои деталей машин и инструмента.

Целью работы является создание методики, позволяющей рекомендовать схему обработки, базовые режимы проведения процесса (величину ускоряющего напряжения, величину тока термоэлектронной эмиссии, время обработки), обеспечивающие повышение микротвердости и износостойкости поверхности. Базовые режимы подвергаются уточнению в процессе обработки ИИА.

Основные положения

При разработке методики были приняты следующие основные ограничения и допущения:

1. Давление азота в вакуумной камере составляет не более $5 \cdot 10^{-3}$ Па.
2. Перемещение ионного пучка относительно обрабатываемой поверхности осуществляется без перекрытия или с незначительным перекрытием (до 20 %) упрочняемых зон.
3. Методика разработана применительно к типовым поверхностям деталей машин и инструментов: плоских, цилиндрических и сферических.
4. Режимы обработки рекомендуются для материалов заготовок, содержащихся в разработанной базе данных, на основании ранее проведенного комплекса экспериментальных исследований [1–5].

Ранее экспериментально установлено [1], что при фиксированном давлении азота в вакуумной камере размеры упрочняемой области существенно зависят от расстояния L (см. рис. 1) от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности обрабатываемого образца (при заданном угле расхождения ионного потока α), которое определяется геометрическими размерами обрабатываемого образца. В качестве размера h принимается расстояние от поверхности стола вакуумной установки до поверхности образца, подлежащей обработке (рис. 1). Расстояние H от нижнего торца дуоплазматрона 1 до стола 2 (рис. 1) зависит от геометрических параметров вакуумной камеры имплантационной установки, например для установки ВИУ–1 [3] $H \approx 400$ мм.

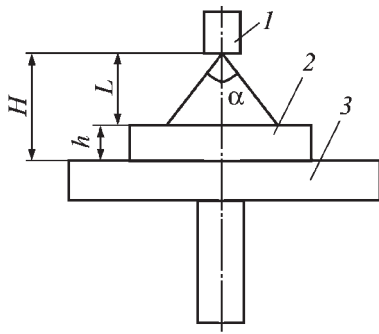


Рис. 1. Схема ионной имплантации:

1 – источник ионов; 2 – образец; 3 – стол установки; H – расстояние от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности стола; L – расстояние от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности образца; h – толщина образца; α – угол расхождения ионного потока

На рис. 2 приведен алгоритм выбора условий ионной имплантации азота в поверхности деталей машин и инструментов, лежащий в основе методики.

Расчет расстояния L от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности образца (рис. 1) производится по формуле

$$L = H - h. \quad (1)$$

Ранее установлено [1], что при эффективном упрочнении поверхности угол расхождения ионного потока α составляет около $6,9^\circ$ при фиксированном давлении азота в вакуумной камере $P = 5 \cdot 10^{-3}$ Па и менее.

Расчет диаметра упрочняемой области d осуществляется по формуле

$$d = 2Ltg\alpha/2. \quad (2)$$

Расчет минимального числа перемещений ионного пучка по поверхности заготовки n и длины одного перемещения l осуществляется в соответствии с выбранной схемой обработки.

Например, для схемы № 1 применяем формулы (без учета перекрытия упрочняемых полос):

$$\begin{aligned} l &= a; \\ n &= b/d, \end{aligned} \quad (3)$$

где a – длина образца;
 b – ширина образца.

Для схемы № 2

$$l = R/d; n = 1, \quad (4)$$

где R – радиус образца.

Для схемы № 3 (без учета перекрытия упрочняемых полос)

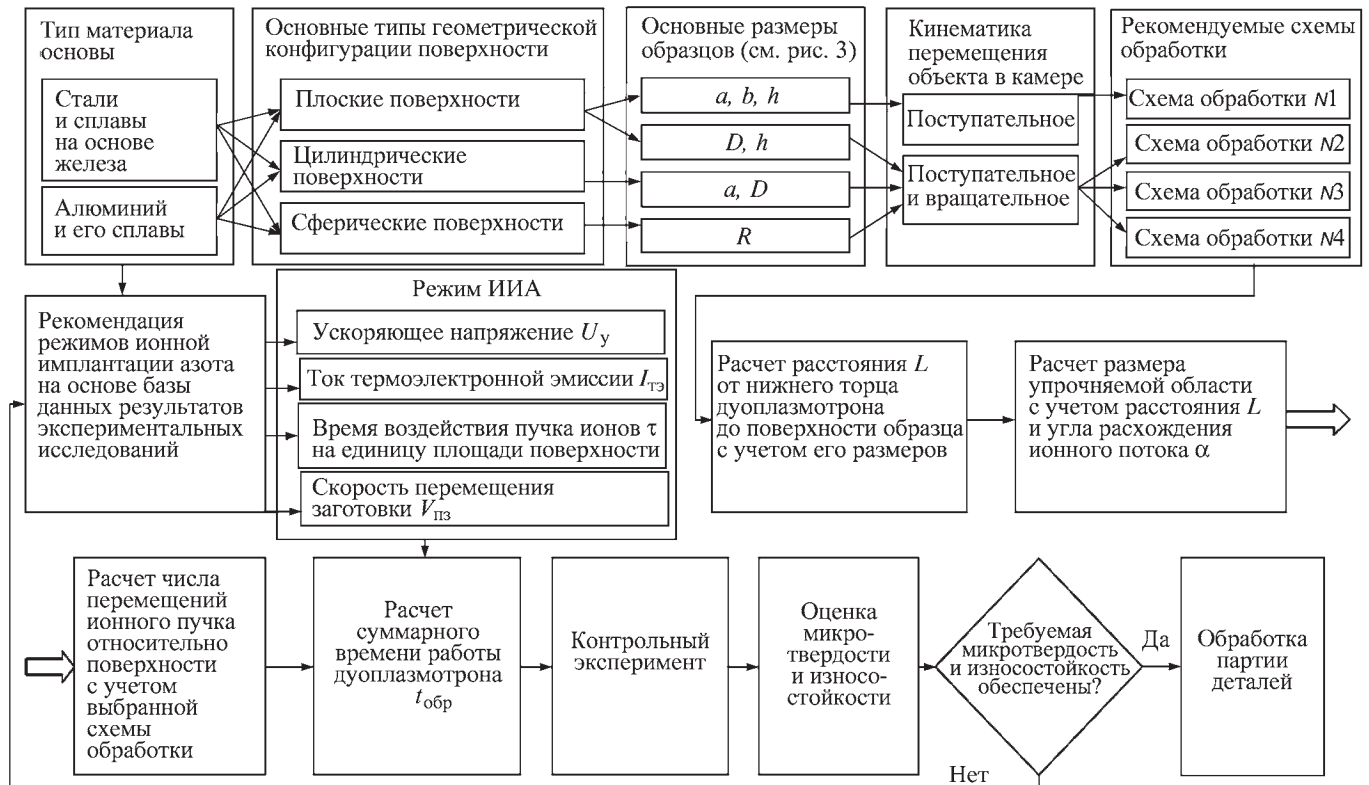


Рис. 2. Алгоритм выбора условий ИИА в металлы и сплавы

$$l = a;$$

$n = 1$, если $d \geq 2R$ (весь диаметр заготовки попадает в область обработки, поэтому осуществляется однократный поворот заготовки на 180°);

$$n = 2\pi R/d, \text{ если } d < 2R. \quad (5)$$

В качестве размера a для случая упрочнения осевого инструмента используется длина его рабочей части.

Для схемы № 4:

– для упрочнения заготовок в форме полусфер радиусом R вращение осуществляется относительно вертикальной оси:

$$l = R/d; n = 1; \quad (6)$$

– для упрочнения заготовок в форме сфер радиусом R вращение осуществляется относительно горизонтальной оси:

$$l = 2R; n = 1. \quad (7)$$

Далее осуществляется расчет суммарного времени работы дуоплазмотрона $t_{\text{обр}}$ с учетом необходимого времени воздействия пучка ионов на единицу площади поверхности.

В зависимости от скорости перемещения заготовки в камере $v_{\text{пз}}$ (определяется типом и характеристиками привода вращения заготовки) с целью обеспече-

ния заданной концентрации азота в поверхностном слое заготовки минимальное количество перемещений может корректироваться в большую сторону – процесс повторяется по выбранной траектории. Это позволит обеспечить более высокую износостойкость поверхностного слоя заготовки.

С учетом проведенных расчетов и рекомендаций, приведенных в базе данных экспериментальных исследований, проводится контрольный эксперимент. После проведения контрольного эксперимента осуществляется оценка микротвердости и износостойкости обработанного образца по методике, приведенной в работе [4]. В случае соответствия величин микротвердости и износостойкости требуемым значениям осуществляется обработка партии деталей.

Пример применения методики

Исходные данные: обрабатываемый образец – торцевая фреза из стали Р6М5 диаметром $D = 6$ мм и длиной $l = 100$ мм, микротвердость $HV \geq 800$, износостойкость – не более 4 мг при 5000 циклов, по методике, описанной в работе [4]. Разрушение поверхностного слоя фрезы: абразивный износ в условиях трения.

Используя алгоритм, приведенный на рис. 2, исходя из комплекса эксплуатационных требований (износостойкости, микротвердости, типа материала и

Таблица 1

№ п/п	Схема обработки	Примечание
1		Перемещение заготовки осуществляется последовательно по осям x, y
2		Осуществляется вращение заготовки вокруг собственной оси и перемещение вдоль оси x или y
3		Осуществляется вращение заготовки вокруг собственной оси и перемещение вдоль оси x
4		Осуществляется вращение заготовки вокруг одной из осей заготовки (для заготовок сферической формы) и перемещение вдоль оси x
Примечание: 1 – образец; 2 – направление ионного пучка.		

Таблица 2

Параметры ионной имплантации

Параметр	Расстояние от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности образца L , мм	Диаметр упрочняемой области d , мм	Число перемещений ионного пучка относительно поверхности заготовки n	Суммарное время работы дуоплазматрона $t_{обр}$, мин
Значение	150	18	1	6

вида обрабатываемой поверхности), осуществляем поиск рациональных условий ионной имплантации азота для указанных исходных данных:

1. Выбираем рекомендуемую схему обработки с учетом кинематики перемещения объекта в камере – вариант № 3 (табл. 1). Схема упрочнения осевого инструмента реализована на оборудовании ВУ-1Б (образцы устанавливаются горизонтально в специальное приспособление, вращение инструмента происходит без проскальзывания).

2. Определяем расстояние L от нижнего торца дуоплазматрона до поверхности ближайшего образца по формуле (1).

3. Рассчитываем диаметр упрочняемой области d по формуле (2).

4. Производим расчет минимального числа перемещений n ионного пучка по поверхности заготовки и длины одного перемещения l в соответствии с выбранной схемой обработки с использованием зависимостей (5).

5. Задание режимов ионной имплантации азота для данного материала осуществляем согласно рекомендациям на основании базы данных результатов экспериментальных исследований.

6. Выполняем расчет суммарного времени работы дуоплазматрона.

Расчетные параметры ионной модификации торцевых фрез приведены в табл. 2. Диаметр упрочняемой области d :

$$d = 2 \cdot 150 \operatorname{tg} 6,9^\circ; d = 18 \text{ мм.}$$

Длина одного перемещения l :

$$l = 10 \text{ мм.}$$

Минимальное число перемещений ионного пучка по поверхности заготовки – одно – поворот на 180° ($n = 1$, так как $d \geq 2R$).

Расчетные параметры процесса приведены в табл. 2.

Таблица 3

Сравнительные результаты

№ п/п	Образец	Износостойкость при 5000 циклах изнашивания, мГ	Микротвердость	
			HV	HRC ₃
1	Торцевая фреза из стали Р6М5 без обработки	4,7	587	55
2	Торцевая фреза из стали Р6М5 после ИИА	3,4	881	65

После проведения эксперимента осуществлен контроль микротвердости и износостойкости обработанных образцов. Результаты измерения микротвердости и износостойкости приведены в табл. 3.

Выводы

1. Предложена методика ионной имплантации азота в стали и сплавы с учетом геометрических и размерных характеристик их поверхностей.

2. Полученные согласно рекомендациям данной методики условия проведения процесса ионной имплантации азота хорошо согласуются с технологическими рекомендациями, приведенными в ряде работ [1, 2, 4, 5].

3. Разработанная методика позволяет существенно сократить количество экспериментальных исследований при отработке технологии имплантации ионов азота в поверхностные слои наиболее распространенных сплавов. В зависимости от вида материала заготовки, ее формы и размеров рекомендуются схема обработки, предварительные режимы проведения процесса (величина ускоряющего напряжения, величина тока термоэлектронной эмиссии, время обработки), обеспечивающие повышение микротвердости и износостойкости поверхности на 40...70 %.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Любимов В.В., Инзарцев Ю.В., Иванов А.В., Витальский Д.В. Исследование распределения дозы ионной имплантации азота на поверхности образцов из стали 12Х18Н9Т // Известия Тульского государственного университета. Серия: Электрофизикохимические воздействия на материалы. Тула: ТулГУ, 2004. С. 8–12.

2. Любимов В.В., Иванов А.В., Инзарцев Ю.В., Витальский Д.В. Сравнительный анализ микротвердости поверхностей стальных деталей, имплантированных ионами азота

// Сборник трудов. "Современная электротехнология в промышленности центра России". Тула: ТулГУ, 2005. С. 105–108.

3. Любимов В.В., Иванов А.В., Инзарцев Ю.В., Витальский Д.В. Модернизация установки для комбинированной ионной имплантации азота и ионно-плазменного нанесения покрытий // Сборник трудов. "Современная электротехнология в промышленности центра России". Тула: ТулГУ, 2005. С. 108–112.

4. Любимов В.В., Иванов А.В., Витальский Д.В., Протопопов А.А. Оценка эксплуатационных характеристик по-

верхностей инструментов из стали Р6М5, модифицированных ионно-вакуумными методами // Известия Тульского государственного университета. Серия: Электрофизикохимические воздействия на материалы. Тула: ТулГУ, 2005. С. 129–136.

5. Любимов В.В., Иванов А.В., Витальский Д.В., Протопопов А.А. Исследование износостойкости поверхностей алюминиевых сплавов после ионной модификации // Сборник трудов. "Современная электротехнология в промышленности центра России". Тула: ТулГУ, 2006. С. 133–138.

УДК 621.791.92

А.Н. Тарасов, Н.Р. Павловский (ОКБ "Факел", г. Калининград),
В.Н. Тилипалов, В.В. Ильин (КГТУ, Калининград)

Электроимпульсно-дуговое легирование углеродистых сталей через подслой электропроводящей эмали

Приведены результаты исследований структуры и свойств упрочненных слоев при импульсно-дуговом легировании по новой технологии с использованием токопроводящей эмали с наполнителями из высокопрочных порошков карбидов и нитридов. Определены направления и эффективность упрочнения разработанными способами деталей, инструмента, оснастки при ремонте, восстановлении и изготовлении в условиях ремонтных и мелкосерийных предприятий.

Ключевые слова: импульсно-дуговое легирование, токопроводящие эмали, карбидные и нитридные порошковые наполнители.

Results of researches of structure and properties of the strengthened layers on new technology with use of current-carrying enamel with high-strength powders of carbides and nitrides. Directions and efficiency of hardening are defined by the developed ways of details, the tool, equipment at repair, restoration and manufacturing in the conditions of the repair and small-scale enterprises.

Keywords: strengthened layers, current-carrying, powder additives of carbides, nitrides.

Состав, структура и свойства поверхностных слоев электроискрового легирования, упрочнения деталей, инструмента и оснастки определяются материалами электродов и условиями обработки, а также мощностью установок и условий сканирования [1, 2, 5]. При этом технологические возможности применяемых установок типа ЭФИ-40, ЭФИ-46, "Элитрон" позволяют формировать упрочненные слои малой толщины, преимущественно на малогабаритных деталях и инструменте.

В Калининградском техническом университете и ОКБ "Факел" проведены опыты и разработаны технологии упрочнения углеродистых сталей **электроимпульсно-дуговым легированием** (ЭИДЛ) массивных деталей и оснастки с использованием легирующих порошков и специальных электродов, более эффективных в сравнении с ранее апробированными применительно к крупногабаритным деталям в условиях ремонтных цехов и мастерских предприятий региона [3–6].

Для исследований использовали нестандартные схемы подготовки поверхностей образцов и деталей перед электроимпульсно-дуговым упрочнением. Сначала наносили слой токопроводящих эмалей ХС по ОСТ 92-0440–81, содержащих молибден, марганец, кобальт, с введением наполнителей микропорошков (карбидов бора, кремния; нитридов бора, титана и интерметаллидов никель-титан, никель-алюминий) по поверхностям с предварительной абразивно-струйной обработкой. После сушки и отверждения эмалей с наполнителями проводили электроимпульсно-дуговую обработку электродами из порошковых быстрорежущих сталей Р6М5, Р6М3 и легированных титановых сплавов ВТ-6, ВТ-14.

Упрочнение вели с различным точечным, пятнистым перекрытием зон оплавления и изменением удельной мощности. Для обработки использовали тиристорные генераторы модели ТГ-250-0,15. В табл. 1 приведены схемы упрочнения ЭИДЛ образцов и деталей с различными наполнителями.

Таблица 1

Схемы упрочнения ЭИДЛ деталей с различными наполнителями

Стали, составы легирующих покрытий ¹	Марки электродов, вид зон плавления
Диски и пластины из прутков и листов из сталей: 10880, 10, 15, 25, 35. Нанесение слоев эмали ХС токопроводящей с введением 10...15 % одного из порошков фракций 20...40 мкм: V_4C , SiC , BN , TiN , ПН55Т45. Сушка 36...48 ч на воздухе	1. Пруток из титанового сплава ВТ-14; пятнисто-точечное оплавление диаметром 2...3,5 мм с перекрытием 10...15 %. 2. Серебрянка из стали Р6М5 диаметром 3 мм; круговое сканирование по диаметру дисков и зонное вдоль рабочих кромок с перекрытием 5...10 % пятен оплавления размером 2...2,5 мм
¹ Предварительная абразивно-струйная обработка детали карбидом кремния или фрезерная, токарная при шероховатости поверхности $Ra = 6,5$ мкм.	

Анализ толщины оплавленных зон упрочнения проводили на металлографических микроскопах ММР-4 и "Неофот" в поперечном сечении и послойным сканированием, шлифованием, полированием. Микротвердость послойно и в косом срезе измеряли на микротвердомерах ПМТ-3. На рис. 1 показаны внешний вид поверхностных слоев и макроизломы, на рис. 2 – микроструктура слоев со следами измерения микротвердости.

Основные эксплуатационные свойства определяли на образцах диаметром 50...70 мм. Износостойкость определяли при скоростном трении на станках "Нерис" при трении о микронные шлифбумаги и шлифовании на заточном станке модели 36220 кругами из синтетических алмазов АЧК 12А2-125/100 при частоте вращения 1000...2240 об/мин. При этом измеряли уменьшение массы образцов на заданном пути трения или за равное время шлифования.

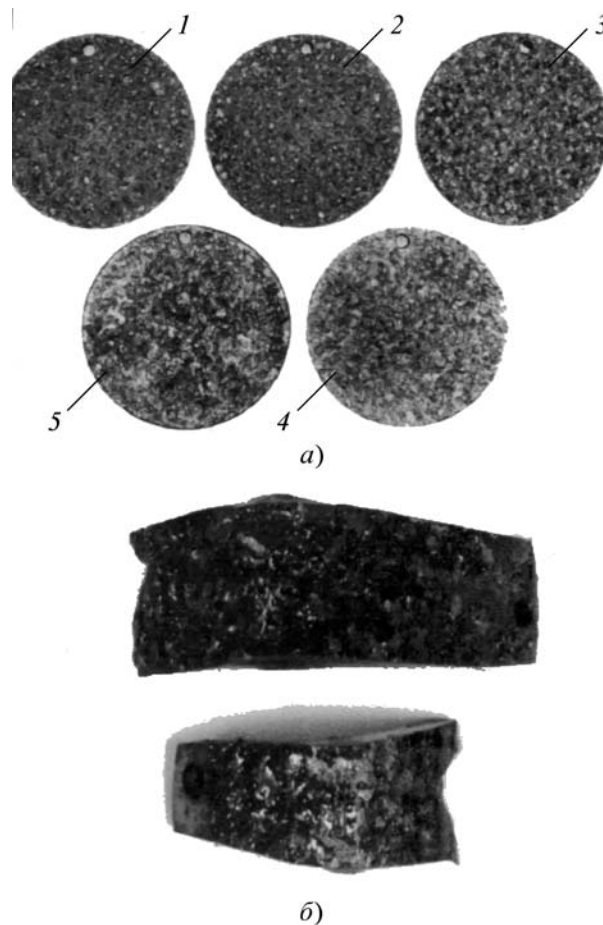


Рис. 1. Внешний вид (а) и макроизломы упрочненных слоев при изгибе на 90° (б) при ЭИДЛ (электрод из ВТ-14): 1 – без наполнителя; 2 – TiN ; 3 – BN ; 4 – ПН55Т45; 5 – SiC

Коррозионную стойкость оценивали по приросту массы после выдержки в течение 288 ч в атмосфере 98 % влажности над 10 %-ным водным раствором тиосульфата натрия. Окалиностойкость определяли по увеличению массы после нагрева в окислительной

Рис. 2. Микроструктура слоев со следами измерения микротвердости при импульсно-дуговом упрочнении стали 10 через порошок V_4C (а) и порошок интерметаллида Ni_3Ti (б) титановым электродом ($\times 100$)



Таблица 2

Результаты испытаний слоев ЭИДЛ

Основа, наполнители, электроды, легирование*	Микротвердость, HV _{1Н} **	Коррозионная стойкость, г/м ²	Окалиностойкость, г/(см ² ·ч)	Износостойкость	
				путь трения, м	г/см ²
Сталь 10, эмаль ХС-930, без наполнения, ВТ-14 точечное легирование 1,8...2 мм	580/215	19,6	9,8·10 ⁻³	300	0,00405
				600	0,00610
Сталь 15, эмаль с наполнением карбид кремния, ВТ-14, точечное легирование 1,8...2 мм	860/227	5,5	2,4·10 ⁻³	300	0,00072
				600	0,00094
Сталь 10880, эмаль, наполнитель карбид бора, Р6М5-П, точечное легирование 2,0...2,5 мм	1140/188	11,2	5,7·10 ⁻³	300	0,00015
				600	0,00018
Сталь 25, эмаль, наполнитель ПН55Т45, Р6М5-П, точечное легирование 2,0...2,5 мм	750/198	4,3	3,0·10 ⁻³	300	0,00128
				600	0,00170

* 10 % наполнителя использовали для режима с электродами из сплава ВТ-14 и 15 % – для режимов с электродами из Р6М5-П.
 ** В числителе приведена микротвердость слоя 100 мкм, в знаменателе – основы.

печи СНОЛ-1,6.2,5.1/9И1 после выдержки в течение 24 ч при температуре 850 °С.

На этих же образцах в исходном состоянии и после упрочнения измеряли терморadiационные характеристики поверхностей на терморadiометрах ТРМ-1 и фотометрах ФМ-59. Склонность к выкрашиванию слоев определяли после изгиба на угол 90...120° на испытательных машинах Р-5.

В табл. 2 и на рис. 3 приведены результаты испытаний слоев электроимпульсно-дугового легирования различными электродами через слои токопроводя-

щих эмалей с введением порошковых наполнителей различного состава.

Микротвердость измеряли на твердомере ПМТ-3 в поперечном сечении от зон оплавления (пятнистых, однослойных включений), через переходную зону термического влияния с переходом к основному металлу. В продольном сечении измерения вели послойно через 100 мкм, шлифованием на плоскошлифовальной станке и полированием на станке "Нерис".

Послойно также проводили спектральный анализ состава точечных пятнистых зон компактного опла-

вления, образующихся при ЭИДЛ различными электродами по подслою с различными наполнителями. В табл. 3 приведены результаты определения состава и свойств образцов и деталей, упрочненных по различным технологическим схемам.

Как показали исследования, при электроимпульсно-дуговом легировании углеродистых сталей на поверхностях с предварительным нанесением токопроводящей эмали с карбидным и нитридным наполнителями на мощностях импульсного генератора ТГ-250-1,5 формируются упрочненные слои толщиной 400...800 мкм в зависимости от подводимой мощности, степени перекрытия и диаметра электродов. В структуре слоев при обработке электродами из быстрорежущих сталей Р6М5-П,

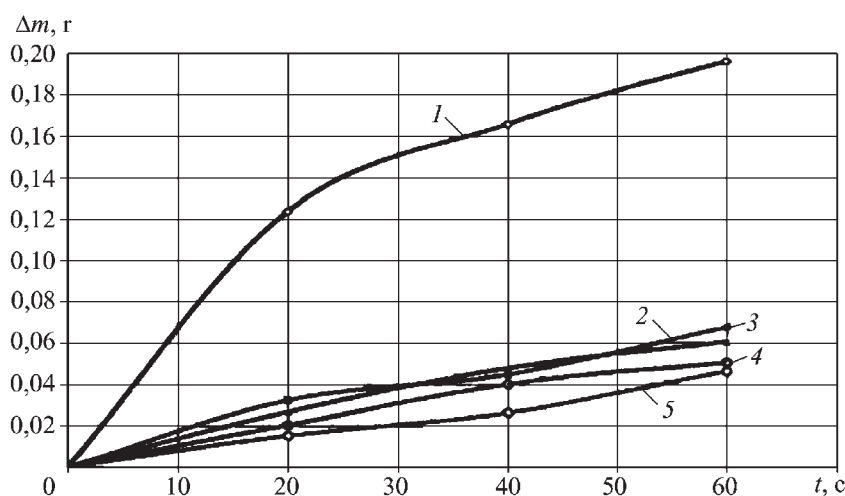


Рис. 3. Износостойкость (потеря массы) упрочненных слоев с различными наполнителями при скоростном трении о круги с синтетическими алмазами (электроды ВТ-14). (Обозначения 1–5 – см. к рис. 1)

Состав и свойства слоев ЭИДЛ

Изделие, сталь, схема ЭИДЛ	Состав и свойства сформированной поверхности*			
	Легирующие элементы в слое 0,5 мм	Твердость, HV	Прочность при загибе на 90°	Износостойкость **. Контртело
Полюса внутренние из стали 10880, электроды из Р6М5, по эмали ХС с наполнением V_4C	Хром, молибден, ванадий, никель, бор	990...1100	Отслоения и сколы не наблюдаются, сетка продольных и поперечных трещин	1,7...1,89 В аргоновой плазме
Шнековые накладки из стали 25, электроды из ВТ-14, по эмали ХС с наполнением	Хром, никель, молибден, алюминий, ванадий, кремний	760...814	Единичные сколы, продольные трещины	1,4...1,5 Очистка чугунного литья
Ножи съемные культиваторов из стали 35, электроды Р6М5-МП, по эмали ХС с наполнением Ni_3Ti	Вольфрам, молибден, ванадий, хром, никель, титан	835...904	Продольные трещины протяженностью 3...4,5 мм	2,0...2,1 Культивирование пахотной земли

* Для полюсов из магнитомягкой стали 10880 степень черноты $E = 0,85...0,86$, коэффициент поглощения $A_s = 0,88...0,89$.
 ** Относительная в сравнении с ЭИДЛ феррохромом.

Р6М3 через подслои с наполнителями V_4C , SiC наблюдаются зоны оплавления с дендритной структурой, чередующиеся с участками, обогащенными избыточными имплантированными наполнителями (рис. 4).

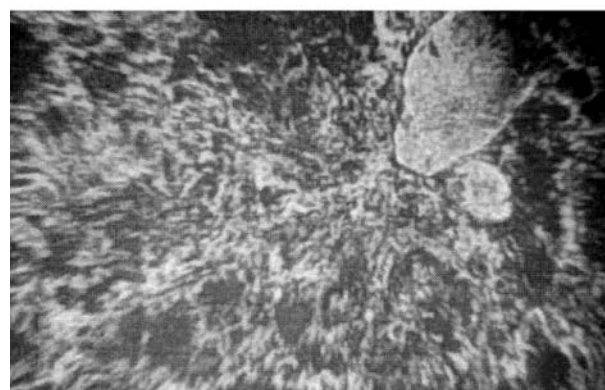
Менее равномерные, однородные зоны поверхностного упрочнения формируются при использовании титанового электрода из ВТ-14 и более дисперсными наполнителями BN , TiN . Более равномерные, менее шероховатые слои образуются в аналогичных условиях при использовании в качестве наполнителей порошков ПН55Т45 – интерметаллида никель-титан и интерметаллида никель-алюминий. Последние имеют наиболее высокую коррозионную стойкость в сравнении с карбидными наполнителями.

При ЭИДЛ сталей марок: 10880, 10, 15, через подслои с наполнителем V_4C электродом из быстрорежущей стали Р6М5 наблюдается образование микротрещин в зонах оплавления. Практически при всех видах наполнителей слои имеют прочное соединение с основой и обладают высокой термостойкостью, не отслаиваются и не выкрашиваются, более чем через 50 теплосмен с охлаждением от 950 °С в воде.

Проведенные опыты и результаты изучения структуры и свойств слоев, полученных электроимпульсно-дуговым упрочнением по различным технологическим схемам, показали неоднозначные данные по универсальности и технологичности предложенных процессов. В табл. 4 приведены результаты обработки полученных данных и возможные направления применения к деталям, оснастке и инструменту способов упрочнения углеродистых сталей.



а)



б)

Рис. 4. Макроструктура (а×1,1) и микроструктура пятен ЭИДЛ на стали 15 электродами из Р6М5 и наполнителе V_4C в слое 0,45 мм (б×250)

Таблица 4 жателей, работающих в условиях повышенной

Результаты обработки данных исследования

Детали, сталь, условия формирования слоя ЭИДЛ	Тип наполнителя, свойства	Дополнительная обработка поверхности после ЭИДЛ
Полюса магнитопроводов из магнитомягкой стали 10880, кольцевое сканирование электродом из стали Р6М5 по рабочей кромке, перекрытие 15 %	V_4C $T_{пл} = 2350 \text{ }^\circ\text{C}$ 4600...4750 HV $\lambda = 120 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Абразивно-струйная обработка карбидом кремния
Накладки галтовочные из стали 25, произвольная пятнисто-точечная обработка электродами из ВТ-14, двухслойная	SiC $T_{пл} = 2820 \text{ }^\circ\text{C}$ 3230...3450 HV $\lambda = 9,0 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Механическое крепление без зачистки рабочих поверхностей
Съемные ножи культиваторов из стали 35, продольное сканирование по двум поверхностям электродом из Р6М5, двухслойное	Ni_3Ti $T_{пл} = 1520 \text{ }^\circ\text{C}$ 880...890 HV $\lambda = 16,5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$	Подгонка посадочных мест, рабочие поверхности без механообработки

влажности, ЭИДЛ необходимо проводить с использованием в качестве наполнителей порошков интерметаллидов никель-титан, никель-алюминий и электродов из легированного титана. При меньшей твердости такие упрочненные слои имеют более высокую коррозионную стойкость, износостойкость в условиях контактного трения. Кроме того, при лучшей сплошности слоев возможно шлифование на глубины 150...200 мкм.

Вывод

Таким образом, ЭИДЛ позволяет достичь оптимальной структуры, состава и свойств слоев на углеродистых сталях при величине поверхностных зон упрочнения толщиной до 0,7...0,8 мм. Варьируя состав предварительного покрытия на основе токопроводящей эмали введением карбидных, нитридных и интерметаллидных порошков наполнителей, а также составы легирующих электродов, удается прогнозировать эксплуатационные характеристики рабочих поверхностей деталей, инструмента, оснастки после ЭИДЛ.

Разработанные технологии эффективны в условиях ремонтных и малых предприятий различных отраслей при минимальных энергозатратах и расходах на вспомогательные материалы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Самсонов Г.В. Электроискровое легирование металлических поверхностей. Киев, "Наукова думка". 1976. С. 217.
2. Шомоген В.И. Влияние материала электродов на формирование электроискровых покрытий на инструменте и технологической оснастке / МиТОМ. 2007. № 9 (627). С. 34–39.
3. Тарасов А.Н., Тилипалов В.Н., Павловский Н.Р. Электроимпульсно-дуговое упрочнение деталей ферросплавами // Наука и технологии, труды XXXVI школы "Неоднородные конструкции и материалы". Миасс, 2007.
4. Тарасов А.Н., Тилипалов В.Н., Кучковский В.С. Упрочнение крупногабаритных деталей портовых кранов электроискровым легированием ферросплавами // Ремонт, восстановление, модернизация. 2007. № 9. С. 2–5.
5. Тарасов А.Н., Шевченко П.Р. Формирование эрозионно стойких покрытий магнитопроводов плазменных деталей // Перспективные материалы. 2001. № 1. С. 64–69.
6. Тарасов А.Н., Макаровский В.А., Павловский Н.Р. Структура и свойства упрочненных слоев при электроимпульсно-дуговом легировании поверхностей ферросплавами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 6. С. 44–47.

Исследования показали, что лучшей сплошностью и однородностью обладают упрочненные слои, полученные ЭИДЛ через подслои с наполнителями из карбида бора, карбида кремния, интерметаллидов никель-титан, никель-алюминий при использовании стальных и титановых электродов. Наполнители типа нитрид бора гексагонального и нитрид титана существенно повышают пористость упрочненного слоя, уменьшают сплошность до 45...50 %. Число кратеров, пор возрастает, а число легирующих элементов в металлической матрице на основе железа повышается несущественно.

На базе результатов изучения структуры, состава и свойств слоев ЭИДЛ углеродистых сталей появилась возможность оценки целесообразности применения разработанных схем упрочнения для изделий различного назначения.

Наиболее эффективным является ЭИДЛ конструкционных деталей и оснастки без чистового заключительного шлифования упрочненных слоев, например, деталей галтовочных аппаратов очистки литья, лопастей плугов и ножей культиваторов. Аналогично можно упрочнять дисковые шлифовальные круги для обработки минералов и керамических изделий. Различие состоит в том, что порошковые наполнители карбид бора, нитрид титана выбирают в этих случаях менее крупных микронных фракций, а в качестве электродов применяют прутки быстрорежущих порошковых сталей Р6М5-П, Р6М3-МП.

Для деталей и оснастки судового оборудования – тормозных барабанов и колес контейнерных перегру-

Ю.Н. Тюрин, О.В. Колисниченко, И.М. Дуда
(Институт электросварки им. Е.О. Патона НАН Украины, Киев)

Сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного и HVOF-устройств для газотермического напыления покрытий

Проведен сравнительный анализ эффективности кумулятивно-детонационного устройства для газотермического напыления покрытий с серийно выпускаемыми HVOF-установками. Отличительной особенностью кумулятивно-детонационного устройства является наличие двух камер, где происходит сгорание горючих смесей с частотой 10...30 Гц. Простое в обслуживании технологическое оборудование обеспечивает низкую стоимость и высокую эффективность процесса напыления и экономичное использование материально-энергетических ресурсов.

Ключевые слова: кумулятивно-детонационное устройство, устройства HVOF, технология Cold Spraying, газотермическое нанесение покрытий, порошки, экономия, энергетические ресурсы, экология, качество покрытия.

Comparative analysis of efficiency was conducted for cumulative-detonation installation in comparison with HVOF thermal spray systems. The distinctive feature of cumulative-detonation installation is a presence of two chambers, where gas mixture is combusted with frequency 10...30 Hz. Adjustable technological equipment ensures low cost and high efficiency of spraying and economic use material and energy resources.

Keywords: cumulative-detonation installation, HVOF, Cold Spraying technology, thermal spraying, powders, economy, energy resources, ecology, coating quality.

Введение

Преимуществами *высокоскоростного газопламенного метода* (HVOF) по сравнению с другими методами газотермического напыления являются достаточно высокая скорость частиц (до 750 м/с) и минимальная пористость получаемого покрытия (1...4 %). На практике широко используются такие серийно выпускаемые устройства HVOF, как JP-5000/8000 (Tafa-Praxair, USA), DJ 2600/2700 (Sulzer Metco, USA), Intelli-Jet (Solid Spray Technologies, USA), HV 50 HVOF (Flame Spray Technologies, the Netherlands) и др. Как пример удачного совершенствования устройства HVOF можно привести горелку TOPGUN® AIRJET [1], которая может распылять порошки и проволоки. Национальный институт металлов (NIMS) в Японии разработал насадку на устройство для HVOF [2], которая снижает температуру рабочего газа. В эту насадку дополнительно подают до 30 м³/ч азота. Наиболее интересна горелка HVAF- Intelli-Jet, которая представлена Joint Stock Company "Mashprom" (Екатеринбург, Россия) [3]. Эта горелка использует более 300 м³/ч воздуха и до 16 м³/ч пропилена. Охлаждение горелки осуществляется компонентами горючей смеси, что повышает ее экономичность.

К недостаткам известных устройств и технологий HVOF относится то, что они энергоемки и используют газы под давлением 4 МПа. Это усложняет системы управления газами, повышает требования к безопасности и снижает эффективность газобаллонных

систем. Анализ расходов энергии и газов в устройствах для газотермического нанесения покрытий показывает (табл. 1), что HVOF-технология на каждый килограмм покрытия затрачивает более 10 м³ компонентов горючей газовой смеси. Это необходимо для создания в камере сгорания высокого давления и, как следствие, формирования в сопле устройства для HVOF высокоскоростной струи газа. Однако этот газ имеет избыточную тепловую мощность, которая отрицательно влияет на процесс формирования покрытия, снижает эффективность напыления и увеличивает загрязнение атмосферы. Кроме того, высокая плотность энергии в сопле устройства сильно ограничивает его работоспособность (до 5...10 ч). Борьба за увеличение работоспособности сопел и всего устройства усложняет и делает более энергозатратными системы охлаждения. Анализ стоимости покрытия при использовании HVOF-установок показал, что текущие материально-энергетические затраты на напыление при использовании установок HVOF соизмеримы со стоимостью порошка и составляют 80...110 долл. за напыление одного килограмма покрытия [4]. При расчете учитывали стоимость компонентов горючей смеси, инертного газа, воздуха, электрической энергии и отчисления за стоимость оборудования. В таблице 1 приведено сравнение основных параметров разработанного *кумулятивно-детонационного устройства* (CDS) и нескольких серийно выпускаемых устройств HVOF.

Практически все устройства HVOF расходуют 30...50 кВт электрической энергии на работу системы

Таблица 1

Основные параметры устройств при напылении металлокерамических покрытий

Параметры напыления	Единица измерения	Название устройств для высокоскоростного газопламенного напыления (HVOF)			CDS
		Jet-DJ9W [4]	JP5000 [4]	DZ9000E [5]	
Азот	м ³ /ч	0,8	0,8	–	–
Кислород	м ³ /ч	18,0	60,0	20,0	3,5
Воздух	м ³ /ч	–	–	2,0	2,3
Пропан	м ³ /ч	–	–	5,4	0,7
Метан	м ³ /ч	12,0	–	–	–
Керосин	л/ч	–	19,0	–	–
Пропилен	м ³ /ч	–	–	–	–
Электричество	кВт	7*	10*	28**	3**
Сопло устройства	шт./ч	0,120	0,120	0,100	0,001
КИМ	%	55...70	40...60	60...70	80
Производительность	кг/ч	3,2	3,2	3,0	1,0
Дистанция напыления	мм	250...300	300...400	150...200	30...80

*Затраты электроэнергии включают затраты на работу компрессора, осушителя воздуха и пульта управления.
 **Затраты электроэнергии включают затраты на работу компрессора, пульта управления и системы охлаждения.

охлаждения. Высокая эффективность покрытия окупает затраты на материалы и электрическую энергию, но проблема выбросов в атмосферу парниковых газов и аэрозолей остается. Известные технологии напыления покрытий сопровождаются большими выбросами парниковых газов и аэрозолей, что усложняет и удорожает устройства для их нейтрализации.

Известно, что для формирования качественных покрытий необходимо не допускать перегрева наносимого материала и обеспечить его кинетической энергией, необходимой для пластического деформирования, а также создания высокой адгезионной и когезионной прочности. В устройствах HVOF большая тепловая мощность газа обусловлена необходимостью повышения его давления в камере и обеспечения высокоскоростного истечения через сопло, имеющее небольшое сечение.

В настоящее время достаточно активно развивается направление технологии Cold Spraying – напыление покрытий из пластичных материалов с использованием высокоскоростной струи инертного газа или воздуха. Для повышения эффективности технологии газ нагревают. Несмотря на высокую энергоемкость, затраты только на нагрев газа составляют 10...35 кВт

[6]. Эта технология эффективна для специального применения и постоянно совершенствуется [7–9]. Системы для холодного нанесения покрытий обеспечивают высокоскоростную струю газа за счет его сжатия под высоким давлением (1...3 МПа) и истечения из сопла ограниченного диаметра.

Альтернативой технологиям Cold Spraying и HVOF служат импульсные, например детонационные, системы, которые обеспечивают формирование высокоскоростной струи газа, имеющего достаточно низкую тепловую мощность. В импульсных системах высокая мощность струи газа имеет преимущественно кинетическую составляющую. В этих струях порошки приобретают большую кинетическую энергию без перегрева. Это обеспечивает формирование ламельной структуры покрытия на твердой подложке. Низкая тепловая мощность, высокая скорость газа и порошкового материала позволяют не перегреваться соплу, что на несколько порядков увеличивает его работоспособность.

Проведенный анализ показал, что для газотермического нанесения покрытий наиболее эффективно использовать технологии, где осуществляется детонационное сгорание горючих смесей. В данном случае

большая часть энергии затрачивается на ускорение продуктов сгорания, что обеспечивает их высокую скорость с минимальным нагревом. Известны детонационные устройства различной конфигурации. Например, Aerostar Coatings использует высокочастотные устройства NHDS [10]. В России ОАО "НИИ-Химмаш" (г. Новосибирск) производит и активно продвигает на рынок устройства типа "Гром". На Украине широко используют установки типа "Regun". Эти устройства используют для нанесения покрытий из твердого сплава, металлокерамики и пр. К недостаткам детонационной технологии можно отнести небольшую производительность и ограничения по использованию компонентов горючей смеси. В детонационной технологии используют смеси, близкие к стехиометрии. Это не позволяет формировать низкотемпературные газовые струи. Кроме того, имеются ограничения по созданию струи с восстановительным составом продуктов сгорания. Разработаны устройства, где продуктам детонационного сгорания горючих газовых смесей придают дополнительную кинетическую и тепловую энергию, используя мощный преобразователь электрической энергии (до 20 кВт), который подключался к специальному электроду в детонационной камере [11].

Мы предлагаем новую конструкцию энергосберегающего кумулятивно-детонационного устройства для нанесения покрытий [12], которое обеспечивает формирование качественного покрытия при меньших затратах электроэнергии и компонентов горючей газовой смеси (см. табл. 1).

Описание устройства CDS

В кумулятивно-детонационном устройстве реализован режим детонационного сгорания горючих смесей.

Устройство (рис. 1) состоит из детонационной камеры 1, где реализуется детонационный режим сгорания горючей газовой смеси. Кроме того, устройство содержит кумулятивно-детонационную камеру 2, работающую с использованием горючих смесей любой концентрации, что позволяет формировать высокоскоростную струю газа с избытком азота, углерода и т.д. Цилиндрическое сопло 3 предназначено для нагрева и ускорения порошковых материалов. Оно изготавливается из медных трубок и может иметь любую конфигурацию сечения и выходной диаметр от 10 до 30 мм. Кроме того, CDS имеет узел 4 для ввода и газовой отсечки газопорошковой смеси, автомобильную свечу зажигания 5 для инициирования детонационного режима сгорания и систему трубопроводов 6 для ввода компонентов горючей газовой смеси.

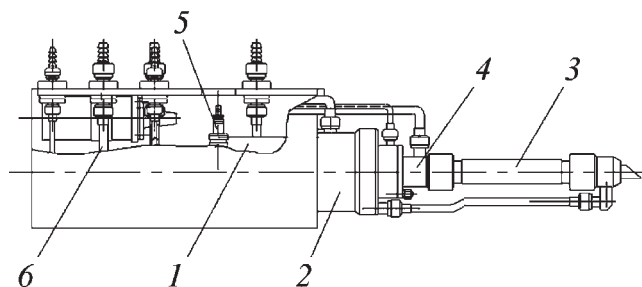


Рис. 1. Кумулятивно-детонационное устройство для нанесения покрытий:

1 – детонационная камера; 2 – кумулятивно-детонационная камера; 3 – цилиндрическое сопло; 4 – узел для ввода и газовой отсечки газопорошковой смеси; 5 – автомобильная свеча зажигания

Существенным отличием работы кумулятивно-детонационного устройства от детонационного является то, что в нем осуществляется суммирование энергии продуктов детонационного сгорания горючих газовых смесей от нескольких специально профилированных детонационных камер. Кумуляция энергии позволяет сформировать высокоскоростной поток рабочего газа, имеющий несколько ударных волн, что обеспечивает эффективное взаимодействие их с порошковым материалом. Это обеспечивает рациональное использование энергии горючей газовой смеси. Скорость и температура продуктов сгорания зависят только от режима сгорания в каждой из камер.

Экспериментальные работы показали, что сопла кумулятивно-детонационного устройства имеют работоспособность более 1000 ч. Высокая частота инициирования сгорания (15...30 Гц) в CDS обеспечивает возможность осуществления квазинепрерывной технологии нанесения покрытий, что позволяет использовать стандартные устройства для подачи порошков и газов. Низкая тепловая мощность продуктов сгорания делает возможным формирование покрытия с небольшой дистанции (10...60 мм), что существенно повышает эффективность напыления, снижает окисление и потери напыляемого материала. Имеется возможность нанесения покрытий на изделия маленького размера и с тонкими стенками (0,3...1,0 мм), что увеличивает область применения технологии. Технология импульсная, продукты сгорания и порошок имеют контакт со стенками устройства 0,001...0,002 сек, что снижает тепловую напряженность стенок и, соответственно, затраты на их охлаждение. Кроме того, использование исходных газов низкого давления 0,1...0,2 МПа позволяет комплектовать пульты управления соответствующими дешевыми устройствами, что снижает их стоимость и, самое главное, повышает безопасность ведения работ. Использование технологических газов низкого

давления существенно повышает эффективность использования газобаллонных систем.

Обсуждение результатов экспериментального исследования

Для оценки диапазона фракций порошка усваиваемых при нанесении покрытий с использованием CDS использовали порошок: ПС-12НВК-01 (Ni-основа; Cr–14–20%; В – 3,5%; Si – 4,3%; Fe < 7%; С – 0,8%, WC – 35%). Фракция порошка: 40 мкм – 50%; 40...63 мкм – 15%; 63...80 – 7%; более 80 мкм – 28%.

Использование механической смеси с большим разбросом по сечению фракций позволяет оценить возможность нагрева и ускорения порошков различных фракций. Расстояние от среза сопла CDS до поверхности образца – 50 мм, скорость перемещения образца – 13 мм/с. Покрытие наносили послойно за пять проходов, толщина слоя за один проход составила 30 мкм. В качестве материала подложки использовали медь М1.

Расход газов при нанесении покрытия составил – $G_{C_3H_8} = 0,47 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{O_2} = 2,6 \text{ м}^3/\text{ч}$; $G_{\text{возд}} = 3,13 \text{ м}^3/\text{ч}$. Порошковый питатель обеспечивал при нанесении покрытий расход порошка 1,0 кг/ч. Частота следования импульсов – $\nu = 12 \text{ Гц}$. В качестве транспортирующего газа использовался воздух.

На рисунках 2, 3 приведен поперечный вид покрытия из порошка ПС-12НВК-01. При анализе покрытий на сканирующем микроскопе наблюдали перемешивание материала покрытия и подложки в слое, размер которого превосходит в 3 раза фракцию напыляемого порошка. В переходной зоне наблюдали до 52 % меди (табл. 2) [13].

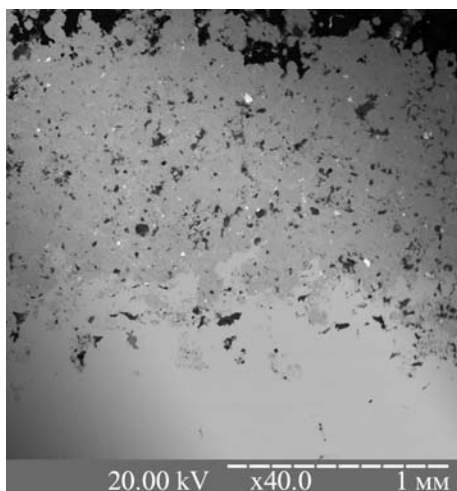


Рис. 2. Вид косо́го шлифа (7°) покрытия из порошка ПС-2НВК-01 на медной подложке

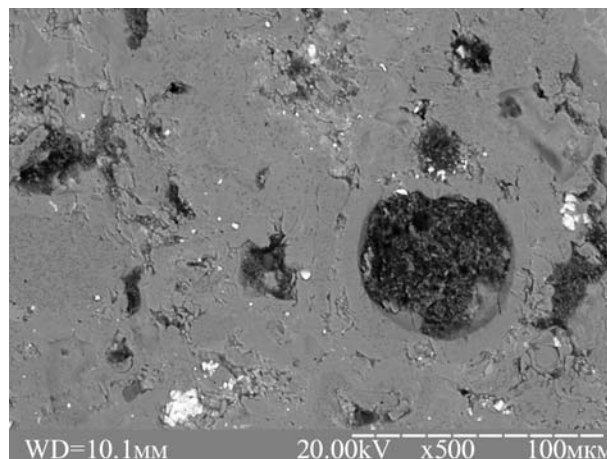


Рис. 3. Сечение покрытия ПС-12НВК-01 с видом на отпечаток выкрошенной частицы порошка

Часть порошкового материала глубоко (до 100 мкм) проникла и прочно соединена с материалом подложки (см. рис. 2). По-видимому, скорость дискретных частиц порошка так высока, что при столкновении с подложкой образуются напряжения, превосходящие предел прочности материала подложки, наблюдается перемешивание материалов покрытия и подложки. В покрытии видны твердые включения, характерные для карбидов вольфрама. Основная масса порошка материала покрытия деформирована и плотно упакована, но имеются включения в виде холодных, недеформированных порошинок большого

Таблица 2

Распределение химических элементов

Элемент	Концентрация элементов, интегральное значение в мас. %		
	Покрытие	Переходная зона	Подложка
C	1,11	0,77	–
Al	0,10	1,42	–
Si	2,31	0,84	–
Cr	19,88	8,77	–
Fe	4,09	1,55	–
Co	3,21	1,86	–
Ni	59,60	25,81	–
W	9,71	7,06	–
Cu	–	51,93	100

сечения (> 50 мкм). Наличие таких частиц увеличивает пористость покрытия (рис. 3).

Экспериментальные исследования показали, что коэффициент использования материала, при нанесении покрытий из порошка ПС-12НВК-01, составляет только 50 %. Большая часть порошка не успевает прогреться в сопле CDS и отражается от твердой поверхности покрытия. Некоторые частицы порошка, деформируя поверхность, внедряются в слой покрытия, но не образуют компактного материала. Частицы материала, имеющие размер ниже 40 мкм, прогреваются и при формировании покрытия деформируются, образуя плотный материал с включениями карбидов вольфрама.

На основе проведенного эксперимента было сделано заключение, что дисперсность порошкового материала для нанесения покрытий с использованием устройства CDS должна быть в пределах 20...40 мкм.

Для дальнейшего проведения работ был взят стандартный порошок, используемый в устройствах HVOF, имеющий дисперсность 20...40 мкм (AMPERIT® 584.054 Cr₃C₂-NiCr 75...25 %). На основе опубликованных результатов проведена сравнительная оценка эффективности разработанного устройства CDS с известными устройствами HVOF.

Покрытия наносили на образцы из стали 3. Расход газов при нанесении покрытия составлял: $G_{C_3H_8} = 0,57$ м³/ч; $G_{O_2} = 2,6$ м³/ч; $G_{возд} = 1,8$ м³/ч. Производительность – 0,8 кг/ч. Расход транспортирующего газа (воздуха) – 0,65 м³/ч. Частота следования импульсов – $\nu = 12$ Гц.

Металлографический анализ показал, что при толщине покрытия 0,3 мм, твердость $HV_{(300)} =$

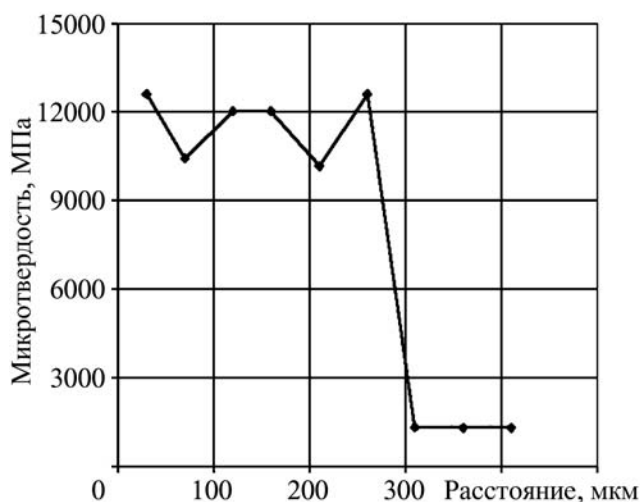
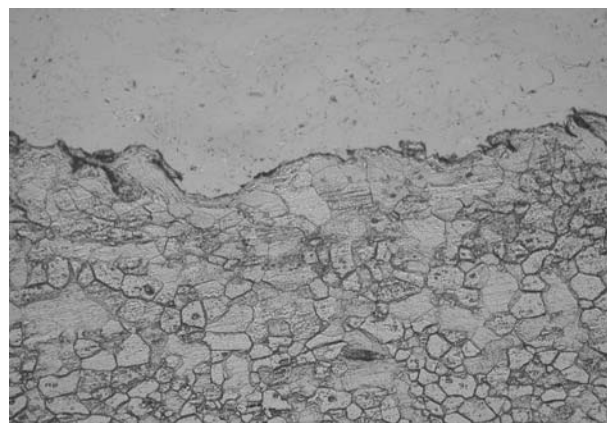
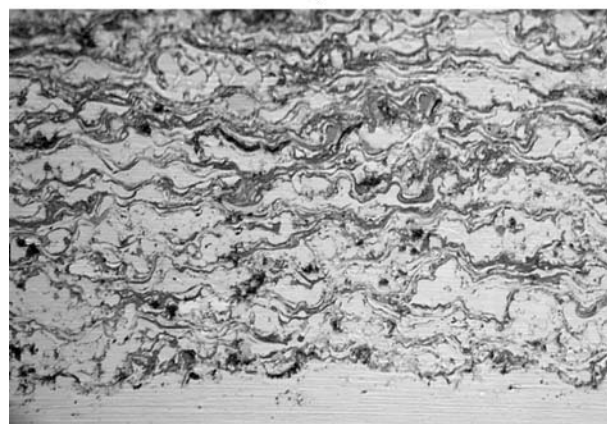


Рис. 4. Изменение интегральной микротвердости покрытия



а)



б)

Рис. 5. Вид шлифа покрытия из порошка Cr₃C₂-NiCr, нанесенного кумулятивно-детонационным устройством:

а – вид границы покрытия $\times 250$ после травления основы в 3 % HNO₃; б – вид покрытия $\times 400$ после электролитического травления в хромовом ангидриде

$= 1000...1200$ МПа (рис. 4). Коэффициент использования материала свыше 80 %.

Металлографический анализ показывает, что покрытие Cr₃C₂-NiCr плотное (пористость $< 1,8$ %), имеет хорошее прилегание к подложке (рис. 5). Под слоем покрытия просматриваются деформированные зёрна подложки, что является следствием соударения высокоэнергетических и достаточно твердых порошинок с подложкой. Материал покрытия содержит хорошо деформированные дискретные частицы исходного материала, без трещин и крупных пор.

В настоящее время опубликовано достаточно много информации о исследованиях и отработке HVOF технологий нанесения жаропрочных покрытий. Например [14], при нанесении 1,5 кг/ч порошка Cr₃C₂-NiCr расход пропана составлял 5,2 м³/ч, кислорода – 18 м³/ч и воздуха – 24 м³/ч. Получили покрытие толщиной 200 мкм и твердостью $HV_{(300)} =$

= 840 ± 73 МПа. В статье [15] приведены результаты нанесения покрытий из порошка Cr₃C₂-NiCr с использованием HVOF-технологии, где окислителем является воздух. При расходе порошка 2 кг/час потребление керосина составляло 23 кг, а воздуха – 200 м³/час. Твердость полученного покрытия HV₍₃₀₀₎ = 1150 МПа. Сравнительный анализ основных, технических и экономических параметров технологий газотермического напыления покрытий Cr₃C₂-NiCr показывает преимущество CDS. При использовании CDS для получения покрытий из стандартного порошка Cr₃C₂-NiCr расход пропано-кислородной смеси составил 3,17 м³ на 0,8 кг покрытия. По данным [4, 5, 14, 15] на напыление 1 кг покрытия такого же качества расходуется 10...25 м³ горючей смеси. Кроме того, все эти системы энергоемки и требуют активного охлаждения. Суммарно затрачивается 30...50 кВт на работу компрессора высокого давления и систем охлаждения.

Заключение

Был проведен сравнительный анализ экспериментальных исследований, нового кумулятивно-детонационного CDS и известных HVOF-устройств для газотермического нанесения покрытий. Установлено, что для напыления покрытия из порошка Cr₃C₂-NiCr стандартным устройством HVOF используют более 10 м³ компонентов горючей смеси на 1 кг покрытия. Кумулятивно-детонационное устройство расходует на 1 кг покрытия около 4 м³ кислородно-пропановой газовой смеси. Для комплектации устройств CDS используют стандартное оборудование и приборы низкого давления до 0,2 МПа, что обеспечивает безопасность и более полное использование газов из баллонов. В устройстве CDS сгорание рабочей смеси осуществляется с высокой частотой, что обеспечивает возможность реализации квазинепрерывной технологии газотермического напыления покрытий и комплектацию его стандартными порошковыми питателями, используемыми для работы в плазменных устройствах. Известно, что в HVOF-устройствах используют газы высокого давления (4 МПа), что повышает стоимость газовых пультов, снижает эффективность работы газобаллонных систем и предъявляет повышенные требования по безопасности работ.

Низкая тепловая мощность, а также низкие давление газов и затраты энергетических ресурсов упрощают оборудование и обеспечивают создание простой и работоспособной конструкции технологического устройства CDS. Сменным соплом служит стандартная трубка, работоспособность которой выше 1000 ч и стоимость в десятки раз ниже, чем сопла HVOF.

Высокая скорость обеспечивает перемешивание порошка с материалом подложки, что гарантирует высокую работоспособность тонких покрытий.

Разработанную конструкцию устройства можно использовать для нанесения покрытий из тугоплавких и легкоплавких материалов. Кратковременность и локальность теплового воздействия на поверхность изделия уменьшает зону термического влияния и расширяет область применения технологии.

Отличительной особенностью технологического оборудования является простота в обслуживании, низкая стоимость и высокая эффективность использования материально-энергетических ресурсов.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Wielage B., Rupprecht C., Paczkowski G., Menzen R., Weissenfels G., Bernhardt H.-U. and Runkel M.** A new way in HVOF technology – CFD optimized TOPGUN® AIRJET for powder and wire // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 145–150.
2. **Chivavibul P., Watanabe M., Kuroda S., Kawakita J., Komatsu M., Sato K. and Kitamura J.** Development of WC–Co coatings deposited by warm spray process // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 64–69.
3. **Korobov Y. and Filippov M.** HVOF coating application in steel-making process // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 1362–1365.
4. **Meyer P., Rusch W.** Production Coating Cost Comparison // Proceedings of ITSC 2003, Orlando, Florida, USA, May 5–8, 2003. P. 123–128.
5. **Wang R.J., Xu L., Zhang T.J., Huang X.O., Luo H.J.** Development and Application of DZ9000E Portable HVOF System // Proceedings of ITSC 2007, Beijing, China, May 14–16, 2007. P. 577–581.
6. **Blose R.E., Roemer T.J., Nichols R.T., Mayer A.J. and Beatty D.E.** Automated cold spray system: Description of equipment and performance data // Proceedings of ITSC 2005, Basel, Switzerland, May 2–4, 2005. P. 56–64.
7. **Hoell H. and Richter P.** KINETIKS® 4000 – new perspective with cold spraying // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 477–478.
8. **Jodoin B., Richer P., Bérubé G., Ajdelsztajn L., Yandouzi M., Erdi A.** Pulsed-Cold Gas Dynamic Spraying Process: Development and Capabilities // Proceedings of ITSC 2007, Beijing, China, May 14–16, 2007. P. 19–24.
9. **Kitamura J., Sato K., Aoki I., Sakaki K., Takahata M. and Shimizu Y.** // Mechanical properties of WC/Co coatings prepared by cold spraying // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 1244–1248.
10. **Parco M., Barykin G., Fagoaga I. and Vaquero C.** Development of wear resistant ceramic coatings by HFPD // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 140–144.
11. **Tyurin Y.N., Pogrebnjak A.D.** Advances in the development of detonation technologies and equipment for coating deposition // Surface and Coatings Technology. 111. 1999. P. 269–275.

12. Тюрин Ю.Н., Колисниченко О.В. Спосіб детонаційного напилення покриття і прилад для його здійснення // Патент України на винахід № 83831, 26.08.2008.

13. Структура и свойства покрытия из Ni–Cr–B–Si–Fe/WC–Co, нанесенного на подложку из стали и меди / А.Д. Погребняк, С.Н. Братушка, В.В. Углов, С.Н. Дуб, О.В. Колисниченко, Д.Л. Алонцева, Ю.Н. Тюрин, А.Н. Шпиленко // Физическая инженерия поверхности. Т. 6, № 1–2, январь–июнь 2008. С. 92–97.

14. Magnani M., Suegama P.H., Benedetti A.V. et al. The application of Cr₃C₂–NiCr coatings to improve the corrosion and wear properties of an aa7050 alloy // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 1366–1371.

15. Matthews S., Hyland M. and James B. Single impact erosion studies of Cr₃C₂–NiCr coating: the role of microstructure variation // Proceedings of ITSC 2008, Maastricht, The Netherlands, June 2–4, 2008. P. 1371–1378.

УДК 621.785

В.Н. Хромов, В.Н. Корнев, В.В. Барабаш
(Орловский государственный аграрный университет)

Оценка объемных наноструктурированных покрытий при газопламенном напылении с использованием водородно-кислородного пламени

Проведены сравнительные металлографические исследования газопламенных покрытий, полученных при напылении порошковыми материалами ацетилено-кислородным и водородно-кислородным пламенем с целью выявления особенностей соединения напыленного металла и основного металла детали, а также для анализа наноструктурных изменений пористости в поверхностном слое детали.

Ключевые слова: газопламенное напыление, водородно-кислородное пламя, объемные наноструктурированные покрытия, особенности соединения, наноструктурные изменения пористости в поверхностном слое, сравнительные металлографические исследования.

With the purpose of revealing features of connection sprayed metal and the basic metal of a detail, and also for the analysis of nanopatterning changes of porosity in a superficial layer of a detail are resulted comparative metallographic researches of the flame coatings received at spraying by powder materials by a hydrogen-oxygen flame.

Keywords: flame spraying, hydrogen-oxygen flame, volumetric nanopatterning coatings, revealing features of connection, nanopatterning changes of porosity in a superficial layer, comparative metallographic researches.

Актуальность и задачи исследования

Успешное решение задач, связанных с понижением металлоемкости конструкции при одновременном улучшении ее технических характеристик, ведет к необходимости использования композиционных материалов.

К числу наиболее прогрессивных технологических процессов получения таких материалов относятся методы нанесения защитных и упрочняющих покрытий, особое место среди которых занимают процессы газотермического напыления [1].

Применение различных горючих газов для замены ацетилена в процессах газопламенной обработки с каждым годом получает все большее распространение. В качестве заменителей ацетилена широко используются различные горючие газы, в том числе и водород [2].

Поэтому разработка и внедрение технологии газопламенного напыления с использованием водородно-кислородного пламени является актуальной задачей, требующей своего решения [3, 4].

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

Методы исследований

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



$$N_{cp} = \frac{N_{общ}}{S},$$

где $N_{общ}$ – общее число пор на контролируемой поверхности;

S – площадь контролируемой поверхности, см².

Эта методика снижает трудоемкость измерения пористости и имеет более высокую точность. Пористость, рассчитанная линейным методом, близка к значению общей пористости, полученной методом гидростатического взвешивания.

Результаты исследований

Подготовленные шлифы подвергали исследованию макро- и микроструктуры основных зон. В процессе металлографического анализа проводили визуальный осмотр и фотографирование поверхностей и их отдельных участков. Общий вид напыленной поверхности показан на рис. 2.

При изучении микроструктуры напыленной поверхности замечено, что напыляемый и основной слой образуют между собой прочное соединение. На микрофотографии видно, что на границе раздела соединение зерен плотное, дефектов не наблюдается. Граница раздела металлов просматривается четко, что является характерным при соединении металлов с различной структурой и химическим составом.

Изучение поверхностей и их отдельных фрагментов позволяет сделать заключение о хорошей прочности сцепления, как по всему периметру напыляемой зоны, так и его участков. Из рисунков видно, что в светлом слое (зона напыленного порошка) имеются темные пятна небольшой величины, разбросанные хаотично. Это пустые пространства, образовавшиеся при испарении газов во время оплавления, шлаковые

Рис. 1. Общий вид образцов для исследования покрытий

изготовления шлифов применяли образцы с нанесенными покрытиями газопламенным напылением с последующим оплавлением с использованием различных горючих газов (по составу). Микрошлифы использовали при анализе структуры напыленного слоя и исследовании пористости покрытия. В качестве образцов применяли образцы из стали 15ХГН2ТА с нанесенными на них покрытиями толщиной 0,6 мм (рис. 1).

Исследование микроструктуры покрытия проводили на металлографическом микроскопе "Неофот-21" при увеличении $\times 600$, сканирующем электронном микроскопе НІТАСНІ 1000 М инновационного центра ФГОУ ВПО "Орел ГАУ" и сканирующем электронном микроскопе исследовательского центра АО АВТОВАЗ при увеличении $\times 2000$. Часть микрошлифов фотографировали с помощью встроенного в микроскоп фотоаппарата.

Наличие пор и трещин в покрытии определяли при отраженном свете под микроскопом. Для точного подсчета пор и трещин применяли большое увеличение. С поверхностей снимали изображения пористости покрытий, при этом на снимке нумеровалась каждая пора. Среднее число пор (N_{cp}) вычисляли по формуле:

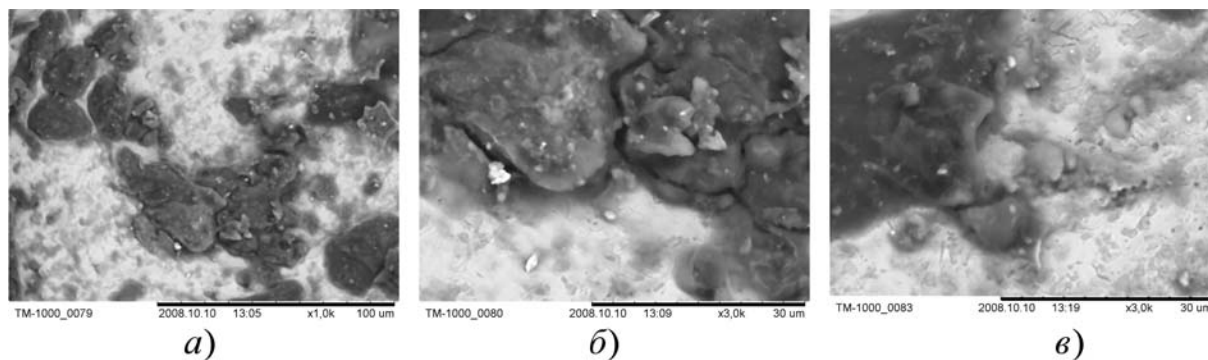


Рис. 2. Общий вид поверхности, напыленной газопламенным методом порошковых материалов с использованием водородно-кислородного пламени, покрытие – порошок ПР–НХ17С4Р4

включения и поры. Структура напыленного и оплавленного металла сложна и представляет собой твердый раствор на основе никеля, многокомпонентной эвтектики боридов, карбидов и силицидов. При сплавлении получены мелкокристаллические покрытия – сложный материал, состоящий из сильно деформированных напыленных частиц, соединенных между собой по контактными поверхностям сварными участками. Сварные участки не заполняют всю площадь контакта (или контактной поверхности) между частицами и поэтому прочность и плотность напыленных покрытий ниже прочности и плотности материала покрытия в контактном состоянии. Прочность самих сварных участков зависит от количества очагов схватывания, образующихся на площади в период удара, деформации и затвердевания частицы и определяется развитием химических элементов материала в контакте.

В покрытии можно выделить структурные элементы, которые отражают процессы его формирования и разделяются границами раздела с определенными свойствами. Граница раздела между покрытием и основой определяет прочность сцепления между ними. Свойства самого покрытия обуславливаются прочностью сцепления частиц в нем. Граница раздела между слоями (межслойная граница), возникает из-за различной длительности выдержки между нанесением частиц в слое и между слоями. За период выдержки межслойного нанесения, поверхность ранее нанесенного покрытия загрязняется, окисляется и контактные процессы между ней и напыленными частицами затрудняются, что и является причиной возникновения границы. Строение отдельных элементов и всего покрытия в целом хорошо видно на микрошлифе, полученном после газопламенного покрытия.

Металлографический анализ дает представление о механизме образования соединения металлов. Для оценки качества напыленных покрытий проводят их микроструктурные исследования. Оценка качества осуществляется путем сравнения микроструктуры покрытия с эталонной структурой в поперечном сечении. В околошовной зоне образуются локальные участки напыленного слоя, внедрившиеся в виде прожилок в основной металл. В исследованиях П.С. Лившица отмечается, что получению подобной структуры способствует разница в температурах плавления наплавочного и основного металлов. Покрытия из самофлюсующихся сплавов, напыленные газопламенным методом, после напыления имеют пористость, которая доходит до 25 %. После проплавления в структуре часть пор исчезает (рис. 3), структура ста-

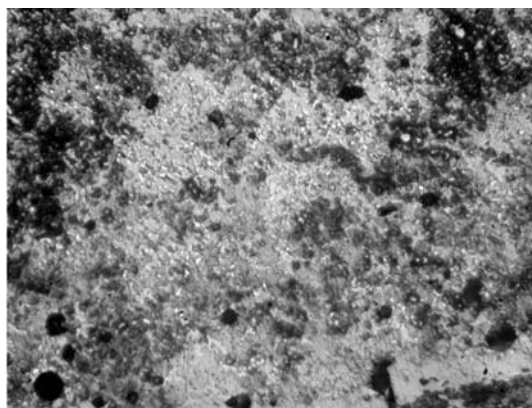


Рис. 3. Контроль пористости покрытия ($\times 600$)

новится плотной и происходит хорошее сплавление с основной. Структура покрытия из напыленного порошка ПР–НХ17С3Р4 после проплавления представляет собой в основном твердый раствор никеля с хромом, в котором образовались сложные эвтектические структуры. Произошло соединение бора и углерода с хромом, что привело к образованию карбидов и боридов хрома. В структуре эти соединения рассеяны в виде кристаллов, что является основной причиной высокой износостойкости такого покрытия. Сплав никеля с хромом придает покрытию стойкость к окислению, изменение химического состава покрытия по высоте влияет на изменение его механических свойств. Повышенная концентрация карбида хрома в верхней части придает ему высокую относительную износостойкость. В нижней зоне, обедненной легирующими элементами, структурообразование происходит по мартенситной кинетике, что обеспечивает более высокую твердость, но снижает относительную износостойкость на 30...35 %.

Пористость оплавленного покрытия составляет 1 %, что вполне допустимо при эксплуатации детали. При неполном проплавлении покрытия это строение сохраняется. Изменение температуры оплавления заметно отражается на структуре и на свойствах покрытия. Наилучшие свойства обеспечивает однородная по сечению структура с мелкодисперсными выделениями упрочняющей фазы.

Изменение химического состава покрытия по высоте влияет на твердость, поэтому в зоне, обедненной легирующими элементами, структурообразование произошло по мартенситной кинетике, что обеспечило более высокую твердость.

Как видно из рис. 4, структура покрытий, полученных при различных горючих газах, практически

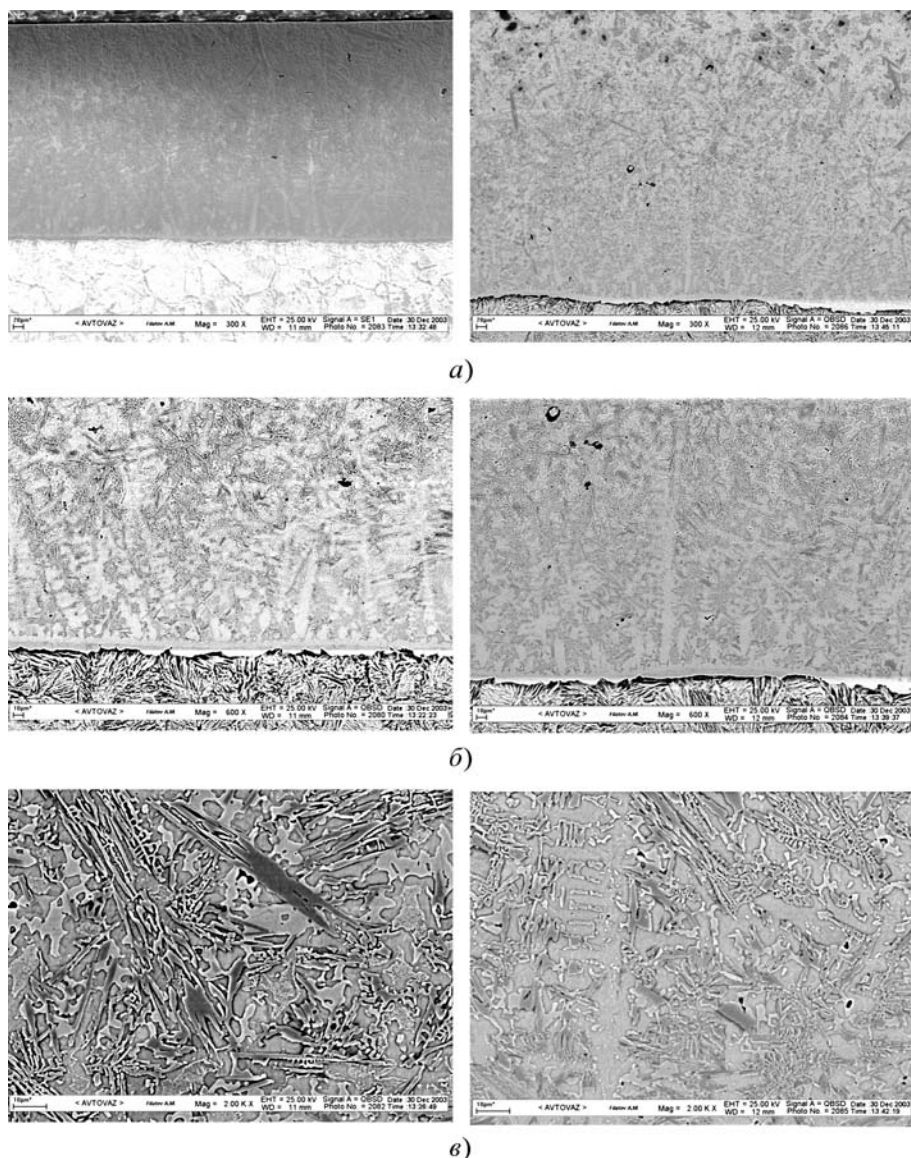


Рис. 4. Микроструктура поверхности, напыленной с использованием пламени различных горючих газов:

a – ацетилено-кислородного пламени; *б* – водородно-кислородного пламени

одинакова. Отличие состоит в количестве пор в поверхностных слоях.

Выводы

1. Использование водородно-кислородной смеси с добавкой пропан-бутана для газопламенного напыления дает возможность при напылении получать высококачественный напыленный слой.

2. Изучение поверхностей и их отдельных фрагментов позволяет сделать заключение о хорошей прочности сцепления по всей границе раздела покрытия и основы.

3. Структура покрытия из напыленного порошка ПР–НХ17С3Р4 после проплавления представляет собой в основном твердый раствор никеля с хромом, в котором образовались сложные эвтектические структуры. Произошло соединение бора и углерода с хромом, что привело к образованию карбидов и боридов хрома. В структуре эти соединения рассеяны в виде кристаллов, что является основной причиной высокой износостойкости такого покрытия. Сплав никеля с хромом придает покрытию стойкость к окислению, изменение химического состава покрытия по высоте влияет на изменение его механических свойств.

4. Покрытие из самофлюсующихся сплавов, напыленные газопламенным методом, после напыления имеют пористость, которая достигает до 25 %. После проплавления в структуре часть пор исчезает, структура становится плотной и происходит хорошее сплавление с основой. Пористость оплавленного покрытия составляет 1 %, что вполне допустимо при эксплуатации детали. Структура покрытий, полученных при различных горючих газах практически одинакова. Отличие в количестве пор в поверхностных слоях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Хромов В.Н., Барабаш В.В., Верцов В.В., Корнев В.Н. Газотермическое напыление покрытий с использованием водородно-кислородной смеси // Инженерия поверхности и реновация изделий: Материалы 2-й Международной научно-технической конференции, 28–30 мая 2002 г., г. Ялта. Киев: АТМ Украины, 2002. 260 с., С. 217–220.

2. Хромов В.Н., Дегтярев М.Г., Семешин А.Л., Барабаш В.В., Родичев А.Ю., Корнев В.Н., Зайцев С.А., Блинищев Р.Ю., Юрасов С.М., Гончаренко В.В. Упрочнение и восстановление деталей при производстве и ремонте машин // Научные проблемы и перспективы развития ремонта, обслуживания машин и восстановления деталей: Мате-

риалы международной научно-технической конференции, М.: ГНУ ГОСНИТИ, 2003. 156 с., С. 107–115.

3. Хромов В.Н., Мартынов А.Ф., Родичев А.Ю., Барабаш В.В., Верцов В.В., Коренев В.Н. Анализ износного состояния деталей автомобиля КамАЗ и их восстановление газопламенным напылением // Известия ОрелГТУ. Серия "Строительство. Транспорт". 2004. № 1–2. 120 с., С. 115–120.

4. Хромов В.Н., Семешин А.Л., Величкин И.И., Анненков В.В., Родичев А.Ю., Верцов В.В., Барабаш В.В., Верцов В.Г., Коровин А.Я., Абашев Н.Г., Коренев В.Н. Разработка и внедрение технологии восстановления и упрочнения деталей газотермическими покрытиями и упругопластическим деформированием на МП "Орелэлектротранс" // Отчет о НИР. Орел: ОрелГАУ № Г.Р. не имеет, 2001.

Внимание!

В последнее время участились случаи контрафактно изданных журналов нашего издательства с нарушением технических стандартов полиграфии.

Нередко покупателями некачественных изданий становятся бюджетные организации, заключившие договор с недобросовестными поставщиками в результате тендера.

ООО "Издательство Машиностроение" обладает исключительными правами на выпуск и реализацию своих периодических изданий, поэтому для оформления подписки у нас не требуется участие в тендерах. Издательство предоставляет все документы, которые необходимы государственным учреждениям.

Издательство "Машиностроение" предоставляет журналы по минимальной отпускной цене.

Постоянным подписчикам предоставляет скидку – 3 %.

Ежемесячная отправка заказной бандеролью осуществляется за счет издательства.

Приглашаем Вас оформить подписку на журналы издательства "Машиностроение"

в отделе продаж, маркетинга и рекламы:

107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4

Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98.

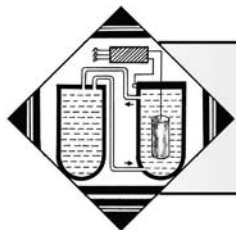
Факс (499) 269-48-97.

e-mail: realiz@mashin.ru

www.mashin.ru

Обращайте внимание на качество журналов, получаемых по подписке!

Издательство не несет ответственности за низкое качество журналов, приобретенных у недобросовестных поставщиков, и не принимает их к обмену.



Влияние параметров топливоподачи в дизелях на выбор упрочняющей обработки зубчатых колес механизма привода агрегатов

Представлено обоснование выбора вида химико-термической обработки зубчатых колес механизма привода топливных насосов высокого давления дизельных двигателей на основании анализа условий работы колес и действующих в зацеплении напряжений. Показано, что существующая тенденция повышения давления впрыска топлива приводит к существенному росту контактных и изгибных напряжений в зубчатых зацеплениях. Наиболее предпочтительным видом химико-термической обработки для зубчатых колес механизма привода, работающих в условиях повышенных нагрузок, является нитроцементация.

Ключевые слова: давление впрыска, механизм привода, зубчатые колеса, контактные и изгибные напряжения, химико-термическая обработка, азотирование, нитроцементация.

The article presents basis for choice of type of chemical-thermal treatment for gearing drive of internal combustion engines with high pressure of fuel injection. The article shows, that raising of fuel injection pressure brings to changing of conditions of gear's exploitation, to essential increase of contact and curve strains. The article contains recommendation for choice of chemical-thermal treatment. The most preferable kind of treatment for gears, which work in hard conditions and higher strains, is carbonitriding.

Keywords: fuel injection pressure, gearing drive, contact strains, curve strains, chemical-thermal treatment, nitriding, carbonitriding.

Совершенствование изделий машиностроения, в том числе и *двигателей внутреннего сгорания (ДВС)*, направлено на повышение их надежности, экономичности и улучшение экологических показателей. Экономические и экологические показатели ДВС обеспечиваются совершенствованием механизмов и систем и, в первую очередь, системы топливоподачи, так как качественное распыливание топлива является основным условием его полного и эффективного сгорания в цилиндре.

В настоящее время в двигателях различных размеров и назначения наибольшее распространение получили топливоподающие системы с автоматическим электронным регулированием. Электронное управление системой топливоподачи позволяет наиболее точно дозировать топливо и обеспечивает более быстрое реагирование на изменения нагрузки и условий работы двигателя.

Наиболее проработанными, совершенными и распространенными на современных дизельных двигателях являются:

- аккумуляторные топливные системы типа *Common Rail (CRS)*.

- системы с насос-форсунками (UIS и UPS).

Указанные топливные системы используются в дизельных двигателях как грузовых, так и легковых автомобилей, морских и речных судов, тепловозов, стационарных установок.

Системы с аккумулятором делают возможным объединение системы впрыскивания топлива с различными дистанционно выполняемыми функциями и в то же время позволяют повышать точность управления процессом сгорания топлива. Отличительная характеристика системы с общим ресивером заключается в разделении узла, создающего давление, и узла впрыскивания [1].

Системы насос-форсунок, напротив, объединяют узлы впрыскивания и создания давления в одном, что позволяет избежать влияния волновых процессов в длинных трубопроводах системы топливоподачи.

Результаты многочисленных исследований [2–4] показывают, что для улучшения процесса сгорания требуется увеличение давления впрыска топлива до 120...150 МПа, а в некоторых системах до 200 МПа. Увеличение давлений впрыска неизбежно приводит к изменению условий работы деталей механизма при-

Таблица 1

Технико-экономические характеристики двигателей ЯМЗ

Марка двигателя	Литровая мощность, кВт/л	Давление впрыска топлива, МПа	Крутящий момент $M_{e_{max}}$, Н·м	Среднее эффективное давление, МПа	Удельный эффективный расход топлива $g_{e_{ном}}$, г/(кВт·ч)	Соответствие экологическим нормативам
ЯМЗ-238	11,84	62,0	883	0,68	234	Euro-0
ЯМЗ-8424	20,03	92,1	1860	1,16	225	Euro-1
ЯМЗ-8481	14,92	80,6	1620	0,94	212	Euro-2
ЯМЗ-7511	19,78	135,3	1715	1,24	215	Euro-2
ЯМЗ-658	26,72	139,9	1870	1,68	218	Euro-3

вода топливного насоса высокого давления, увеличению нагрузок, действующих в зубчатых зацеплениях, снижению ресурса зубчатых колес и может послужить причиной выхода механизма привода из строя.

Надежность зубчатых колес может быть повышена путем упрочнения поверхностного слоя зубьев, при этом вид термической или химико-термической обработки должен назначаться с учетом условий работы зубчатых колес и действующих в зацеплениях напряжений.

Целью проведенных исследований являлась оценка влияния повышения давления впрыска на условия работы зубчатых колес механизма привода топливного насоса высокого давления и обоснование выбора вида химико-термической обработки. В качестве объекта исследований был выбран механизм привода наиболее современных отечественных дизелей семейства ЯМЗ, выпускаемых Ярославским и Тутаевским моторными заводами.

Значения давления впрыска для различных марок двигателей приведены в табл. 1. Крутящий момент на валу топливного насоса высокого давления, необходимый для создания требуемого давления впрыска с учетом жесткости пружины, рассчитывали по методике, предложенной в работе [5].

Расчеты проводили для существующих и перспективных двигателей, имеющих различные давления впрыска.

Результаты расчетов, представленные на рис. 1, свидетельствуют о том, что повышение давления впрыска, которое зависит от угла поворота коленчатого вала двигателя, приводит к возрастанию максимальных значений момента сопротивлений на кулачковом валу топливного насоса в 3–4 раза.

На основании кинематической схемы механизма привода топливного насоса (рис. 2) можно считать, что на установившемся режиме работы момент со-

противления на валу насоса равен крутящему моменту на зубчатом колесе привода, Н·м

$$M_{кул} = M_{кр} \cdot$$

Значение крутящего момента позволяет определить окружную (тангенциальную) силу F_t (Н), действующую на зубья колеса

$$F_t = \frac{2M_{кр}}{d},$$

где d – делительный диаметр зубчатого колеса, м.

Увеличение момента сопротивления на кулачковом валу топливного насоса высокого давления неизбежно приводит к возрастанию крутящего момента $M_{кр}$ и при неизменных размерах зубчатого колеса – к росту окружной силы F_t .

Шестерни механизма привода агрегатов двигателей семейства ЯМЗ-840 изготавливаются из сталей 15ХФ или 40ХФА. Механические свойства указанных сталей приведены в табл. 2 [5].

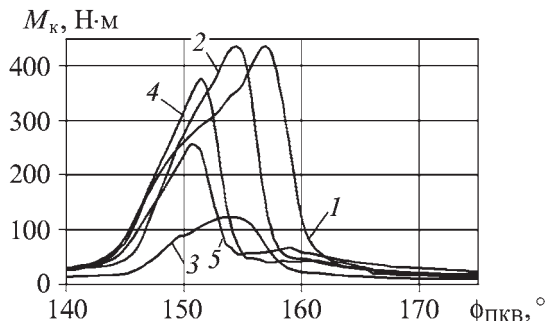


Рис. 1. Диаграммы изменения момента сопротивления в зависимости от угла поворота кулачкового вала ТНВД для различных моделей двигателей:

1 – ЯМЗ-658; 2 – ЯМЗ-7511; 3 – ЯМЗ-238; 4 – ЯМЗ-8424; 5 – ЯМЗ-8481

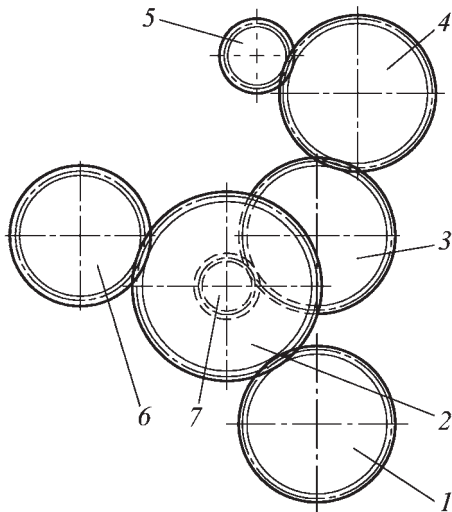


Рис. 2. Схема механизма привода агрегатов двигателей семейства ЯМЗ-840:

1 – ведущая шестерня коленчатого вала; 2 – промежуточная шестерня привода распределительного вала с числом зубьев $z = 60$; 3 – шестерня распределительного вала; 4 – шестерня привода ТНВД; 5 – шестерня пневмокомпрессора; 6 – шестерня привода насоса гидроусилителя рулевого управления (устанавливается только на автомобильные модификации двигателей); 7 – промежуточная шестерня привода распределительного вала с числом зубьев $z = 30$

В существующем технологическом процессе колеса подвергаются химико-термической обработке – азотированию на глубину 0,25...0,40 мм, что обеспечивает твердость поверхности 800...1200 НВ. Механические свойства в результате азотирования улучшаются на 30...40 % [6]. Пределы выносливости и допускаемые напряжения для зубчатых колес представлены в табл. 3.

Однако в ряде источников приводятся другие значения пределов выносливости. Например, в работе [7] рекомендуется принимать предел прочности равным 880 МПа, а в источнике [8] непосредственно для зубчатых колес предел выносливости принимается равным 800 МПа. С учетом этих данных необходимо снижать допускаемые контактные и изгибные напряжения. Следовательно, при неизменных геометриче-

Таблица 2

Механические свойства сталей

Сталь	Предел прочности σ_B , МПа	Предел текучести σ_T , МПа	Предел выносливости σ_{-1} , МПа
15ХФ	650...850	400...600	310...380
40ХФА	1000...1450	800...1300	46...600

Таблица 3

Пределы выносливости и допускаемые напряжения для зубчатых колес

Вид упрочняющей обработки	Предел выносливости, МПа, по напряжениям		Допускаемые напряжения, МПа	
	контактным $\sigma_{H\lim}^0$	изгибным $\sigma_{F\lim}^0$	контактные $[\sigma_H]$	изгибные $[\sigma_F]$
Азотирование	1050	804	875	473

ских параметрах зубчатых колес придется снижать передаваемые моменты.

С увеличением нагрузок в приводе топливного насоса возрастают контактные и изгибные напряжения в зубьях колес привода агрегатов топливного насоса. Действующие в зацеплении напряжения определялись по формулам, рекомендованным в работе [7].

Контактные напряжения, МПа:

$$\sigma_H = Z_H Z_M Z_\varepsilon \sqrt{\frac{F_t K_{H\alpha} K_{H\beta} K_{H\gamma} u \pm 1}{b_{\omega} d_{\omega 1} u}} \leq [\sigma_H],$$

где $Z_H = \sqrt{2 \cos\beta / \sin 2\alpha_{\omega}}$ – коэффициент, учитывающий форму сопряженных поверхностей; $Z_H = 1,76$ – для прямозубых колес;

$$Z_M = \sqrt{\frac{2E_1 E_2}{\pi[E_1(1-\nu_2^2) + E_2(1-\nu_1^2)]}}$$
 – коэффициент,

учитывающий механические свойства материалов колес (модули упругости E_1 и E_2 и коэффициенты Пуассона ν_1 и ν_2) для стальных колес $Z_M = 275$;

Z_ε – коэффициент, учитывающий суммарную длину контактных линий для прямозубых колес – $Z_\varepsilon = \sqrt{(4 - \varepsilon_a) / 3}$; ε_a – коэффициент торцового перекрытия;

$$\varepsilon_a = \left(1,88 - 3,2 \left[\frac{1}{z_1} + \frac{1}{z_2} \right] \right) \cos\beta;$$

F_t – окружная сила на колесе, Н;

u – передаточное отношение зубчатой пары;

$d_{\omega 1}$ – начальный диаметр (ведущего) колеса, мм;

b_{ω} – ширина колеса, мм;

$K_{H\alpha}$ – коэффициент нагрузки;

$K_{H\beta}$ – коэффициент концентрации нагрузки;

$K_{H\gamma}$ – коэффициент динамической нагрузки;

$[\sigma_H]$ – допускаемое контактное напряжение, МПа.

Допускаемые контактные напряжения, МПа:

$$[\sigma_H] = \frac{\sigma_{H\lim}}{S_H} Z_R Z_\gamma K_L K_{XH},$$

где $\sigma_{H\lim}$ – предел контактной выносливости поверхности зубьев, МПа;

S_H – коэффициент безопасности;
 S_R – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости;
 Z_9 – коэффициент, учитывающий влияние окружной скорости;
 K_L – коэффициент, учитывающий влияние смазки;
 $K_{ХН}$ – коэффициент, учитывающий влияние размеров.

Напряжения при изгибе определяются по формуле, МПа:

$$\sigma_F = Y_F \frac{F_t K_{F\beta} K_{F9}}{b_w m_n} \leq [\sigma_F],$$

где Y_F – коэффициент формы зуба;
 $K_{F\beta}$ – коэффициент концентрации напряжений;
 K_{F9} – коэффициент динамической нагрузки;
 m_n – нормальный модуль зуба, мм;
 $[\sigma_F]$ – допускаемое напряжение изгиба, МПа.
 Допускаемые напряжения изгиба, МПа:

$$[\sigma_F] = \frac{\sigma_{F\lim}}{S_F} Y_R Y_S K_{XF},$$

где $\sigma_{F\lim}$ – предел изгибной выносливости зубьев, соответствующий заданному числу циклов нагружений, МПа;

S_F – коэффициент безопасности;
 Y_R – коэффициент, учитывающий влияние шероховатости поверхности;
 Y_S – коэффициент, учитывающий влияние абсолютных размеров зубьев;
 K_{XF} – коэффициент, учитывающий влияние абсолютных размеров колес.

Результаты произведенных расчетов представлены в виде графических зависимостей контактных и изгибных напряжений от максимального давления впрыска (момента сопротивления на кулачковом валу ТНВД), на которые нанесены допускаемые напряжения при различных видах химико-термической обработки.

Полученные результаты свидетельствуют о том, что зубчатые колеса 2, 3, 4 испытывают наибольшие контактные и изгибные напряжения.

На основании полученных зависимостей и содержания углерода в стали можно выбрать требуемый вид упрочняющей обработки зубчатых колес.

С учетом установленных для зубчатых колес коэффициентов безопасности (запасов прочности): $S_H = 1,2$, $S_F = 1,7$ следует установить максимально допустимые моменты сопротивления на валу топливного насоса и соответствующие им максимальные давления впрыска топлива (табл. 4).

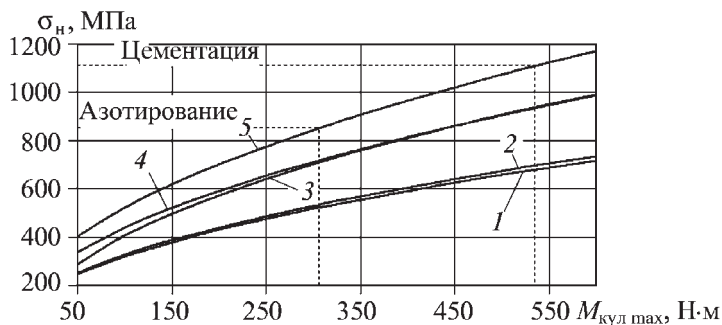


Рис. 3. Зависимость контактных напряжений σ_H в зубьях шестерен привода агрегатов от давления впрыска (момента сопротивления на кулачковом валу ТНВД) для деталей (см. рис. 2): 1 – поз. 2; 2 – поз. 1; 3 – поз. 4; 4 – поз. 3; 5 – поз. 7

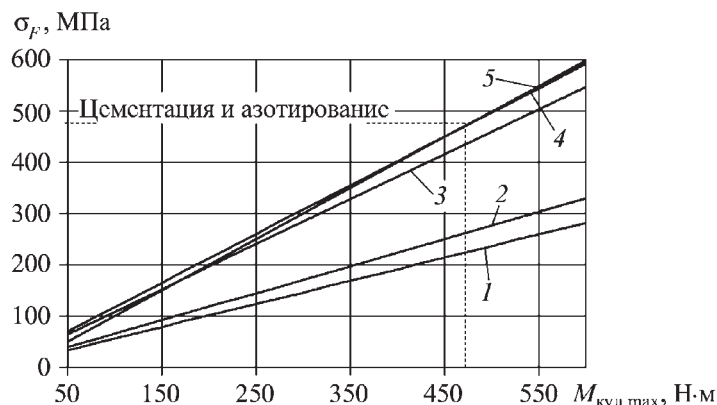


Рис. 4. Зависимость изгибных напряжений σ_F в зубьях шестерен привода агрегатов от давления впрыска (момента сопротивления на кулачковом валу ТНВД) для деталей (см. рис. 2): 1 – поз. 1; 2 – поз. 2; 3 – поз. 7; 4 – поз. 3; 5 – поз. 4

Анализ полученных результатов свидетельствует, что ресурсы по надежности и износостойкости азотированных зубчатых колес при превышении давления впрыска более 100 МПа практически исчерпаны. Это подтверждается имеющими место в эксплуатации случаями характерных износов зубчатых колес. Прогнозируемый дальнейший рост максимального давления впрыска топлива для двигателей семейства ЯМЗ требует применения химико-термической обработки зубчатых колес, обеспечивающей их лучшие эксплуатационные свойства.

Для упрочнения зубчатых колес механизма привод двигателей семейства ЯМЗ с модернизированной системой топливоподачи и повышенной энергетикой впрыска могут быть использованы цементация и нитроцементация высоколегированных сталей, пригодных для изготовления колес механизма привода наиболее форсированных двигателей. Эти методы обработки обеспечивают высокую твердость и износостойкость.

Таблица 4

Предельно допустимые значения момента сопротивления на валу топливного насоса и максимального давления впрыска

Вид упрочняющей обработки	Допустимый момент сопротивления $M_{кул}$, Н·м		Допустимое максимальное давление впрыска $p_{впр}$, МПа	
	по изгибным напряжениям	по контактными напряжениям	по изгибным напряжениям	по контактными напряжениям
Азотирование	470,6	311,0	100...105	85...87
Цементация	468,5	535,4		108...110

стойкость поверхности и вязкую сердцевину, хорошо воспринимающую ударные нагрузки, характерные для условий работы зубчатых колес.

Типовой технологический процесс цементации и нитроцементации включает следующие операции:

- мойка и сушка деталей перед насыщением;
- насыщение деталей углеродом или азотом (при цементации или нитроцементации соответственно);
- закалка деталей после насыщения;
- мойка и сушка деталей;
- отпуск деталей.

Распространение такой схемы обработки объясняется тем, что в таких сталях, как 18ХГТ, 25ХГТ, 30ХГТ, 15ХГН2ТА в процессе насыщения не происходит значительного роста зерна, а высокие свойства зубчатых колес обеспечиваются без повторной перекристаллизации. Максимальная прочность зубчатых колес из сталей 12Х2Н4А, 20Х2Н4А, 18Х2Н4МА достигается при использовании более сложных схем химико-термической обработки:

1. Цементация – охлаждение до температуры цеха (подстуживание) – закалка – отпуск.
2. Цементация – повторный нагрев – закалка – отпуск.
3. Цементация – высокий отпуск – повторный нагрев – закалка – отпуск.
4. Цементация – изотермическая выдержка – нагрев под закалку – отпуск.

Механические свойства сталей при различных способах предлагаемой химико-термической обработки приведены в табл. 5 [9].

Твердость поверхности, получаемой после цементации и нитроцементации, составляет 58...62 HRC, твердость сердцевины – 32...40 HRC.

Область применения нитроцементации постоянно расширяется, например, в автомобилестроении 40...45 % всех деталей, подвергаемых химико-термической обработке, упрочняется нитроцементацией [9]. Основные достоинства нитроцементации – более

низкая температура насыщения, меньшая продолжительность процесса, более высокая прочность деталей.

Зубчатые колеса, подвергнутые цементации и нитроцементации имеют наибольшую по сравнению с другими видами химико-термической обработки контактную выносливость, которая определяется по твердости поверхности и сердцевины [10].

Таким образом, для зубчатых колес механизма привода агрегатов перспективных двигателей семей-

Таблица 5

Механические свойства сталей после упрочнения

Химико-термическая обработка	Допускаемое усталостное напряжение, $[\sigma_{-1}]$, МПа	Допускаемое напряжение изгиба, $[\sigma_F]$, МПа	
Газовая цементация в эндотермической атмосфере при 930 °С при углеродном потенциале:	постоянном	700...850	1550...2000
	ступенчато понижающемся	630...730	1550...2000
	ступенчато повышающемся	820...900	1850...2000
Нитроцементация в эндотермической атмосфере при 850 °С при углеродном потенциале:	ступенчато понижающемся	900...950	1900...2100
	ступенчато повышающемся	970...1080	2170...2460

ства ЯМЗ, с учетом повышения энергетики впрыска топлива и связанными с этим изменениями условий работы деталей, следует рекомендовать использовать упрочнение нитроцементацией при ступенчато повышающемся углеродном потенциале.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Автомобильный** справочник: пер. с англ. 2-е изд., переработанное и дополненное. М.: ЗАО "КЖИ "За рулем", 2004. 992 с.
2. **Марков В.А., Баширов Р.М., Габитов И.И.** Токсичность отработавших газов дизелей. М.: Издательство МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. 376 с.
3. **Марков В.А., Кислов С.И., Хватов В.А.** Характеристики топливоподачи транспортных дизелей. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2000. 296 с.
4. **Грехов Л.В., Ивашенко Н.А., Марков В.А.** Топливная аппаратура и системы управления дизелей. Учебник для вузов. М.: Легион—Автодата, 2004. 334 с.

5. **Колчин А.И., Демидов В.П.** Расчет автомобильных и тракторных двигателей. М.: Высш. шк., 2002. 496 с.

6. **Адашкин А.М., Седов Ю.Е., Онегина А.К., Климов В.Н.** Материаловедение / под ред. Ю.М. Соломенцева. М.: Высш. шк., 2005. 456 с.

7. **Иосилевич Г.Б.** Детали машин: Учебник для вузов. М.: Машиностроение, 1988. 368 с.

8. **Производство** зубчатых колес газотурбинных двигателей: Производственно-практическое издание / Ю.С. Елисеев, В.В. Крымов, И.П. Нежурин и др.; под ред. Ю.С. Елисеева. М.: Высшая школа, 2001. 493 с.

9. **Дашенко А.И., Гладков В.И., Елхов П.Е. и др.** Технология двигателестроения. М.: Изд. МГТУ "МАМИ", 2001. 496 с.

10. **Машиностроение.** Энциклопедия. Ред. совет К.В. Фролов и др. М.: Машиностроение. Колесные и гусеничные машины. Т. IV-15 / В.Ф. Платонов, В.С. Азаев, Е.Б. Александров и др.; под общ. ред. В.Ф. Платонова. 1997. 688 с.



ОСНОВЫ ТРИБОЛОГИИ И ТРИБОТЕХНИКИ:

учебное пособие. Н.С. Пенкин, А.Н. Пенкин, В.М. Сербин

2008. — 2006 с.: ил. ISBN: 978-5-217-03437-6 Цена 264 р. с НДС

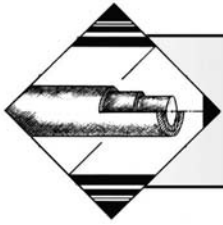
В учебном пособии, в соответствии с программой дисциплины "Основы трибологии", разработанной специалистами Ассоциации инженеров-трибологов России, изложены основные положения контактного взаимодействия твердых тел, свойства и топография их поверхностей, природа и виды внешнего трения, влияние различных факторов на трение. Описаны различные виды изнашивания, роль смазки, температуры, фрикционности и антифрикционности материалов для деталей сопряжений, основные способы повышения износостойкости материалов и деталей машин. Приведены расчетные методы оценки интенсивности изнашивания наиболее часто встречающихся трибосопряжений. Рассматриваются основные положения моделирования трибологических процессов, методы испытания на трение и изнашивание, а также роль трибологии в решении социально-экономических проблем, обусловленных трибологическими источниками: потери от недовыпуска продукции, потери всех видов ресурсов, ухудшение экологичности, энергетической эффективности различных видов транспорта и др.

Пособие рассчитано на студентов технических специальностей, изучающих эту дисциплину или ее разделы в других дисциплинах, аспирантов, научных и инженерно-технических специалистов в области трения, износа и смазки в машинах.

Приобрести книгу по цене издателя можно, прислав заявку в отдел продаж, маркетинга и рекламы: по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98

и на сайте WWW.MASHIN.RU



ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

УДК 669.14:621.785.52

М.А. Барабаш, Д.В. Колмыков, А.Н. Гончаров,
В.И. Колмыков (ГСХА, г. Курск)

Повышение износостойкости восстановленных деталей цементацией при ремонте машин

Представлены результаты исследования процессов электроосаждения железохромистых покрытий и их цементации в высокоактивном пастообразном карбюризаторе. Показана высокая эффективность технологии восстановления изношенных деталей машин цементованными железохромистыми покрытиями.

Ключевые слова: восстановление, цементация, электролиз, железохромистые покрытия, поверхностное упрочнение металлов.

This article states the result of researches in processes of electroplating of iron-chromium surfaces and their cementation in highly active paste-like carburizer. It also shows the efficiency of technology of restoration of machine component's deterioration by cemented iron-chromium surfaces.

Keywords: restoration, iron-chromium surfaces, cementation, surface hardening of metals.

Эффективность работы машин во многом зависит от своевременности и качества проведения их технического обслуживания и ремонта. При этом на проведение ремонтно-обслуживающих работ расходуется большое количество дорогостоящих запчастей, что обуславливает высокую стоимость ремонта и даже его экономическую нецелесообразность. Большим резервом обеспечения техники запасными частями и снижения себестоимости ремонта является использование восстановленных деталей. Восстановление изношенных деталей значительно дешевле изготовления новых, а использование прогрессивных технологий восстановления и последующего упрочнения может обеспечить послеремонтный ресурс восстановленных деталей не ниже ресурса новых деталей, а в некоторых случаях даже выше [1].

Одним из наиболее распространенных методов восстановления стальных деталей является электролитическое осаждение железа на изношенные поверхности (железнение). Процесс железнения отличается высокой производительностью, экономичностью и технологической простотой, он позволяет компенсировать износы деталей от 0,1 до 1,5 мм, а иногда и более.

Однако во многих случаях детали с электроосажденными железными покрытиями по износостойко-

сти и другим эксплуатационным свойствам уступают новым деталям, которые при изготовлении подвергаются упрочняющей обработке. Последнее обстоятельство ограничивает использование железнения в чистом виде, особенно в случаях восстановления тяжело нагруженных деталей современных машин повышенной мощности и производительности.

Известно, что повысить эксплуатационные свойства деталей с гальваническими покрытиями можно методами химико-термической обработки, в частности, хорошо известной и освоенной цементацией. Однако цементация нелегированного электролитического железа не обеспечивает повышенной твердости и других свойств, соответствующих свойствам новых деталей, которые, как правило, изготавливаются из легированных сталей. Поэтому для обеспечения возможности эффективного упрочнения восстановленных деталей целесообразно осаждать на их поверхности не чистое железо, а гальванические сплавы на железной основе, в частности, железохромистый сплав.

Хром является наиболее подходящим элементом для легирования цементуемой стали с целью получения в ее диффузионных слоях большого количества карбидной фазы. Он в наибольшей степени способствует усвоению углерода при цементации, образуя специальные карбиды типа $(Cr,Fe)_{23}C_6$ и $(Cr,Fe)_7C_3$, а

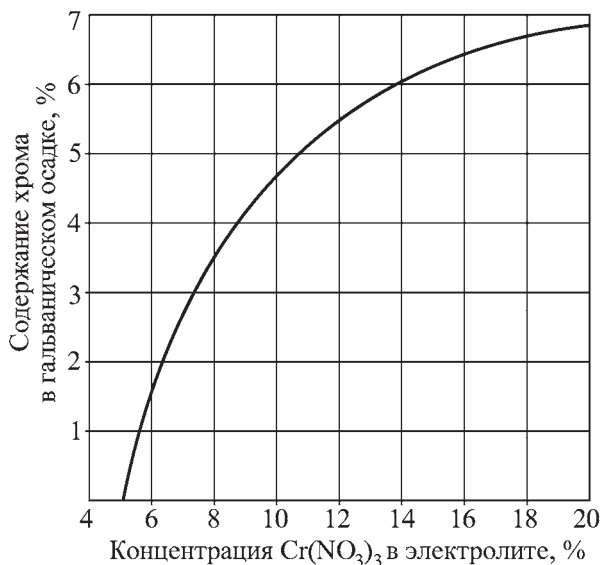


Рис. 1. Зависимость содержания хрома в гальваническом осадке от концентрации азотно-кислого хрома в электролите (концентрация $\text{FeSO}_4 - 300 \text{ кг/м}^3$), $\beta = 6$, $D_k = 40 \text{ А/дм}^2$

также стабилизирует цементит $(\text{Cr,Fe})_3\text{C}$, способствуя его росту в аустенитно-карбидной системе. Кроме того, значительная часть хрома, находящегося в стали, не участвует в карбидообразовании, а остается в растворе, способствуя его хорошей прокаливаемости.

Для получения железохромистых покрытий был использован электролит следующего состава (кг/м^3): сернокислое железо $\text{FeSO}_4 - 250...400$, нитрат хрома $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3 - 5...20$, сульфат натрия $\text{Na}_2\text{SO}_4 - 20...40$ [2]. Осаждение гальванического железохромистого покрытия из этого электролита проводили, используя асимметричный ток промышленной частоты, что способствовало значительному повышению скорости осаждения. При коэффициенте асимметрии (отношение величины катодного тока к анодному) $\beta = 6$ и плотности тока $D_k = 40...50 \text{ А/дм}^2$ скорость осаждения железохромистого сплава достигает $0,6 \text{ мм/ч}$.

Содержание хрома в электролитических осадках, как показывают наши исследования, в основном зависит от концентрации хромистой соли в электролите (рис. 1).

Максимальное содержание хрома в гальванических осадках, которое может быть получено при использовании электролита предлагаемого состава, достигает 7% , что позволяет, изменяя концентрацию $\text{Cr}(\text{NO}_3)_3$ в нем, воспроизвести степень легированности подавляющего большинства хромистых конструкционных сталей, используемых в машиностроении.

Анализ процессов карбидообразования и диффузии углерода в хромистых сталях показывает, что при насыщении таких сталей до высоких содержаний углерода, необходимых для образования в них большого количества карбидной фазы, обеспечивающей им высокую износостойкость, углеродный потенциал традиционных газовых и твердых карбюризаторов недостаточен. Науглероживающая среда, пригодная для этих целей, должна быть настолько активной, чтобы обеспечить приток углерода, достаточный для образования карбидов и для проникновения на большую глубину для эффективного упрочнения.

Такой науглероживающей средой, как показали наши исследования, является пастообразный карбюризатор на основе сажи, которая обладает очень высокой реакционной активностью благодаря мелкодисперсности и сильно развитой поверхности. Такой карбюризатор удобнее всего использовать в виде пасты, наносимой непосредственно на цементуемую поверхность. При этом реакции образования активных атомов углерода, которые тут же адсорбируются этой поверхностью и диффундируют в глубину изделия, протекают в непосредственной близости от насыщаемой поверхности. Расход компонентов карбюризатора при таком механизме насыщения минимальный, а насыщающая способность очень высокая.

Экспериментальное исследование науглероживающей способности пастообразных карбюризаторов различных составов показало, что наилучшие результаты по глубине и содержанию карбидов в железохромистых сплавах обеспечивает цементация в пастообразном карбюризаторе, состоящем из мелкодисперсной газовой сажи ДГ-100, углекислого бария BaCO_3 и поливинилацетатной эмульсии ПВА (в качестве пастообразователя) в соотношении $50:10:40$ (5 масс). В качестве газовой атмосферы, подаваемой в цементационную печь для обеспечения углеродного подпора, могут быть использованы продукты распада синтина или другой углеродсодержащий газ. Температура цементации — $900...920 \text{ }^\circ\text{C}$. Аналогичные результаты получаются, если цементацию изделий, покрытых пастой, проводить в цементационных контейнерах с твердым углеродсодержащим наполнителем (древесным углем, чугушной стружкой и др.). Это особенно удобно для ремонтного производства, так как позволяет использовать для цементационного нагрева любые термические устройства. Наконец, в цементующей пасте углекислый барий можно заменить более дешевым углекислым натрием (содой), однако при этом нельзя использовать повышенные темпера-

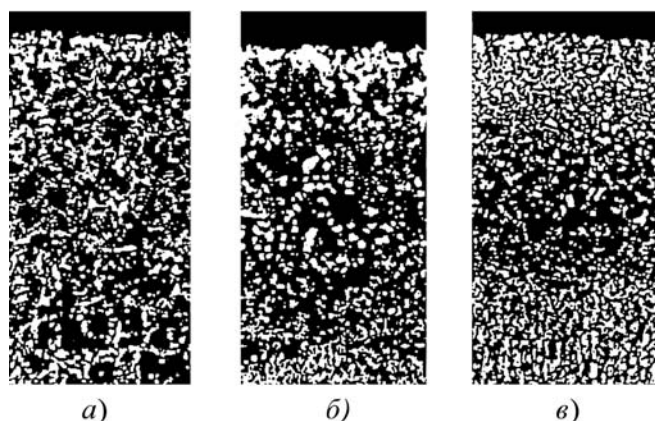


Рис. 2. Микроструктуры цементованных железохромистых покрытий с различным содержанием хрома ($\times 300$): а) – 0,95 %; б) – 1,51 %; в) – 3,07 %

туры цементации (выше 950 °С) во избежание окисления поверхности.

В результате цементации железохромистых гальванических осадков в карбонатно-сажевой пасте на их поверхности образуются диффузионные слои, насыщенные карбидами, количество которых зависит от содержания в покрытиях хрома (рис. 2). Карбидная фаза в цементованных железохромистых покрытиях, как показывают рентгеноструктурные исследования, представлена цементитом. Наиболее высокое содержание карбидной фазы в диффузионных слоях, как и наибольшая глубина этих слоев, получаются при цементации покрытий с содержанием хрома 1,5...2 %. Меньшее содержание хрома приводит к уменьшению количества карбидов в слое, большее содержание – к снижению глубины цементации. Повышение температуры цементации до 900...920 °С интенсифицирует процесс карбидообразования. Скорость цементации покрытия с двумя процентами хрома при температуре 900 °С составляет 0,18...0,20 мм/ч.

После закалки (с 880 °С в масле) и низкого отпуска цементованные железохромистые покрытия приобретают весьма высокую твердость, достигающую 66...68 HRC, что обуславливается наличием на поверхности покрытия большого количества карбидов и мартенситным превращением в нижележащих зонах.

Увеличение содержания карбидов в диффузионных слоях цементованных железохромистых покрытий приводит к интенсивному возрастанию их износостойкости, в том числе и при абразивном изнашивании, при котором цементованные покрытия практически неработоспособны (рис. 3).

С другой стороны, наличие в структуре цементованных покрытий большого количества хрупких кар-

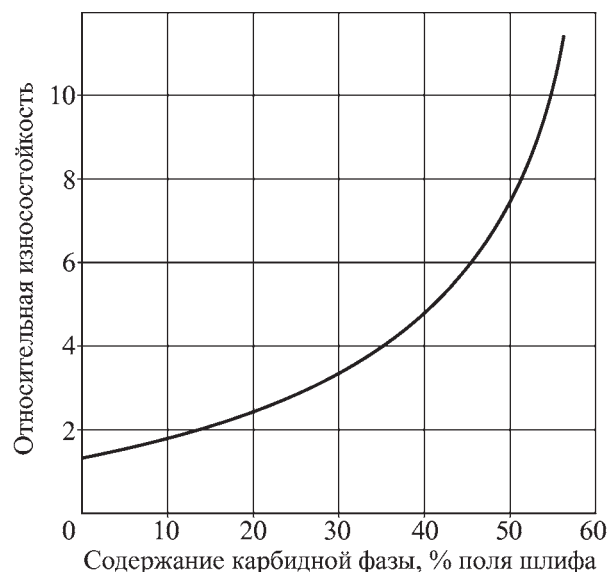


Рис. 3. Зависимость относительной износостойкости (эталон – закаленная сталь 40Х) цементованных железохромистых покрытий от содержания карбидов в их диффузионных слоях ($t_{\text{зак}} = 850$ °С, $t_{\text{отп}} = 150$ °С)

бидных включений предопределяет их невысокую ударную вязкость, хотя округлая форма карбидных частиц (по сравнению с острыми концентраторами напряжений) несколько смягчает их негативное действие. При содержании цементита в структуре до 50 % ударная вязкость цементованных покрытий вполне удовлетворительная, на уровне ударной вязкости закаленной на мартенсит высокоуглеродистой стали. При дальнейшем повышении содержания карбидов в структуре ударная вязкость резко падает и при ~ 70 % становится практически равной нулю.

Прочность сцепления гальванических железохромистых покрытий с основным металлом в результате цементации заметно увеличивается. Если в исходном состоянии при самой тщательной подготовке основы под осаждение и применении разгонного режима в начале электролиза прочность сцепления составляет примерно 230...250 МПа, то после цементации (900 °С, 6 ч) прочность сцепления уравнивается с прочностью основы, граница между покрытием и основой полностью размывается.

Цементация железохромистых гальванических покрытий коренным образом изменяет характер внутренних напряжений в этих покрытиях. В исходном состоянии (после электроосаждения) во всех покрытиях с различным содержанием хрома и разной толщины имеют место только растягивающие напряжения. Причем их уровень в некоторых случаях превы-

шает предел прочности покрытия (образуются трещины и расслоения). После цементации и закалки в железохромистых покрытиях возникают сжимающие напряжения, величина которых достигает — 200...400 МПа, в зависимости от режимов упрочняющей обработки. При этом наибольшие сжимающие напряжения возникают в относительно тонких слоях с небольшим количеством карбидов. Сжимающие напряжения обеспечивают восстановленным деталям высокий предел выносливости.

Разработанная технология восстановления и упрочнения деталей может быть применена для восстановления многих автомобильных деталей, в частности, ответственных деталей рулевого управления, ходовой части и деталей двигателей. Она была опробована в производственных условиях при восстановлении стержней впускных клапанов двигателей автомобилей ГАЗ-53А и ЗИЛ-130 и наконечников рулевых тяг автомобилей КамАЗ. Гальваническое наращивание производилось в электролите, содержащем 400 г/м³ FeSO₄, 17 кг/м³ Cr(NO₃)₃ и 20 кг/м³ Na₂SO₄. Для электроосаждения использовали гальваническую ванну с водяным охлаждением, которая позволяла поддерживать температуру электролита на уровне 20 °С. Электролиз вели при коэффициенте асимметрии $\beta = 6$ и плотности катодного тока $D_k = 40$ А/дм² в течение 1 ч. Содержание хрома в покрытии составляло ~ 2 % при толщине покрытия 0,4...0,5 мм.

После наращивания металла детали подвергали механической обработке для придания им необходимых размеров и формы. При этом остаточная толщина обработанного покрытия составляла около 0,2 мм.

Подготовленные детали покрывали цементующей обмазкой (путем погружения в емкость с пастой) толщиной примерно 1,5 мм и высушивали. Затем детали с сухим цементующим покрытием помещали в герметичный контейнер с нейтральным наполнителем (чу-

гунной стружкой). Цементацию проводили при 900 °С в течение 3 ч. После цементации детали очищали от остатков обмазки и закаливали с 880 °С в масле, а затем подвергали отпуску при 300 °С в течение 2 ч. Повышенную температуру отпуска использовали для увеличения вязкости сердцевины, твердость поверхности при этом снижалась незначительно.

Упрочненные детали после финишной обработки устанавливали на автомобили, причем для получения сравнительных результатов на те же автомобили устанавливали новые детали, чередуя их с восстановленными. Перед установкой деталей на машины проводилось их микрометрирование.

Эксплуатационные испытания показали, что долговечность деталей, восстановленных электролитическими железохромистыми покрытиями с последующей цементацией, заметно возросла: по клапанам — до 2,5 раз; по наконечникам рулевых тяг — до 3,5 раз. Высокая эффективность предлагаемого способа восстановления автомобильных деталей позволяет рекомендовать его для внедрения в ремонтное производство. Предлагаемая технология рассчитана на использование дешевых и доступных материалов, типового оборудования и отличается высокой производительностью и экологической чистотой.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Юдин М.И. Организация ремонтно-обслуживающего производства в сельском хозяйстве. [Текст] / Н.И. Стукопин, О.Г. Ширай. Краснодар: Изд-во КГАУ, 2002. 944 с.
2. Пат. 2285065 Российская Федерация, МПК С 25 D 3/56. Способ электролитического осаждения сплава железо—хром [Текст] / В.И. Серебровский, Н.В. Коняев, Д.В. Колмыков; патентообладатель ФГОУ ВПО Курская государственная сельскохозяйственная академия им. проф. И.И. Иванова. Заявка: 2005106549/02, 09.03.2005; опубл. 10.10.2006, Бюл. № 28.





А.П. Перекрестов

Определение интенсивности изнашивания конструкционных материалов в агрессивных газовых средах, являющихся компонентами перерабатываемого и перекачиваемого природного газа¹

Попадание в цилиндр компрессора малых объемов жидкости в виде пены вызывает разжижение масляной пленки, разделяющей трущиеся детали цилиндропоршневой группы. Это вызывает рост интенсивности изнашивания трущихся пар в зависимости от вида и характера попавших в перекачиваемый газ веществ и в ряде случаев приводит к поломке штока компрессора. Для изучения зависимости скорости изнашивания конструкционных материалов от давления в трущейся паре, температуры, газовой среды, влажности разработана установка² трения УТ-1.

Ключевые слова: износ, интенсивность изнашивания, компрессор, природный газ, установка трения, сероводород, противозносная присадка.

The hit a small quantity of a liquid in the form of froth in the compressor cylinder arouses a decrease of density of an oily pellicle separating the rubbing details of the cylinder-piston group. It arouses an increase of wear intention of the rubbing details depending on a variety and a character of matters hitting to the swapping gas and results in a braekage of compressor rod. The empirical data are received on the wear plant WP-1 for study the dependence of a deterioration speed of the construction materials from the pressure in the rubbing details, a temperature, a gas medium and a humidity. The processed equipment enables to determine the different regularity of wear processes.

Keywords: wear, wear intention, compressor, natural gas, wear plant, hydrogen sulfide, antiwearing dopant.

Актуальность проблемы

Надежные поставки газа российским потребителям остаются одним из приоритетов в работе Газпрома [1]. Следует отметить, что Газпром значительно повысил долгосрочные цели по добыче газа [2]: к 2010 г. объем добычи газа составит не менее 570 млрд м³, в 2015 г. – 610...615 млрд м³, в 2020 г. – 650...670 млрд м³. Это потребует увеличения объемов добывающей и перекачивающей техники, ее модернизации и повышения долговечности работающих агрегатов и оборудования. Однако необходимость поддерживать работу оборудования на высоком техническом уровне осложняется тем, что используемое оборудование в основном импортного производства и стоимость запасных частей высокая. Например, шток

для компрессора КМ-2 французской фирмы "Куппер-Бессемер" стоит около 9000 евро.

На Астраханском газоперерабатывающем заводе в качестве абсорбента используются водные растворы моноэтаноламина (МЭА) и диэтаноламина (ДЭА). Массовая доля этаноламинов в водном растворе составляет 33 %. Попадание в цилиндр компрессора малых объемов жидкости в виде пены вызывает разжижение масляной пленки, разделяющей трущиеся детали цилиндропоршневой группы (ЦПГ). Это вызывает рост интенсивности изнашивания трущихся пар в зависимости от вида и характера попавших в перекачиваемый газ веществ и в ряде случаев приводит к поломке штока компрессора [3].

Разработанное оборудование для исследования интенсивности изнашивания в условиях коррозионно-механических процессов

Машина трения торцевого типа МП-1

Влияние различных факторов на изнашивание ЦПГ компрессоров, перекачивающих газовую среду, содержащую сероводород H₂S, исследовали на машине трения торцевого типа МП-1, моделирующей из-

¹За разработку установки, моделирующей процессы трения и изнашивания в агрессивных газовых средах, А.П. Перекрестов и М.Ю. Шаталов награждены серебряной медалью VII Московского международного салона инноваций и инвестиций 2007 г.

²За разработку технологического цикла по предотвращению аварийных ситуаций при эксплуатации компрессорного оборудования А.П. Перекрестов награжден серебряной медалью VIII Московского международного салона инноваций и инвестиций 2008 г.

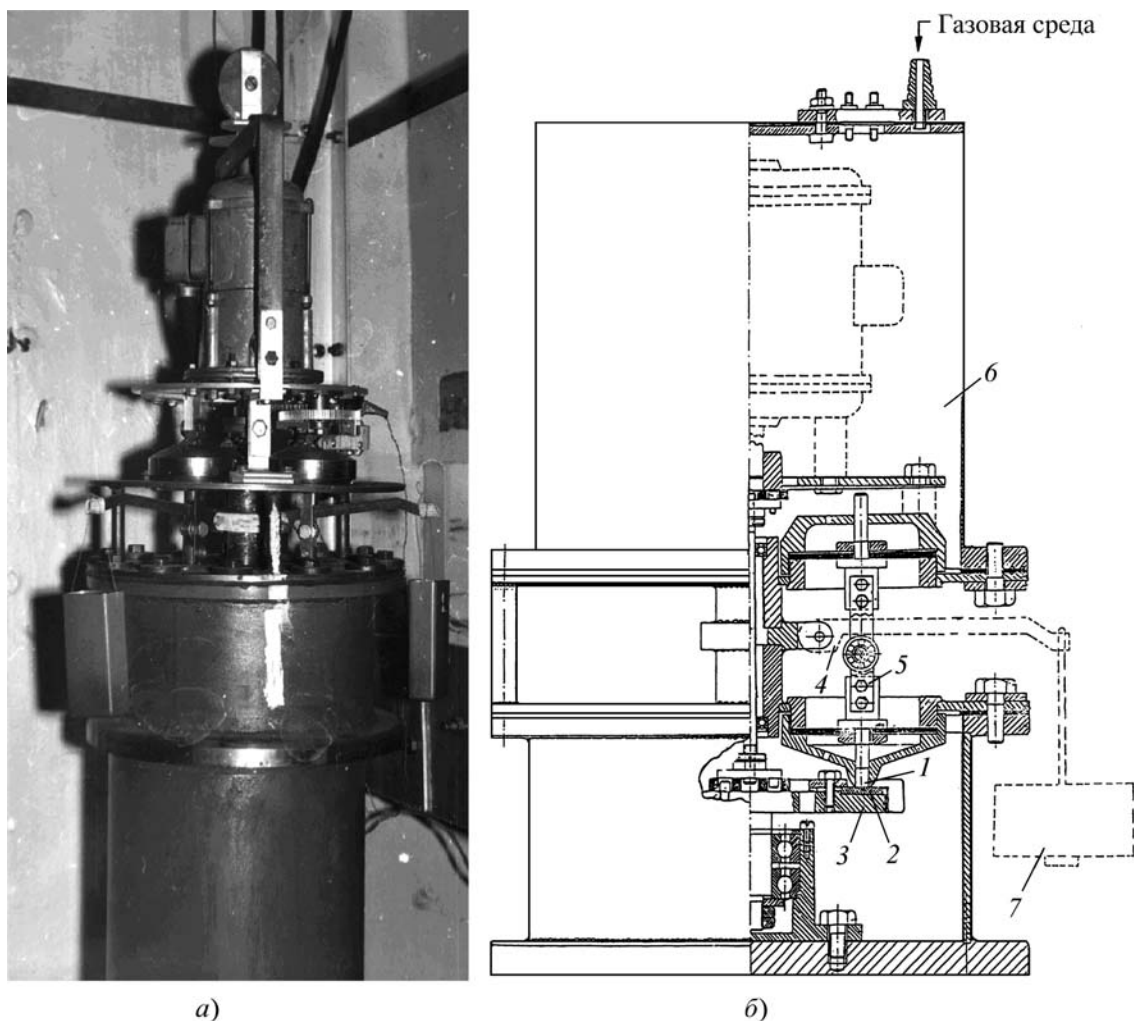


Рис. 1. Общий вид (а) и схема (б) машины трения МП-1

нашивание этой группы деталей. В машине осуществляли подачу и отбор газовой и смазочной среды.

В герметичной машине торцевого трения МП-1 (рис. 1, а) исследуемые образцы (рис. 1, б) – неподвижный 1 и подвижный 2 – помещены в герметичную камеру 6, в которой создается заданная газовая среда. Нагрузка на неподвижный образец осуществляется с помощью нагружающего устройства 5, состоящего из неподвижного рычага 4 и груза 7. Платформа 3 с закрепленным на ней кольцевым образцом вращается от электродвигателя, помещенного в верхней части машины.

При испытании на машине трения МП-1 использовали неподвижные образцы диаметром 8 мм и длиной 16 мм, изготовленные из стали 230 (США), и подвижный образец диаметром 126 мм, изготовленный из чугуна (GS). Площадь трения составляла: 0,0502 см², параметр шероховатости трущихся поверхностей – 0,20...0,25 мкм, коэффициент пере-

крытия – 0,0667, газовая среда – H₂S, время испытания – 6 ч, нагрузка на неподвижный образец – 50...400 Н/см², относительная скорость скольжения поверхностей в зоне трения – 2...3,5 м/с, парциальное давление сероводорода – 0,1 МПа.

Основные достоинства машины трения МП-1:

- возможность замера износа доступными способами (одним или несколькими одновременно): весовыми, индикаторными, методом профилографирования, методом отпечатков, эмиссионного спектрального анализа, атомно-абсорбционного анализа и др.;
- небольшие размеры трущихся тел;
- возможность менять нагрузку и относительную скорость движения образцов;
- возможность регулировать подачу смазки;
- возможность менять состав газовой среды и ее давление;
- возможность непрерывного контроля изнашивания;

– возможность непрерывного контроля в зоне трения температуры образцов, смазки, силы трения (момента силы трения).

Установка для испытания на износ в газовой среде дифтордихлорметана

Для изучения износостойкости материала ЦПГ компрессора разработана установка, моделирующая условия трения и изнашивания в среде дифтордихлорметана между деталями ЦПГ компрессора. Эта установка, собранная на базе компрессора ФВ-10, представляет собой машину трения возвратно-поступательного действия и стенд с измерительной аппаратурой (рис. 2).

Установка позволяет проводить испытания в различных газовых средах при удельном давлении газовой среды во внутренней полости машины до 1,5 МПа на следующих режимах трения: полусухом, граничном, полужидкостном, для чего к трущимся поверхностям подается смазывающая жидкость в виде холодильного масла или маслохладоновой смеси. Особенностью установки является измерение износа путем определения концентрации продуктов износа в масле.

На схеме установки (рис. 3, а) на картер 1 поршневого компрессора ФВ-10 установлена плита, на которой крепится кожух 4 машины трения, герметично закрываемый сверху люком. Внутри кожуха на упругой балочке 9 подвешена обечайка 8, в которую вставлена цилиндрическая втулка 6, выполняющая роль неподвижного образца. Упругая балочка крепится на неподвижной опоре при помощи узла 11, обладающего двумя степенями свободы, что позволяет ей свободно поворачиваться в двух взаимно-перпендикулярных плоскостях. Внутри цилиндрической втулки возвратно-поступательно движутся четыре соединенных попарно самоустанавливающихся образца 4 (рис. 3, б), прижимаемые пружиной к стенке цилиндрической втулки. Крепление подвижных образцов осуществляется при помощи оправки 5 и съемной пластинки 4. Образцы, вырезанные из поршневого кольца, вставляются в пазы

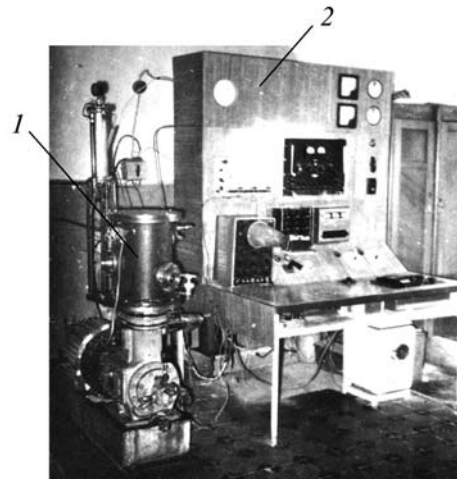


Рис. 2. Установка для испытания на износ:
1 – машина трения; 2 – стенд с измерительной аппаратурой

пластинки и прижимаются ею к оправке при помощи специальных винтов (на рис. 3, б не показаны). Сочленение оправки с втулкой 6 происходит по сфере аналогично схеме работы [4]. Нагрузка на образцы осуществляется предварительно протарированной пружиной 7, насаженной на валик 10. Пружина тарируется дважды: до и после испытаний. Сжатие пружины осуществляется гайкой 8 и контргайкой 9. Валик посредством скобы 7 (см. рис. 3, а) крепится на штоке 2, закреплен-

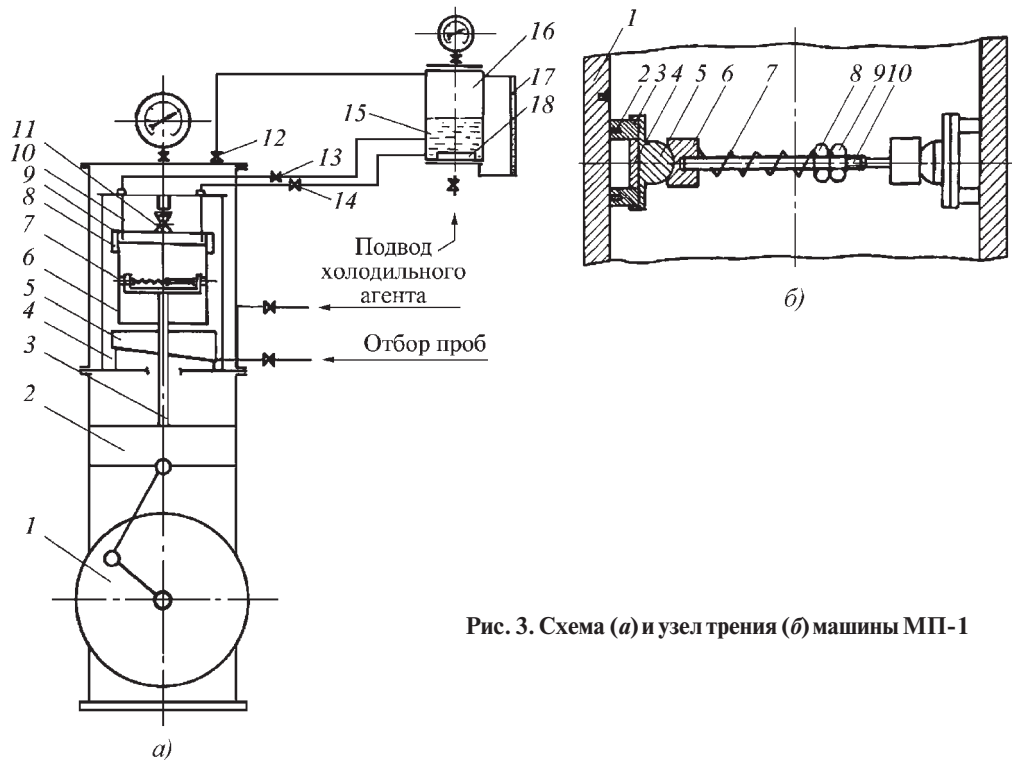


Рис. 3. Схема (а) и узел трения (б) машины МП-1

ном на поршне компрессора 1. Поршень компрессора в данном случае играет роль крейцкоффа.

Масло, выполняющее роль смазки между трущимися образцами, подается к поверхностям трения из масляного бачка 16 (см. рис. 3, а) через направляющие иглы 10 и стекает в маслосборник 5, откуда отбирается на анализ. Масляный бачок имеет барбатер 18 для насыщения масла парами холодильного агента. Температура масла в бачке измеряется термометром, вставленным в термогильзу 15. Температура внутри масляного бачка поддерживается по возможности близкой к температуре внутри кожуха машины 4 и не отличается от нее более чем на 10 К. Подогрев масляного бачка осуществляется грелкой мощностью 600 Вт, подключенной к автотрансформатору. Подача масла может осуществляться как вследствие разности давлений в кожухе машины и масляном бачке, для чего на уравнительной линии предусмотрен запорный вентиль 12, так и вследствие разностей уровней масла в масляном бачке и кожухе. Расход масла регулируется вентилями 15 и 14 и определяется как по уровнемеру 17, так и подсчетами числа капель в минуту, для чего в кожухе предусмотрены смотровые окна.

Работа установки предусмотрена по циклу газового кольца, для чего кожух машины соединен с одним цилиндром компрессора ФВ-10 на всасывании байпасной линии, в которой предусмотрен вентиль для регулирования количества всасываемого газа. Сжатый и нагретый газ подается внутрь машины и таким образом осуществляется замкнутое газовое кольцо.

Установка, моделирующая процессы трения и изнашивания в агрессивных газовых средах УТ-1

Согласно генеральной схеме развития ООО "Астраханьгазпром" на период до 2010 г., предусматривается дальнейшее совершенствование газотранспортной системы с учетом прогнозного объема транспортировки газа в 2010 г. 5,5 млрд м³. Мощность газового комплекса устанавливается в объеме 12,0 млрд м³/год согласно проекту разработки газоконденсатного месторождения на период 2001–2019 гг.

Программой развития предусмотрены работы по следующим направлениям:

- импортозамещение оборудования – создание отечественного оборудования взамен импортного (запорной, регулирующей, предохранительной арматуры, сосудов и аппаратов, работающих под давлением, насосно-компрессорного оборудования);
- повышение надежности оборудования – создание новых ремонтных технологий и защитных покрытий.

Испытание смазочных сред и материалов пар трения проводят на установке трения УТ-1 (рис. 4, а).

Установка трения УТ-1 состоит из машины трения ПШ-1, испытательной камеры, генератора агрессивных газов и вспомогательного технологического оборудования (рис. 4, б).

В машину трения 1 (см. рис. 4, б) из сосудов со смазочной жидкостью 2 и 4 через вентили № 1, 2, 3, 5, 6, 8 поступает испытываемая смазочная среда. Удаление отработанной смазочной среды осуществляется путем подачи промывочной жидкости из сосуда 3 через

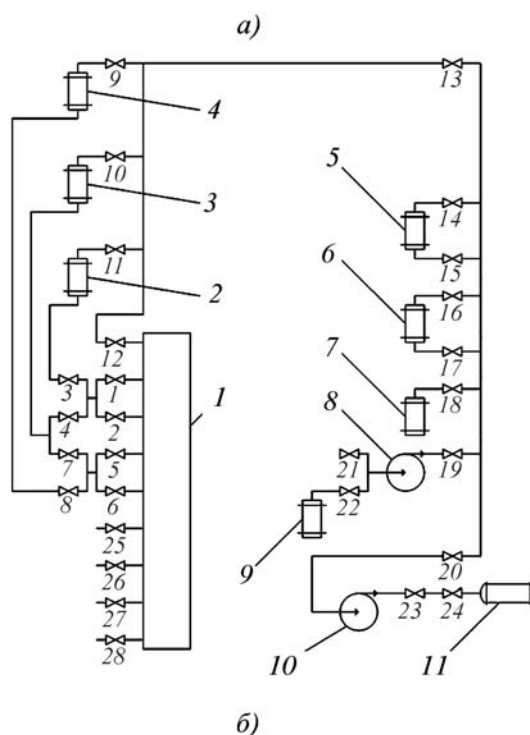
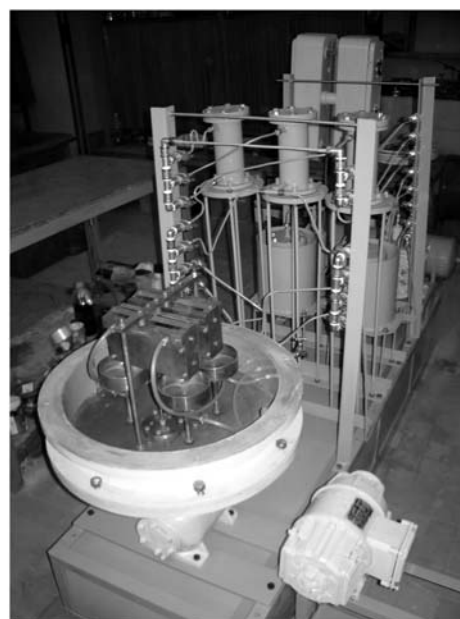


Рис. 4. Общий вид (а) и схема установки УТ-1 (б)

вентили № 1, 2, 4, 5, 6, 7. Отбор отработанной смазочной среды из машины трения осуществляется через вентили 25–28. Баллон со сжатым воздухом 5 заполняется с помощью компрессора 8 через вентили № 14, 19, 21. Баллон с агрессивным газом 6 предназначен для хранения агрессивных компонентов газовой среды. Для выдерживания испытуемых образцов в требуемой газовой среде служит испытательная камера 7. Через вентиль № 18 осуществляется подача агрессивного газа из баллона 6. Генератор агрессивных газов 9 используется для получения сероводорода или других необходимых компонентов агрессивной газовой среды. Баллон с агрессивным газом заполняется с помощью компрессора через вентили № 16, 19, 22. Для вакуумирования машины трения и испытательной камеры при проведении испытаний, а также для удаления газовой среды из остальных емкостей установки трения применяют вакуум-насос 10, подключаемый к общему газовому коллектору. Через вентили № 23, 24 газовая среда из вакуум-насоса поступает в баллон с отработанным газом 11.

Машина трения ПШ-1 позволяет определять параметры процесса изнашивания, в том числе и через малые промежутки времени (0,1–10 ч) по содержанию продуктов износа в масле методом атомно-абсорбционного анализа.

Подвижные и неподвижные образцы для испытаний выполнены из стали 20, предел прочности которой составляет 440 МПа, параметр шероховатости поверхности трущихся образцов – 0,20...0,25 мкм, площадь трения неподвижного образца – $3,85 \times 10^{-4}$ м², подвижного образца – $3,5 \times 10^{-5}$ м², средняя относительная скорость движения – 0,55 м/с.

Методика проведения экспериментов

Определение интенсивности изнашивания трущихся пар методом атомно-абсорбционного эмиссионного анализа

Скорость изнашивания определяли косвенным способом, используя метод атомно-абсорбционного анализа. В качестве индикаторов износа подвижных образцов выбрано серебро. В центр поверхности трения подвижного образца устанавливали "индикатор износа" диаметром 1,2 мм. Износ подвижных образцов определяли по количеству серебра в пробе, суммарный износ подвижных и неподвижных образцов – по количеству железа.

Для повышения точности определения параметров процесса изнашивания трущихся пар и сокращения времени испытаний разработана методика анализа проб масла на содержание в нем продуктов износа.

Для определения количества металлов проводили озоление пробы (т.е. освобождали ее от органической матрицы).

Разложение проб масла производили либо способом сухой минерализации по п. 3 ГОСТ 26929–94, либо способом мокрой минерализации по п. 4 ГОСТ 26929–94, либо с использованием СВЧ минерализатора типа "Минотавр-1".

Наиболее предпочтительным методом является мокрое озоление с помощью концентрированных кислот особой чистоты (ос. ч.) и пероксидом водорода (H₂O₂). При использовании этого метода не происходит потерь анализируемых элементов, как в случае сухого озоления.

В данном случае применяли смесь серной H₂SO₄ и азотной HNO₃ кислот, которые легко вступают в реакции окисления.

1,0 см³ пробы масла вносили в колбу Кьельдаля и затем добавляли по 2,5 см³ HNO₃ и H₂SO₄. Медленно нагревали на песчаной бане до ламинарного кипения пробы. После полного выделения бурых газов (оксидов азота и серы) продолжали кипячение пробы до ее осветления (3...4 ч), после чего добавляли по каплям 1,0 см³ пероксида водорода, который вызывает главным образом окислительно-гидролитические реакции. Под влиянием H₂O₂ соединения со связями С=С переходят в легкогидролизуемые соединения.

Чтобы учесть уровень возможного внесения дополнительных загрязнений, вносимых кислотами, такому же процессу подготовки в отдельной колбе подвергали и используемые реактивы (холостой опыт).

После завершения разложения пробы и ее остывания раствор-концентрат, прошедший цикл минерализации, переносили в аналитическую пробирку и доводили до метки бидистиллированной водой. Объемы (пробы и раствора концентрата) учитывали при окончательном расчете концентраций обнаруженных элементов.

Метод измерения основан на резонансном поглощении света свободными атомами элементов, возникающем при пропускании света через слой атомарного пара в графитовой кювете печи Массмана атомно-абсорбционного спектрометра МГА-915. Неселективные поглощения компенсируются методом Зеемановской поляризационной спектроскопии с высокочастотной модуляцией.

Способ получения сероводорода и испытание материала в коррозионной камере

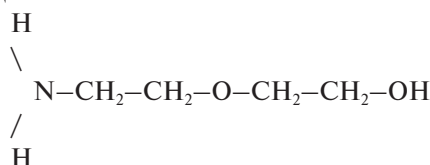
Генератор агрессивных газов 9 (см. рис. 4, б) для получения сероводорода заправляется смесью серы с парафином и измельченным асбестом, взятым в соотношении 3:5:2 по массе (аналогично методике работы [5]). Смесью нагревали до температуры 170...210 °С. Полученный сероводород из генератора компрессором 8

через открытые вентили № 22 и 17 нагнетается в баллон с агрессивным газом 6, при этом вентиль № 16 закрыт. В баллоне поддерживается избыточное давление 0,01...0,015 МПа. Когда давление в баллоне достигнет 0,015 МПа, вентили № 17, 19 и 22 закрываются. При проведении исследований на коррозию в испытательную камеру 7 помещают образцы из материала, подвергнутого испытанию. После герметизации камеры открывают вентили № 18, 20 и вакуум-насосом 10 откачивают воздушную смесь через открытые вентили № 23 и 24 в баллон с отработанным газом. После этого закрываются вентили № 20, 23 и 24. Из баллона с агрессивным газом (H₂S) через открытый вентиль № 16 заполняют испытательную камеру, после чего в камере температура поднимается до 60 °С, и образцы выдерживаются в ней в течение 24 ч. Затем камера вакуумируется по описанной выше схеме и отработанный газ направляется в баллон 11, затем образцы вынимают из камеры и помещают в машину трения ПШ-1 для испытания на изнашивание.

Испытание на изнашивание в различных средах

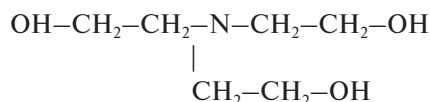
Рассматривали воздействие на процесс изнашивания трущихся пар следующих этаноламинов: дигликолямина (ДГА), триэтаноламина (ТЭА), метилдиэтаноламина (МДЭА). Малые количества этих веществ попадают с газом в ЦПГ компрессора, перекачивающего газ. Вместе с этаноламинами попадают адсорбированные ими агрессивные газы, которые изменяют свойства смазывающей пленки деталей ЦПГ. Наибольший объем адсорбированного газа составляет сероводород, попадающий в масло, участвующее в процессе трения ЦПГ компрессора. Зависимость скорости коррозионно-механического изнашивания от содержания МЭА приведена в работе [6]. Для выявления воздействия на скорость изнашивания были выбраны следующие этаноламины [7]:

ДГА:



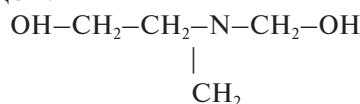
Относительная молекулярная масса 105,1, теплота реакции с H₂S 1566 кДж/кг.

ТЭА:



Относительная молекулярная масса 149,2, теплота реакции с H₂S 930 кДж/кг.

МДЭА:



Относительная молекулярная масса 119,2, теплота реакции с H₂S 1047 кДж/кг.

Для селективного извлечения H₂S обычно применяют третичные амины МДЭА и ТЭА. Применение для очистки газа на Оренбургском ГПЗ МДТА вместо ДЭА обусловило экономический эффект.

Моделирование изнашивания деталей ЦПГ проводили на герметичной машине трения МП-1 [8]. Изучали зависимость скорости коррозионно-механического изнашивания от концентраций ДГА, ТЭА и МДЭА в смазочных маслах Orites-270 DS и ХС-40. Масла испытывали как в воздушной среде, так и в среде сероводорода. При этом в масла вводили ДГА, ТЭА и МДЭА до достижения их содержания 0,1 и 0,2 %. В масло ХС-40 вводили композицию присадок следующего состава: противоизносная присадка Трибоксор М – 50 %, ингибиторы сероводородной коррозии диаметиланилин (АДА) – 45 %, бензотриазол (Бетол-1) – 5 %. Массовая доля композиции присадок в смазочном масле составляла 0,3 % [8].

Результаты испытаний

При исследовании зависимости скорости коррозионно-механического изнашивания от содержания ДЭА в смазочных маслах Orites 270DS и ХС-40 в среде сероводорода в масла вводили по 0,2 % масс. ДЭА, а также воду (0,2 % масс.). Для изучения воздействия композиции присадок № 19 [9], введенных в масло ХС-40, на скорость изнашивания в среде сероводорода и сравнения ее со скоростью изнашивания на импортном масле Orites 270DS построены зависимости (рис. 5). Видно, что при попадании в смазку малых количеств ДЭА и влаги интенсивность изнашивания значительно возрастает. Это обусловлено ухудшением смазки при попадании в нее ДЭА и усилением процесса коррозии в результате воздействия влаги вследствие интенсификации электрохимических процессов. Из анализа результатов испытаний следует, что в этих условиях масло ХС-40 с композицией присадок № 19 превосходит по смазочным свойствам импортное масло Orites 270DS, так как трущаяся пара при прочих равных условиях имеет меньшую интенсивность изнашивания.

Для определения зависимости скорости изнашивания от содержания влаги и сероводорода в окружающей среде при общем давлении 0,1 МПа проводили испытания при использовании масла МС-20. Результаты испытаний приведены в табл. 1.

На установке трения УТ-1 исследовали зависимость скорости изнашивания конструкционных материалов от давления в трущейся паре, температуры, газовой среды, влажности [10, 11].

Результаты исследований приведены на рис. 6, 7.

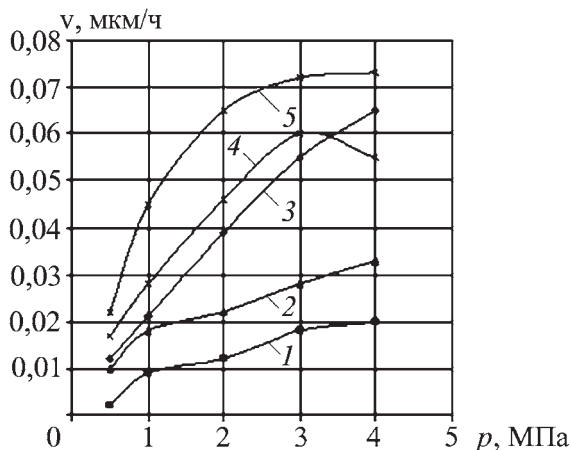


Рис. 5. Зависимость скорости v коррозионно-механического изнашивания от давления p в зоне контакта трущихся поверхностей:

1 – XC-40 + композиция присадок + H₂S; 2 – XC-40 + композиция присадок + H₂S + ДЗА (0,2 %); 3 – Orites 270DS + H₂S; 4 – XC-40 + композиция присадок + H₂S + ДЗА (0,2 %); 5 – Orites 270DS + H₂S + ДЗА (0,2 %) + H₂O (0,2 %)

Рассматривая зависимость влияния влажности на процесс интенсивности изнашивания в трущейся паре, можно отметить, что с ростом содержания влаги в

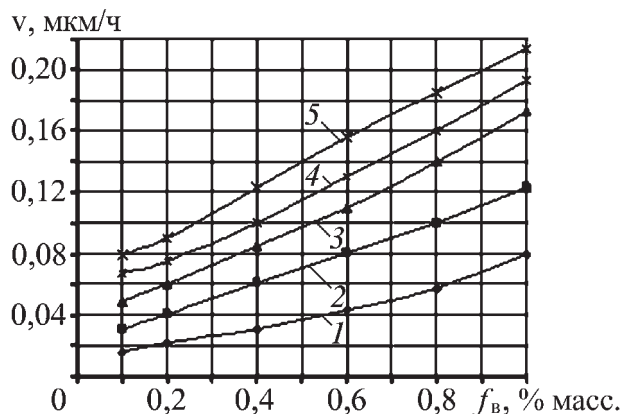


Рис. 6. Зависимость скорости изнашивания от влажности окружающей среды f_v при использовании масла MC-20 в среде H₂S при p , равном 0,5 (1), 1 (2), 2 (3), 3 (4) и 4 (5) МПа

окружающей среде в диапазоне от 0,1 до 1 % масс. интенсивность изнашивания увеличивается в 2,5–4 раза.

Установлена зависимость скорости изнашивания от температуры и состава газовой среды при давлении в контакте трущейся пары 1 МПа для масел Orites 270DS и XC-40. Наличие в газовой среде одновременно сероводорода и влаги ведет к интенсификации процесса коррозии, что выражается в повышении скорости изнашивания. В этом случае наблюдается синергетика процессов изнашивания и

Зависимость скорости изнашивания v от давления в контакте и влажности f окружающей среды при использовании масла MC-20 в среде сероводорода

$p = 0,5$ МПа						
f	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v	0,016	0,022	0,031	0,043	0,058	0,08
$p = 1$ МПа						
f	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v	0,031	0,041	0,061	0,081	0,1	0,123
$p = 2$ МПа						
f	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v	0,049	0,06	0,085	0,11	0,14	0,173
$p = 3$ МПа						
f	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v	0,067	0,075	0,1	0,13	0,16	0,193
$p = 4$ МПа						
f	0,1	0,2	0,4	0,6	0,8	1
v	0,08	0,09	0,123	0,156	0,185	0,213

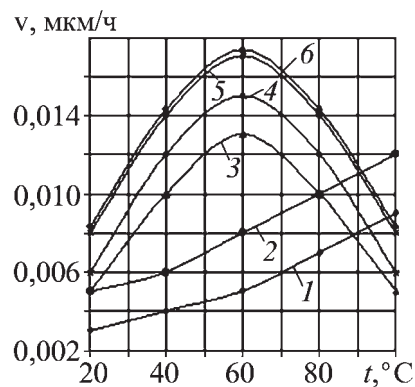


Рис. 7. Зависимость скорости изнашивания от температуры ($p = 1$ МПа):

1 – Orites 270DS + воздух; 2 – Orites 270DS + воздух + H₂S; 3 – Orites 270DS + воздух + H₂S + H₂O (0,1 %); 4 – Orites 270DS + воздух + H₂S + H₂O (0,6 %); 5 – Orites 270DS + воздух + H₂S + H₂O (1 %); 6 – XC-40 + воздух + H₂S + H₂O (1 %) + композиция № 10

коррозии. При наличии влаги скорость коррозии возрастает и ее пик отмечается при температуре 50–60 °С. По мнению авторов, продукты коррозии, образовавшиеся на поверхности, удаляются за счет сил трения, поэтому скорость изнашивания и скорость коррозии примерно одинаковы. При дальнейшем повышении температуры скорость коррозии снижается и скорость изнашивания уменьшается. Это связано с уменьшением доли изнашивания корродированного слоя по отношению к слою некорродированного материала, изнашиваемого в процессе трения. В этом случае скорость изнашивания превышает скорость коррозии трущихся пар. Анализируя скорость изнашивания в этих условиях для масла ХС-40 в сочетании с композицией № 19 при наличии в газовой среде сероводорода и содержании H₂O 1 % (см. рис. 8), можно заключить, что при введении данной композиции интенсивность изнашивания близка к интенсивности изнашивания при использовании масла Orites 270DS.

Таким образом, на основании полученных результатов испытаний установлена возможность замещения импортного масла Orites 270 DS отечественным маслом ХС-40 с композицией присадок.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Миллер А.Б.** На пути к энергетической компании // Пульс Аксарайска. Еженедельник ООО "Астраханьгазпром". 2004. № 26. С. 3.
2. **Миллер А.Б.** Газпром – новое качество роста // Пульс Аксарайска. Еженедельник ООО "Астраханьгазпром". 2008. № 27. С. 4.

3. **Дроздов Ю.Н., Перекрестов А.П.** Прогнозирование коррозионно-механического изнашивания конструкционных материалов при наличии в смазке этаноламинов / Материалы XI Международного научного семинара "Технологические проблемы прочности". Подольск, 2004. С. 37–41.

4. **Бевагоен И.А., Быков В.И.** Силы трения в возвратно-поступательных парах бурильных молотков. В сб.: Теория трения и износа. М.: 1965. С. 340–346.

5. **Гафаров Н.А., Гончаров А.А., Кушнарченко В.М.** Коррозия и защита оборудования сероводородосодержащих нефтегазовых месторождений / под ред. В.М. Кушнарченко. М.: Недра, 1998. 437 с.

6. **Перекрестов А.П.** Коррозионно-механическое изнашивание конструкционных материалов при наличии в масле этаноламинов // Вестник машиностроения. 2004. № 12. С. 32–34.

7. **Технология** переработки сернистого газа: Справочник. т. 38. / А.И. Афанасьев, В.М. Стрючков, Н.И. Полегаев, М.Н. Кисленко и др. / под ред. А.И. Афанасьева. М.: Недра, 1993. 152 с.

8. **Перекрестов А.П., Шаталов М.Ю.** Трибологические испытания масел и присадок при работе в газовой среде с наличием сероводорода // Сб. науч. тр. Наука. Технология. Образование. В 2 ч. Ч. 2. Ангарск, 2000. С. 34–37.

9. **Перекрестов А.П., Кривоносов В.А.** Прогнозирование изнашивания поршневой группы компрессора в условиях сероводородной коррозии // Вестник машиностроения. 2003. № 2. С. 29–31.

10. **Перекрестов А.П., Шаталов М.Ю.** Рассмотрение некоторых аспектов коррозионно-механического изнашивания / Материалы X Международной научно-практической конференции "Современные технологии в машиностроении". Пенза, 2006. С. 82–85.

11. **Патент № 2239171 РФ**, МПК G 01 N 3/56 Машина трения / А.П. Перекрестов, М.Ю. Шаталов. № 2002120247; заявл. 25.07.2002; опубл. 20.03.2004; бюл. № 8.



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 25.02.09 г. Подписано в печать 20.04.09 г. Формат 60×88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 6,86. Уч.-изд. л. 7,48. Заказ 308. 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

Требования к авторам статей журнала «Упрочняющие технологии и покрытия»

Плата с аспирантов за публикацию статей не взимается.

Объем статьи, предлагаемой к публикации, не должен превышать 15 страниц текста, напечатанного на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа через два интервала, 11 – 12 кегль.

В редакцию предоставляются:

распечатанная рукопись (на белой бумаге (формата А4) на одной стороне листа) с подписью всех авторов и обязательно электронная версия – файл с набором текста (шрифт Times New Roman в Microsoft Word и PDF).

Электронная версия может быть выслана по e-mail: utp@mashin.ru; etp2@mashin.ru.

1. Обязательно предоставлять на русском и английском языках:

- УДК (Индекс статьи по Универсальной десятичной квалификации);
- фамилии, имена и отчества авторов;
- название статьи;
- аннотация к статье;
- ключевые слова.

2. Начало статьи должно быть оформлено по следующему образцу:

- ФИО автора (авторов);
- полное название учреждения, в котором выполнялось исследование;
- город;
- страна (для иностранных авторов).

Ссылку на гранты необходимо давать ссылкой, обозначенной звездочкой (*), на первой странице.

3. Статья должна быть обязательно структурирована.

4. Формулы, буквенные обозначения (прописные и строчные, латинского и греческого алфавитов), цифры, знаки и их расположение должны быть четкими и различимыми. Все латинские буквы набираются курсивом, русские и греческие – прямо.

5. После текста должен идти список литературы, используемой при написании статьи, который составляется по порядку ссылок в тексте и оформляется в соответствии с ГОСТ Р 7.0.5–2008 и ГОСТ 7.1–2003.

6. Все страницы в статье должны быть пронумерованы.

7. Иллюстрации предоставляются в виде отдельных файлов (DOC, TIFF, PDF, JPEG с разрешением 600 dpi). Размер иллюстраций не должен превышать 186 мм.

Рисунок должен быть четким и иметь подрисовочную подпись. Объяснение рисунков и фотографий в тексте и подписи к ним должны соответствовать содержанию рисунков. Данные таблиц и рисунков не должны дублировать текст.

8. Подписи к иллюстрациям следует предоставлять отдельным списком.

9. Обязательно должны быть приложены сведения об авторах:

ФИО, ученая степень и звание (если есть), место работы, должность, адреса и телефоны (домашний и служебный), факс и e-mail. Названия институтов и учреждений необходимо раскрывать полностью.

Все статьи, поступившие в редакцию, проходят рецензирование. Редакция оставляет за собой право сообщать автору о результатах рецензирования без предоставления рецензии.

Материалы, присланные в редакцию, обратно не высылаются.