ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 8 (56)
август
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. БЕЗЬЯЗЫЧНЫЙ

Заместители главного редактора:
И.Н. ЖЕСТКОВА
д-р физ.-мат. наук
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

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

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

Редакция:
Е.П. ЗЕМСКОВА
С.В. СИДОРОВА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159**, "Пресса России" **39269**, "Почта России" **60252**) или в издательстве.

Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.

Факс: (499) 269-48-97.

E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

СОДЕРЖАНИЕ

ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

Емелин В.И., Азеев А.А. Влияние различных факторов на производительность комплекса оборудования для бестраншейного ремонта трубопроводов способом нанесения полимерных покрытий 3

МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

Тимофеев М.В., Кордюков А.В., Фоменко Р.Н. Влияние износостойких покрытий инструмента на параметры процесса резания 10

ОБРАБОТКА КОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ПОТОКАМИ ЭНЕРГИИ

Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В. Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров 16

Бледнова Ж.М., Русинов П.О. Формирование наноструктурированных поверхностных слоев из материалов с памятью формы на основе TiNi плазменной наплавкой 23

Мулин Ю.И., Власенко В.Д. Восстановление и упрочнение матриц для прессования алюминиевых профилей электроискровым легированием 32

ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

Агзамов Р.Д., Будилов В.В., Амирханова Н.А. Защитные свойства многослойных покрытий Ti–TiN, полученных методом плазменно-ассистированного нанесения 41

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

Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2009

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 8 (56)
August
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. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

Edition:
E.P. ZEMSKOVA
S.V. SIDOROVA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159**, "Pressa Rossii" **39269**, "Pochta Rossii" **60252**) or in publishing office.

Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

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

CONTENTS

GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

Emelin V.I., Azeev A.A. Influence technical and technology factors on productivity of a complex of the equipment for trenchless repair of pipelines by way of polymeric coverings drawing 3

MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

Timofeev M.V., Kordukov A.V., Fomenko R.N. The influence of tools coatings on different cutting process characteristics 10

PROCESSING BY CONCENTRATED STREAMS OF ENERGY

Belotsercovskiy M.A., Shekulaev A.V. Deposition by high-speed gas-flame dispersion polymeric cords 16

Blednova Z.M., Rusinov P.O. Formation nanostructure blankets with shape memory materials on the basis of TiNi plasma facing 23

Mulin Yu.I., Vlasenko V.D. Restoration and hardening of matrixes for pressing of aluminium profiles under electrospark alloying 32

PROCESSING BY COMBINED METHODS

Agzamov R.D., Budilov V.V., Amirhanova N.A. Protective properties of multilayered coatings Ti-TiN received by the method of plasma-assisted coating deposition 41

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

"Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2009

УДК 628.141.15 (07)
ББК 38.776 я 723

В.И. Емелин, А.А. Азеев
(Сибирский федеральный университет)
Тел.: 8-(391)-246-24-98
E-mail: emelinvi07@list.ru

Влияние различных факторов на производительность комплекса оборудования для бестраншейного ремонта трубопроводов способом нанесения полимерных покрытий

Предложена методика определения производительности комплекса оборудования с учетом влияния основных конструктивных и технологических факторов. Определены резервы повышения производительности за счет увеличения длины захватки, движущего рукав давления воздуха, совмещения выполнения ряда операций, учета характеристик покрытия и других факторов.
Ключевые слова: *бестраншейный ремонт трубопроводов, производительность комплекса оборудования, полимерные покрытия, технические и технологические факторы.*

The technique of definition of productivity of the equipment complex is offered in view of influence of the basic constructive and technology factors. Reserves of increase of its productivity are determined due to increase in length pipeline, pressure of air driving a sleeve, overlapping of performance of some operations, the account of characteristics of a covering, etc. factors.
Keywords: *mrenchless repair of pipelines, productivity of equipment complex, polymeric coverings, technical and technological factors.*

Актуальность работы обусловлена большой протяженностью трубопроводов в России, их высоким износом и значительными объемами ремонтных работ. Это подтверждается следующими фактами. Трубопроводный транспорт России по суммарной протяженности наружных сетей (2,4 млн км) занимает первое место среди других видов транспорта, превышая длину автомобильных дорог (753 тыс. км) более чем в 3 раза, а железнодорожных (86 тыс. км) – в 28 раз. По объему перемещаемой продукции трубопроводы также уверенно лидируют, в 135 раз опережая железнодорожный и автомобильный виды транспорта. Однако трубопроводы в нашей стране находятся в катастрофическом состоянии, около 70 % их протяженности требуют ремонта или замены. Единственным выходом из этой ситуации является снижение затрат на ремонт, увеличение его темпов, что может быть осуществлено только путем внедрения новых ремонтных технологий.

В настоящее время в России преимущественно применяются траншейные способы ремонта трубопроводов, которые сопряжены с выполнением большого объема земляных работ, перекрытием или торможением транспортных потоков, разрушением и последующим восстановлением дорожных покрытий, повреждением и повторной посадкой зеленых насаждений. Указанные недостатки могут быть устранены совершенствованием и внедрением бестраншейных способов ремонта трубопроводов.

Из всех известных способов бестраншейного ремонта трубопроводов, которых более десяти

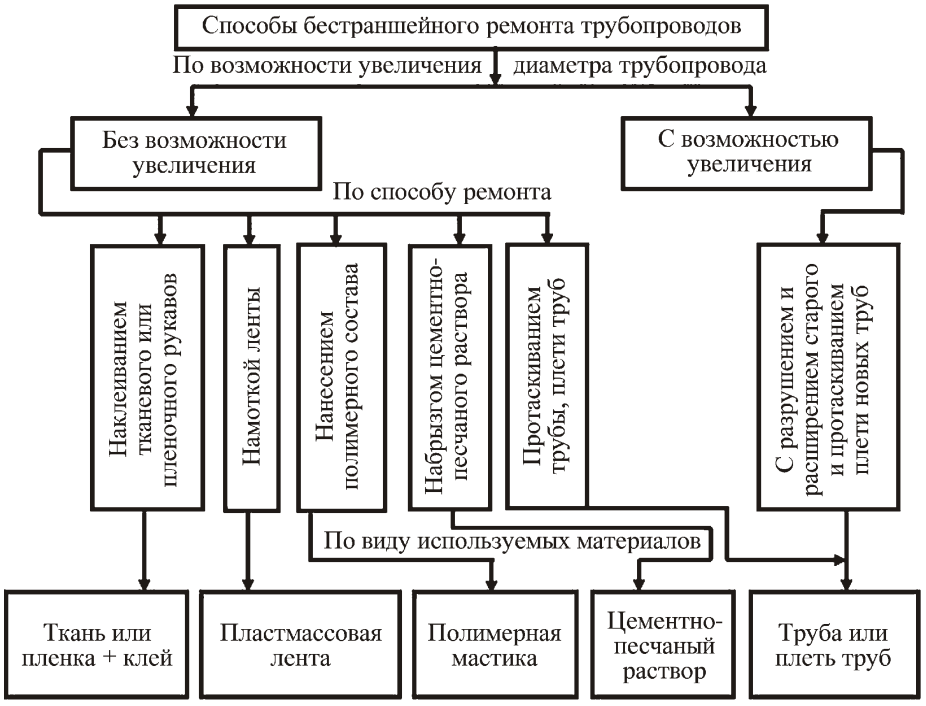


Рис. 1. Классификация способов бестраншейного ремонта трубопроводов

(рис. 1), значительный интерес представляет способ нанесения полимерных покрытий, подразделяемый на два варианта: 1) окрашивание с использованием полимерных составов; 2) оклеивание с использованием полимерных составов и пропитанных клеем технических тканей. По первому варианту толщина покрытия небольшая (до 1 мм), поэтому оно может выполнять только защитную функцию и применяться сравнительно редко. По второму варианту толщина покрытия достигает 5 мм и более. Такое покрытие обладает значительной прочностью, поэтому оно может быть как защитным, так и восстановительным, устраняющим ряд дефектов в виде свищей и трещин. Второй вариант распространен значительно шире и в технике получил название способа комбинированного рукава, поскольку его нанесение связано с использованием как минимум двух элементов: тканевой оболочки и полиэтиленового рукава. Последний после нанесения покрытия удаляется. Далее будет рассмотрен способ комбинированного рукава, который более универсален, а по сравнению с другими известными способами (см. рис. 1) имеет более низкую себестоимость ремонта, позволяет использовать технологические материалы отечественного производства и рассчитан на применение сравнительно простого оборудования собственного изготовления.

Сущность рассматриваемого способа основана на нанесении внутренних одно- или многослойных полимерных покрытий с использованием эпоксидных смол и полиамидных технических тканей. Несмотря на ряд известных исследований этого способа [1, 2], закономерности изменения производительности комплекса оборудования, его реализующего, в настоящее время не исследованы. Необходимость в таких закономерностях объясняется тем, что производительность является важнейшим показателем совершенства оборудования и процесса и применяется при их проектировании. Для получения закономерностей изменения производительности необходимо систематизировать все входящие в процесс ремонта операции. Результаты такой систематизации представлены на рис. 2, где вся совокупность операций разделена на три группы, относящиеся к подготовительному, главному и заключительному периодам.

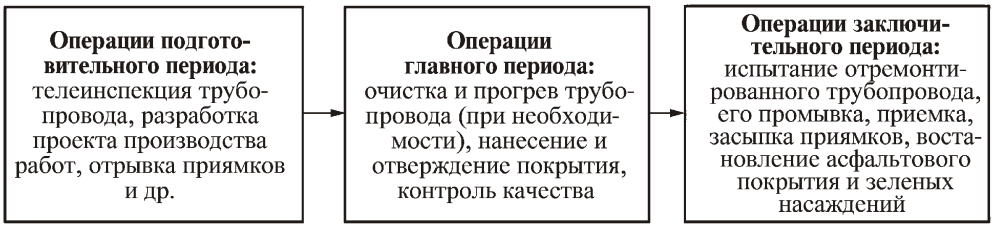


Рис. 2. Структурная схема процесса бестраншейного ремонта трубопроводов способом комбинированного рукава

Операции главного периода, в свою очередь, также могут быть разделены на подготовительные (очистка и прогрев трубопровода), основные (нанесение и отверждение покрытия) и заключительные (контроль качества). Каждый из периодов процесса, а также операции подготовительного и заключительного периодов могут быть выполнены с перерывом во времени. Операции же главного периода должны быть выполнены без перерыва или с минимальным разрывом во времени. При этом операции подготовительного и заключительного периодов могут быть выполнены с использованием серийно выпускаемого оборудования. Операции же главного периода должны быть выполнены нестандартным, вновь изготавливаемым оборудованием, так как серийное оборудование отсутствует. Учитывая сказанное, ниже будет рассмотрен комплекс оборудования (и его производительность), задействованный только на выполнении операций главного периода.

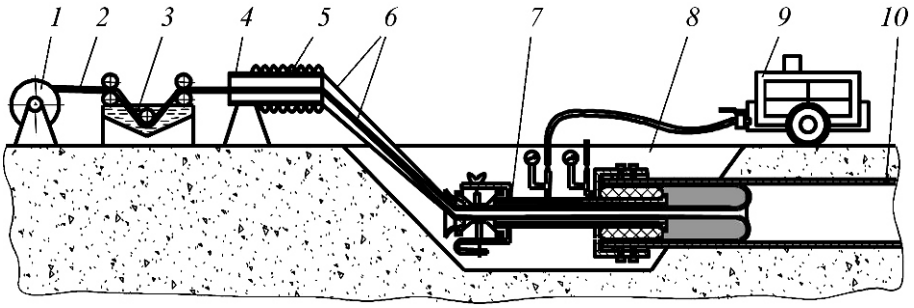


Рис. 3. Технологическая схема бестраншейного ремонта трубопроводов способом комбинированного рукава:
1 – барабан; *2* – тканевая оболочка; *3* – ванна с клеем; *4* – устройство для изготовления комбинированного рукава; *5* – пленочный рукав; *6* – комбинированный рукав; *7* – устройство для герметичного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

Разработано несколько вариантов комплекса оборудования для реализации этого способа [1–6], в том числе и с участием авторов этой статьи [3–6]. Конструктивно-технологическая схема реализации одного такого варианта показана на рис. 3 (представлено оборудование только для нанесения покрытий, а оборудование для очистки и прогрева трубопровода условно не показано). Однако широкое внедрение рассматриваемых технологии и оборудования сдерживается неисследованностью закономерностей изменения тяговых свойств, технологических возможностей и области рационального применения оборудования в зависимости от основных факторов влияния: давления воздуха, диаметра трубопровода, длины захватки, толщины стенок тканевой оболочки и пленочного рукава.

На стадии проектирования оборудования рекомендуется выполнять расчет трех видов производительности: конструктивной (характеризует эффективность конструкции оборудования, учитывает скорость протяжки рукава, но не учитывает технологические и организационные затраты времени); технической (характеризует эффективность технологии и конструкции оборудования, учитывает технологические затраты времени, но не учитывает потери времени, связанные с эксплуатацией оборудования и по организационным причинам) и эксплуатационной (характеризует эффективность конструкции оборудования, технологии и организации работ, но не характеризует резервы ее повышения). При ведении работ поточным способом значительная часть затрат времени может осуществляться параллельно с другими затратами. Например, сушку и прогрев трубопровода на одной захватке можно выполнять параллельно с нанесением тканеклеевого покрытия на другом участке.

Техническая производительность комплекса оборудования П (м/ч) для реализации операций главного периода рассматриваемого способа определяется по формуле

$$\text{П} \quad \frac{k_{\text{и}} L}{T_{\text{под}} \quad T_{\text{осн}} \quad T_{\text{закл}}}, \qquad (1)$$

где $k_{\text{и}}$ – коэффициент использования оборудования по времени в течение смены;

L – длина захватки, м;

$T_{под}$, $T_{осн}$, $T_{закл}$ – длительность выполнения подготовительных (очистка трубопровода и, при необходимости, его прогрев), основных (протягивание комбинированного рукава через участок трубопровода на длину захватки) и заключительных (выдержка нанесенного на внутренние стенки трубопровода покрытия под избыточным давлением воздуха с целью полимеризации клея) операций, входящих в главный период, соответственно, ч.

Учитывая, что $T_{под} = mL/v_о + T_{всп.о}$, $E_{осн} = L/v_р + T_{всп.р}$, $v_р \quad k_{ин}v_{р.1наиб}/n$, $L \quad L_{к.наиб}$, $L \quad 0{,}91L_{пр}$, $p \quad p_{пр}$

$$L_{пр} \quad \frac{PD(D \quad 8n_{\ т} \quad 8_{\ п}) \quad 16f_{п\ т}P_т L_{т.м}\sqrt{k_{к.р}D(n_{\ т} \quad {}_{п})}}{8f_{п\ п}D(n_{\ т}{}_{\ т} \quad {}_{п}{}_{\ п})},$$

то, подставляя все эти выражения в формулу (1), получим

$$П \quad \frac{k_и L v_о v_р}{m v_р L \quad v_о v_р T_{всп.о} \quad v_о L \quad v_о v_р T_{всп.р} \quad v_о v_р T_{закл}},$$

$$v_р \quad \frac{k_{ин} v_{р.1наиб}}{n}, \ L \quad L_{к.наиб}, P \quad P_{пр}; \qquad , (2)$$

$$L \quad 0{,}9\frac{PD(D \quad 8n_{\ т} \quad 8_{\ п}) \quad 16f_{п\ т}P_т L_{т.м}\sqrt{k_{к.р}D(n_{\ т} \quad {}_{п})}}{8f_{п\ п}D(n_{\ т}{}_{\ т} \quad {}_{п}{}_{\ п})}$$

где m – число проходов очистного снаряда (при использовании разных снарядов, например скребка и щетки, их проходы складываются);

$v_о$, $v_р$ – скорости движения очистного снаряда и комбинированного рукава в трубопроводе соответственно, м/ч;

$k_{ин}$ – коэффициент интенсификации процесса пропитки клеем тканевой оболочки за счет вакуумирования, применения ультразвука и пр.;

$v_{р.1наиб}$ – наибóльшая рабочая скорость движения комбинированного рукава без интенсификации процесса пропитки клеем и при однослойной тканевой оболочке (при превышении этой скорости качественная пропитка клеем тканевой оболочки становится невозможной, а в процессе приклеивания к трубе возможно образование гофр), м/ч;

n – число слоев ткани в оболочке;

$T_{всп.о}$, $T_{всп.р}$ – длительность вспомогательных операций, связанных с очисткой (транспортирование и расстановка очистного оборудования, прогрев трубопровода для снижения прочности коррозионных отложений и продувка или промывка трубопровода после его очистки скребками и щетками) и протягиванием рукава (транспортирование, расстановка и подключение основных изделий комплекса к источникам энергии и сжатого воздуха) соответственно, ч;

$L_{к.наиб}$ – наибóльшая длина захватки, определяемая конструкцией оборудования (емкостью кассет по тканевой оболочке и пленочному рукаву), надежностью процесса и длиной участка трубопровода без изгибов и сужений, м;

$L_{пр}$ – предельная длина захватки, при которой протяжка комбинированного рукава через трубопровод становится невозможной из-за недостаточной величины тягового усилия комплекса оборудования, м;

P, $P_{пр}$ – движущие рукав текущее и предельное значения давления воздуха соответственно, кПа;

D – внутренний диаметр трубопровода, м;

${}_{т}$ ${}_{п}$ – толщина ткани и пленки в составе комбинированного рукава соответственно, м;

$f_{п–т}$, $f_{п–п}$ – коэффициенты трения скольжения полиэтилена по ткани и полиэтилена по полиэтилену соответственно;

$P_т$ – давление воздуха в тканевой манжете пневмозатвора, кПа;

$L_{т.м}$ – длина тканевой манжеты пневмозатвора, м;

$k_{к.р}$ – коэффициент увеличения диаметра сжатого в жгут комбинированного рукава вследствие образования в нем складок;

${}_{т}$, ${}_{п}$ – объемные веса смоченной клеем ткани и пленки соответственно, кН/м^3.

Введенные в выражение (2) ограничения учитывают следующие обстоятельства. Ограничение скорости $v_р$ задано с целью повышения качества пропитки тканевой оболочки клеем, обеспечения качества нанесения покрытия и исключения гофр в приклеиваемой к трубе тканевой оболочке. Ограничение L $L_{к.наиб}$ учитывает предельно возможную емкость кассет с тканевой оболочкой и полиэтиленовой пленкой (в рассматриваемом варианте $L_{к.наиб} = 200$ м). Ограничение L $0{,}9L_{пр}$ учитывает возможность протаскивания комбинированного рукава через трубопровод с учетом конструктивных и технологических параметров, при этом величина $L_{пр}$ определяется по указанной выше формуле с учетом полной реализации тягового усилия комплекса оборудования на преодоление всех сопротивлений в процессе протягивания рукава. Ограничение движущего комбинированный рукав давления воздуха P $P_{пр}$ обеспечивает целостность полиэтиленовой пленки и исключает образование гофр в тканевой оболочке. Все ограничения обоснованы расчетом и результатами отработки рассматриваемой технологии на производственных объектах.

Формула (2) получена для случая, когда подготовительные, основные и заключительные операции главного периода выполняются последовательно (сначала все на одной захватке, потом все на другой и т.д.), без запараллеливания их выполнения (без одновременного выполнения) на различных захватках. В случаях поточной организации работ и параллельного выполнения различных операций в этих формулах из каждых параллельно выполненных двух или трех совмещенных операций должна учитываться только одна с наибольшей длительностью. При этом выражение (1) будет представлено в виде

$$П \quad \frac{k_и L}{\max[T_{под};\ T_{осн};\ T_{закл}]}, \qquad (3)$$

или после подстановки L, $v_о$, $v_р$, $T_{всп.о}$, $T_{всп.р}$

$$П \quad \frac{k_и L}{\max[mL/v_о \quad T_{всп.о};\ L/v_р \quad T_{всп.р};\ T_{закл}]}. \qquad (4)$$

Анализируя формулу (4), можно отметить, что на величину производительности чрезмерно большое влияние оказывает длительность выполнения заключительных операций (в частности, длительность выдержки комбинированного рукава) главного периода. Для снижения этого влияния и увеличения технической производительности почти в 2 раза предложено операцию выдержки выполнять одновременно на двух и более захватках, используя два подкачивающих воздух компрессора небольшой мощности или даже только один такой компрессор, но с периодическим его переносом для подкачки воздуха с одной захватки на другую.

Эксплуатационная производительность комплекса оборудования $П_э$, м/ч, определяется по формуле

$$П_э \quad k_э П, \qquad (5)$$

где $k_э$ – коэффициент учета эксплуатационных потерь рабочего времени комплекса (в расчетах рекомендуется применять $k_э$ = = 0,8...0,9).

Учитывая, что длительность операций подготовительного и заключительного периодов, как правило, удается уменьшить организационными мерами (путем увеличения количества однотипного оборудования и сменности его работы), то представляют практический интерес результаты исследования зависимости технической производительности от длительности только основных операций главного периода с учетом, что все прочие операции могут быть запараллелены и выполнены быстрее основных. В этом случае выражение (4) с учетом ограничений (2) можно представить в виде

$$П \quad \frac{k_и L v_р}{L \quad v_р T_{всп.р}};$$

$$\text{при} \quad v_р \quad \frac{k_{ин} v_{р.1наиб}}{n},\ L \quad L_{к.наиб},\ L \quad 0{,}9L_{пр},\ P \quad P_{пр}, \qquad (6)$$

$$L_{пр} \quad \frac{PD(D \quad 8n_{\ т} \quad 8_{\ п})\ 16f_{п\ т}P_т L_{т\ п}\sqrt{k_{к.р}D(n_{\ т} \quad {}_{п})}}{8f_{п\ п}D(n_{\ т\ т} \quad {}_{п\ п})}.$$

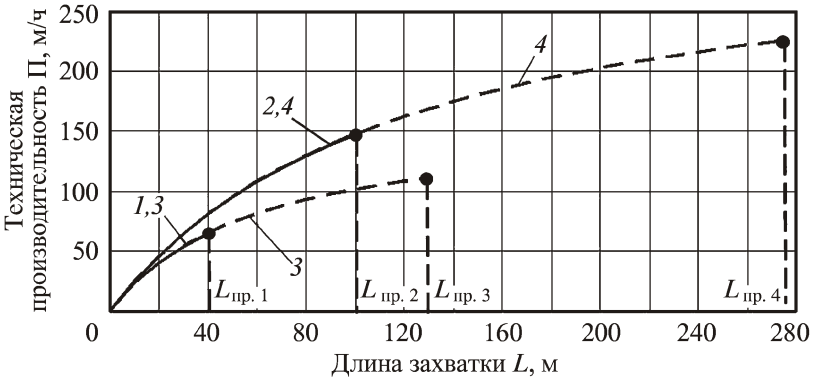


Рис. 4. Зависимость технической производительности комплекса оборудования для бестраншейного ремонта трубопроводов от длины захватки при различном их диаметре *D*, числе слоев *n* ткани и полном совмещении операций:
1 – $D = 0{,}2$ м, $n = 2$; *2* – $D = 0{,}2$ м, $n = 1$; *3* – $D = 0{,}4$ м, $n = 2$; *4* – $D = 0{,}4$ м, $n = 1$

Зависимость технической производительности (6) от длины захватки при различных диаметрах трубопровода с учетом действующих ограничений показана на рис. 4. При $k_и = 0{,}9$; $k_{ин} = 1{,}0$; $v = 1800$ м/ч; $v_{р1наиб} = 360$ м/ч; $L_{к.наиб} = 200$ м; $T_{всп.о} = 0{,}2$ ч; $T_{всп.р} = 0{,}3$ ч; $T_{закл} = 12$ ч; $P = P_{пр} = 40$ кПа; $_т = 0{,}0016$ м; $_п = 0{,}0002$ м; $f_{п–т} = 0{,}2$; $P_т = 30$ кПа; $L_{т–м} = 0{,}2$ м; $k_{кр} = 1{,}3$; $f_{п–п} = 0{,}3$; $m = 2$; $_т = 12{,}0$ кН/м^3; $_п = 9{,}4$ кН/м^3.

Анализируя рис. 4 и выражения (2), (6), можно отметить, что при максимально возможном совмещении операций техническая производительность комплекса оборудования существенно зависит от длины захватки и числа слоев ткани. При этом следует обратить внимание, что форма кривых не зависит от диаметра трубопровода и ряда других факторов (кривые на рис. 4 для $D = 0{,}2$ и $D = 0{,}4$ м совпадают). Однако ввиду различий в значениях ограничений длины захватки, максимальная производительность комплекса оборудования при ремонте трубопроводов бóльших диаметров значительно выше, чем меньших. Так, при $n = 1$ максимальная производительность комплекса при $D = 0{,}4$ м и $L = L_{пр} = 275{,}8$ м на 50 % больше, чем при $D = 0{,}2$ м и $L_{пр} = 105{,}7$ м.

Из рис. 4 следует, что работу комплекса оборудования необходимо организовывать при максимально возможных длинах захватки, равных min ($L_{пр}$, $L_{к.наиб}$), когда его производительность будет наибольшей. В связи с этим для практики важно найти зависимость наибольшей производительности комплекса оборудования от основных факторов влияния при оптимальных значениях L, D и v. Учитывая, что графики производительности являются непрерывно растущими кривыми, то максимум производительности следует искать на границах ограничений. В данном случае при $L = \min(L_{кр}, L_{к.\,наиб})$ и $P = P_{пр}$. Значения этих ограничений надо подставить в формулу производительности (6) и найти ее минимум

$$\Pi_{max} \quad \min \begin{cases} \dfrac{0{,}9k_и k_{ин} v_{р.1наиб}[P_{пр}D(D \quad 8n \quad _т \quad 8 \quad _п)}{0{,}9n[P_{пр}D(D \quad 8n \quad _т \quad 8 \quad _п) \quad 16f_{п \quad т}P_т L_{т \quad п}\sqrt{k_{к.р}D(n \quad _т \quad _п)}]} \\ \dfrac{16f_{п \quad т}P_т L_{т \quad п}\sqrt{k_{к.р}D(n \quad _т \quad _п)}]}{8k_{ин}v_{р.1наиб}T_{всп.р}f_{п \quad п}D(n \quad _т \quad _т \quad _п \quad _п)}; \\ \dfrac{k_и L_{к.наиб}v_{р.1наиб}}{nL_{к.наиб} \quad v_{р.1наиб}T_{всп.р}}, \end{cases} \qquad (7)$$

где Π_{max} – максимально возможная производительность комплекса оборудования (м/ч) при полном совмещении операций и их выполнении при наибольших возможных значениях ограничений для L, P и v.

Результаты исследования зависимости максимально возможной производительности от диаметра трубопровода и количества слоев ткани с использованием выражений (2) и (7) показаны на рис. 5 при исходных данных к рис. 4. Из графиков этих зависимостей следует, что они непрерывны и, в общем случае, носят ломаный характер, что объясняется наличием двух ограничений. При этом часть каждой такой зависимости определяется одним ограничением, а оставшаяся часть – другим ограничением. Из графиков также следует, что с увеличением диаметра ремонтируемого тру-

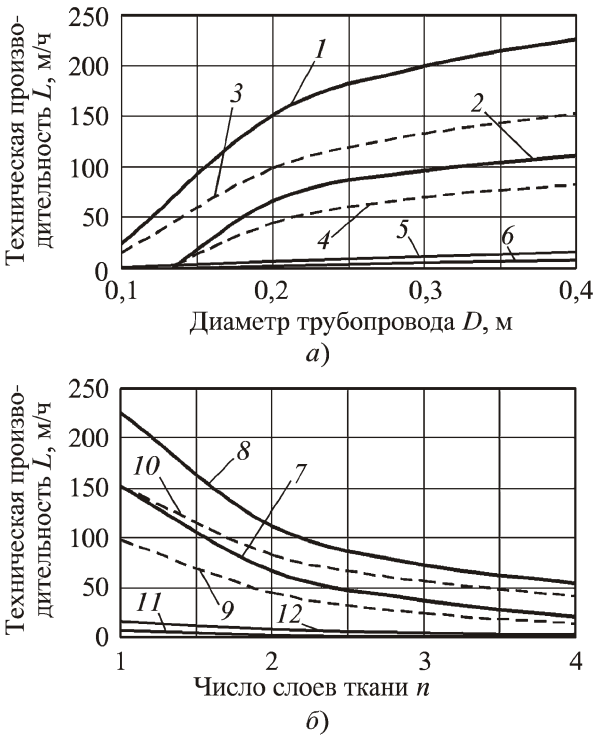


Рис. 5. Зависимость технической производительности комплекса оборудования от диаметра трубопровода (*а*) и числа слоев ткани (*б*) при оптимальных параметрах *L*, *P*, v для различной степени совмещения операций:
1, *2*, *7*, *8* – полное совмещение операций; *3*, *4*, *9*, *10* – частичное совмещение операций (выдержка покрытия до полимеризации клея); *5*, *6*, *11*, *12* – без совмещения операций; *1*, *3*, *5* – $n = 1$; *2*, *4*, *6* – $n = 2$; *7*, *9*, *11* – $D = 0{,}2$ м; *8*, *10*, *12* – $D = 0{,}4$ м

бопровода производительность монотонно возрастает. Этот кажущийся парадокс объясняется тем фактом, что графики построены при оптимальных длинах захватки. Причем трубопроводам большего диаметра соответствуют большие значения оптимальной длины захватки, что в итоге и приводит к большей производительности.

Все графики рис. 5 соответствуют оптимальным длинам захватки, предельно возможным значениям движущего рукав давления воздуха и скорости рукава. Поэтому они характеризуют максимально возможную производительность для трех степеней совмещения операций: 1) полное совмещение операций (кривые *1*, *2*, *7*, *8*), при котором производительность комплекса оборудования максимальна; 2) частичное совмещение операций (кривые *3*, *4*, *9*, *10*), когда операции выдержки рукава совмещают с другими операциями, не оказывая отрицательного влияния на производительность; 3) работы без совмещения операций, хотя и при оптимальных значениях параметров *L*, *P* и v (кривые *5*, *6*, *11*, *12*). Значения производительности комплекса, в случае его работы с полным совмещением операций и без совмещения, отличаются в 15...20 и более раз (см. рис. 5). Отсюда следует, что проектирование производства работ и их организация должны выполняться в расчете на варианты работы комплекса при оптимальных параметрах и максимально возможном совмещении операций. Однако необходимо учитывать, что последнее зависит не только от научной организации труда, но и от обеспеченности кадрами, оборудованием и материалами. При хорошей технологической подготовке процесса ремонта трубопроводов все это поддается управлению, которое будет наиболее эффективным при использовании разработанных выше закономерностей изменения производительности.

Вывод

Предложенная методика определения производительности комплекса оборудования позволяет выявить ограничения длины захватки, давления воздуха и скорости движения рукава и установить, что максимально возможная производительность комплекса оборудования может быть достигнута при значениях величин факторов, близких или равных значениям ограничений.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Храменков С.В.** Ремонт трубопроводов бестраншейными способами с помощью комбинированного рукава // Водоснабжение и санитарная техника. 1998. № 7. С. 20–22.

2. **Белобородов В.Н., Ли А.Н., Савченко В.Т.** Технология оклеечной изоляции внутренней поверхности трубопроводов // Мелиорация и водное хозяйство. 1999. № 4. С. 42–44.

3. **Пат.** № 2340829 РФ на изобретение, МПК F16L58/00. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.И. Емелин, С.А. Ли, А.А. Азеев. 2008. Бюл. № 34.

4. **Пат.** № 2337270 РФ на изобретение, МПК F 16L 58/10. Устройство для восстановления трубопровода / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.И. Емелин, А.А. Азеев, С.А. Ли. 2008. Бюл. № 30. Ч. 4. С. 1061.

5. **Пат.** № 2248497 РФ на изобретение, МПК F16L58/10. Устройство для восстановления трубопроводов / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко, В.И. Емелин. 2005. Бюл. № 8. Ч. 4. С. 474.

6. **Пат.** № 2212578 РФ на изобретение, МПК F 16L 58/10. Способ нанесения покрытия на внутреннюю поверхность трубопровода и устройство для его осуществления / В.Н. Белобородов, А.Н. Ли, В.Т. Савченко, В.И. Емелин, В.А. Кудрявцев. 2003. Бюл. № 26. Ч. 3. С. 603.

УДК 658.511.4:621.7

М.В. Тимофеев, А.В. Кордюков, Р.Н. Фоменко
(РГАТА им. П.А. Соловьева, г. Рыбинск)
Тел.: (4855) 28-04-70
E-mail: root@rgata.ru

Влияние износостойких покрытий инструмента на параметры процесса резания

Исследовано влияние износостойких покрытий с различными коэффициентами трения на параметры процесса резания, в частности силу резания, коэффициент утолщения стружки, коэффициент трения стружки о переднюю поверхность инструмента, температуру в зоне резания. Рассмотрено влияние различных покрытий на работоспособность режущего инструмента.

Ключевые слова: *параметры поверхностного слоя, покрытие, точение, инструмент, оптимальная температура резания.*

The influence of wear-resistant coatings having different friction coefficients on cutting process characteristics, such as cutting force, chip thickening coefficient, coefficient of chip friction on the face of a tool and temperature in the cutting zone, have been researched. The influence of different wear-resistant coatings on operability of cutting tools has been considered.

Keywords: *the parameters of surface layer, coating, turning, tool, optimal cutting temperature.*

Создание авиационных двигателей нового поколения и других сложных механотронных систем невозможно без использования новых материалов и уменьшения веса конструкции с одновременным повышением мощности, коэффициента полезного действия, ресурса работы, надежности, уменьшением стоимости изделия и т.д. Таким образом, возрастает удельная нагрузка на единицу поверхности ответственных деталей, что приводит к необходимости исследования требуемых параметров качества поверхностного слоя детали, обеспечивающего наибольший срок службы изделия, а также к поиску технологических условий обработки, позволяющих выполнить заданные конструктором требования и сократить число доводочных и специальных операций.

Большинство отказов деталей машин в процессе эксплуатации вызваны усталостными дефектами. Повреждения материала при усталости, которые приводят к изменению механических свойств и образованию трещины, локализуются в его тонком поверхностном слое [1]. Данная проблема особенно актуальна в авиастроении, космической технике и других отраслях народного хозяйства, где аварии вследствие разрушения ответственных деталей могут привести к катастрофе. Поэтому достижение оптимального комплекса параметров качества поверхностного слоя обрабатываемой детали (для данных условий эксплуатации), в значительной мере определяющего эксплуатационные свойства, в том числе усталостную прочность, является не менее, а в некоторых случаях более сложной и ответственной задачей технолога, чем обеспечение точности размеров и форм детали.

Известно, что для конкретной пары обрабатываемый–инструментальный материал при заданных условиях обработки существуют оптимальные режимы резания, при которых обеспечивается минимальный износ инструмента, а также наилучшие показатели пара-

метров качества поверхностного слоя и эксплуатационные свойства детали (шероховатость, наклеп, остаточные напряжения, контактная жесткость и др.) после обработки. По исследованиям профессора С.С. Силина оптимальным режимам резания соответствует оптимальная температура резания $T_{опт}$, которая является константой для каждой рассматриваемой пары обрабатываемый–инструментальный материал. Значение $T_{опт}$ не зависит от геометрических параметров инструмента, применяемого *смазочно-охлаждающего технологического средства* (СОТС), термической обработки стали, а также применяемого вида механической обработки (точение, сверление, фрезерование, протягивание и т.д.). Имеющаяся теоретико-экспериментальная база позволяет без проведения экспериментов определять оптимальные режимы резания расчетным методом [2], а также различные параметры качества поверхностного слоя детали для инструментов без покрытия. Однако уже несколько десятилетий на производстве используют инструменты с износостойкими покрытиями, в том числе и наноструктурные покрытия 2D и 3D (сверхрешетка), которые значительно повышают производительность обработки по сравнению с инструментами без покрытия. Отсутствие теоретико-экспериментальных зависимостей определения параметров качества поверхностного слоя для инструментов с покрытиями часто приводит к снижению эксплуатационных характеристик ответственных деталей и повышению трудоемкости их изготовления.

Износостойкие покрытия существенно влияют на различные параметры процесса резания и, как следствие, на параметры поверхностного слоя детали. Покрытия характеризуются низким коэффициентом трения, что существенно снижает длину пластического и упругого контакта стружки с деталью, силу резания и температуру в зоне обработки. Большинство современных износостойких покрытий имеют низкий коэффициент трения, например, некоторые наноструктурные покрытия типа $(TiN)_{0,5}B_{0,5}$, Ti–Cr–B–N , TiN/AlN, nc–TiAlN/a–Si_3N_4 имеют коэффициент трения по стали 0,1...0,4. Нанесение износостойких покрытий с низким коэффициентом трения, например TiN, приводит к снижению таких параметров контактных процессов и стружкообразования, как длина пластического и упругого контакта стружки с передней и задней поверхностями инструмента; коэффициента усадки стружки K_L; сил, действующих на передней поверхности инструмента; коэффициентов трения , удельных нагрузок на задней поверхности. В то же время более интенсивное снижение длины контакта по передней поверхности по сравнению с силами резания приводит к росту удельных нормальных нагрузок и контактных напряжений, что ведет к повышению силовой напряженности режущего клина и снижению его пластической прочности [3]. Последнее говорит о необходимости проектирования специальной геометрии инструмента с более прочной режущей кромкой при использовании покрытия с низким коэффициентом трения.

Переход от понимания качественного влияния покрытий на процесс резания к конкретным опытным данным является важным этапом в построении точной математической теории. В табл. 1 приведены данные о влиянии состава покрытия и скорости резания на температуру в зоне обработки, адаптированные из работ [3] и [4].

Как видно из представленных данных, использование покрытий с меньшим коэффициентом трения приводит к снижению длины контакта и способствует некоторому повышению интенсивности итогового теплового потока, что также связано с увеличением скорости скольжения стружки по передней поверхности инструмента [4], поэтому температура в зоне резания у пластин с покрытием сложного состава меньше, чем при использовании покрытия TiN с меньшим коэффициентом трения при работе на низких скоростях резания. С увеличением скорости резания температура на передней поверхности инструмента с покрытием сложного состава выше, чем с покрытием TiN. Это связано с замедлением темпа снижения длины контакта при росте скорости резания и изменением тепловых потоков в

Таблица 1

Влияние состава покрытия и скорости резания на показатели теплового состояния инструмента при обработке стали 30ХГСА

Инструментальный материал	$T_п$, С	$T_з$, С	$T_{ЗР}$, С	$T_п$, С	$T_з$, С	$T_{ЗР}$, С
	v = 50 м/мин			v = 60 м/мин		
Р6М5К5	515	272	459	551	291	491
Р6М5К5+TiN	476	202	425	510	216	448
Р6М5К5+(Ti,Zr)N	446	217	402	469	232	433
Р6М5К5+(Ti,Zr)CN	443	219	399	474	234	437
v = 80 м/мин				v = 120 м/мин		
ВК6	994	498	887	1148	567	1003
ВК6+TiN	940	377	761	1104	415	878
ВК6+(Ti,Mo)N	942	414	778	1133	447	928
ВК6+(Ti,Mo)CN	916	376	754	1129	423	908
v = 100 м/мин				v = 140 м/мин		
МК8	1065	504	957	1180	560	1043
МК8+TiN	989	401	891	1128	437	953
МК8+(Ti,Zr)N	942	437	859	1155	472	955
МК8+(Ti,Zr)CN	940	403	855	1160	447	923

Примечание. S = 0,3 мм/об; t = 1 мм, $T_п$, $T_з$, $T_{ЗР}$ – температура на передней, задней поверхностях и в зоне резания соответственно.

инструменте [3]. Таким образом, при использовании покрытий с низкими коэффициентами трения целесообразно проводить обработку на более высоких скоростях резания.

Для подтверждения влияния износостойких покрытий на различные параметры процесса резания были проведены эксперименты по обработке точением со сменными пластинами с разными коэффициентами трения.

Исходные данные: пластины для точения фирмы ISCAR, сплав IC907 с покрытием TiAlN и сплав IC807 с многослойным покрытием TiN–TiCN–TiN. Форма пластин типа "тригон", геометрия пластин – WNMG 080408–TF, обрабатываемый материал ЭИ437Б (ХН77ТЮР).

Исследования проводили на токарном станке 16А20Ф3 с системой ЧПУ НЦ-31. Система ЧПУ работала в интерактивном режиме. Режимы обработки задавали непосредственно с пульта оператора без разработки управляющей программы. Внешний вид оборудования представлен на рис. 1.

В процессе обработки заготовки с помощью оборудования, представленного на рис. 2, контролировали силу резания посредством измерения величин перемещений державки резца с последующей тарировкой упругой системы державки на эталонном динамометре. Дат-

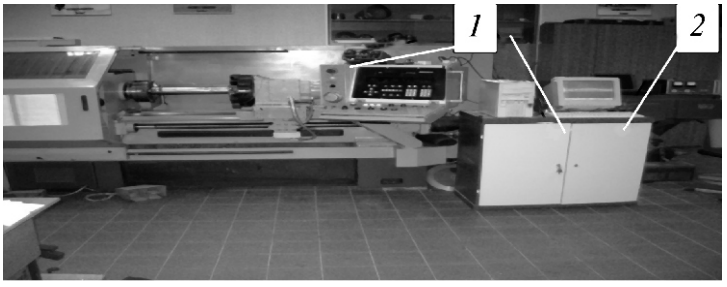


Рис. 1. Оборудование для проведения экспериментов:
1 – система измерения составляющей P_z силы резания; *2* – система регистрации температуры в зоне обработки

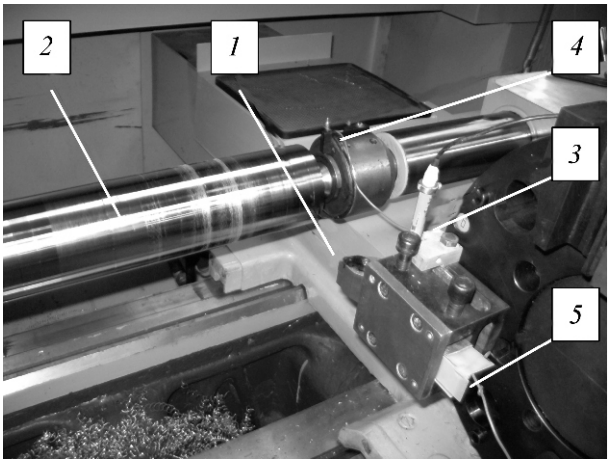


Рис. 2. Рабочая зона станка:
1 – резец; *2* – обрабатываемая заготовка; *3* – датчик измерения силы резания; *4*, *5* – клеммы естественной термопары

чиком деформаций в данном случае являлся индуктивный измеритель микроперемещений модели "Микрон-02", подключенный посредством 10-разрядного аналого-цифрового преобразователя к ПЭВМ. Это позволило существенно снизить погрешности измерения и упростить дальнейшую статистическую обработку результатов.

Для определения температуры резания измеряли термоЭДС естественной термопары заготовка–резец, образующейся в процессе резания. Разность потенциалов между токосъемником на неподвижном заднем центре и изолированной державкой резца нормализовали с помощью прецизионного широкополосного усилителя с коэффициентом усиления $K_у = 100$. Усиленный сигнал поступал на второй 10-разрядный аналого-цифровой преобразователь и регистрировался с помощью программного обеспечения системы сбора данных на базе ПЭВМ.

Полученные данные представлены на рис. 3–5 и в табл. 2. До проведения экспериментов было известно, что материал инструментальной основы и геометрия всех пластин совпадают, а материалы покрытий и, соответственно, коэффициенты трения различаются. Скорость резания v изменяли от 15 до 70 м/мин при подаче $S = 0{,}1$ и $S = 0{,}3$ мм/об. Глубина резания оставалась постоянной $t = 0{,}5$ мм, что соответствует чистовым режимам обработки. Усадку стружки определяли весовым способом.

Как видно из представленных данных, при использовании различных покрытий при прочих равных условиях значения силы резания при установившемся режиме отличаются на 30...40 %, а значение температуры во всем диапазоне скоростей резания отличается примерно на 60 С, что в значительной степени влияет на формирование параметров поверхност-

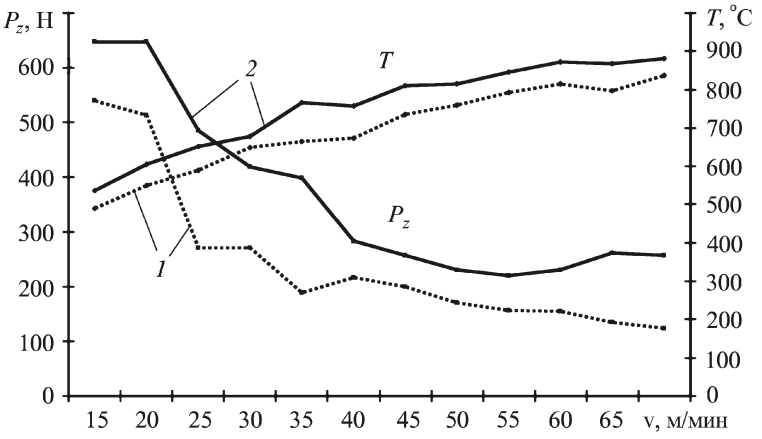


Рис. 3. Зависимости силы и температуры резания при S = = 0,1 мм/об, t = 0,5 мм:
1 – IC807; *2* – IC907

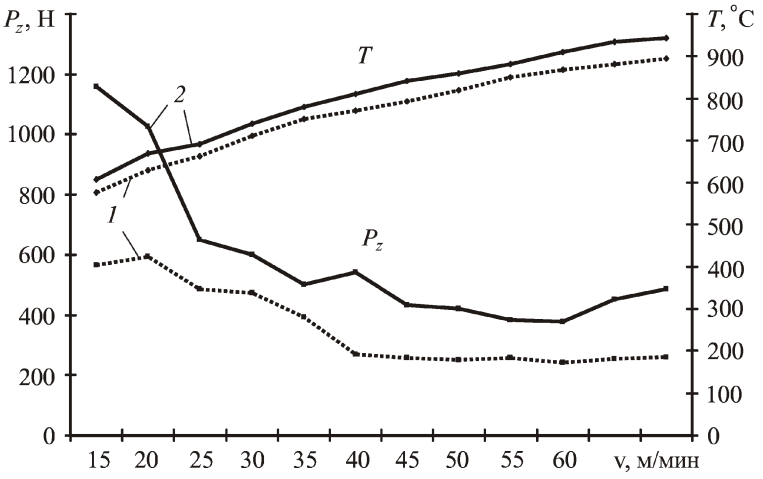


Рис. 4. Зависимости силы и температуры резания при S = = 0,3 мм/об, t = 0,5 мм (обозначения см. рис. 3)

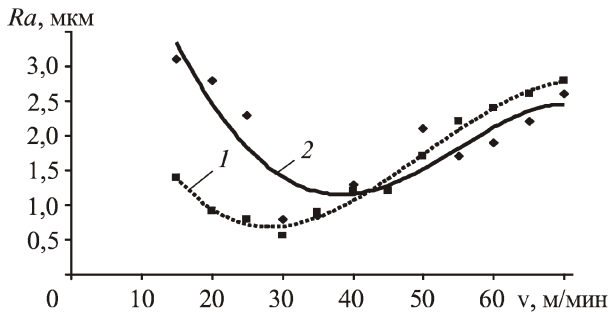


Рис. 5. Влияние скорости резания на шероховатость обработанной поверхности детали при подаче S = 0,1 мм/об (обозначения см. рис. 3)

ного слоя детали и в итоге на ее усталостную прочность.

Согласно данным компании ISCAR инструментальный сплав пластин IC908 и IC807 соответствует отечественной марке твердого сплава ВК6ОМ, поэтому для перевода значений термоЭДС в значение температуры использовали ранее полученные тарировочные графики ВК6–ЭИ437, при этом с помощью разработанного сотрудниками кафедры ТАДиОМ прибора ПНК-1 учитывали разность значений термоЭДС материалов самих покрытий. Для более корректного перевода значений термоЭДС в соответствующие им значения температур для применяемых инструментальных сплавов с учетом нанесенных на них покрытий необходимо получить соответствующие тарировочные графики.

В табл. 2 приведены значения параметров процесса резания в момент стабилизации процесса резания (по составляющей силы резания P_z). Как видно из полученных данных, значения среднего коэффициента трения, усадки стружки и угла условной плоскости сдвига значительно отличаются.

Коэффициент трения определяли по формуле С.С. Силина [2, с. 19]

$$\frac{\cos \quad \sin \quad B(\cos \quad \sin}{\cos \quad \sin \quad B(\cos \quad \sin},$$

где – передний угол резца;

$B = \mathrm{tg}\ _1$ – величина, характеризующая степень пластических деформаций металла снимаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали;

$_1$ – угол наклона условной плоскости сдвига.

При этом величину $_1$ определяли из формулы И.А. Тиме [2, с. 12] с учетом известной из опыта величины коэффициента поперечной усадки стружки:

$$K_a \quad \frac{\cos(\ _1 \quad)}{\sin\ _1}.$$

В процессе проведения экспериментов шероховатость поверхности контролировали с помощью профилометра-профилографа TR200, а твердость поверхности – ультразвуковым твердомером МЕТ-У1. При измерении шероховатости поверхностей, обработанных с подачей S = 0,1 мм/об, обнаружена характерная закономерность, представленная на рис. 5.

Таблица 2

Результаты экспериментов
(при t = 0,5 мм, γ = 5 , α = 4)

Марка пластины	S, мм/об	$v_{опт}$, м/мин	P_z, Н	Усадка стружки	Угол условной плоскости сдвига,	Средний коэффициент трения	Ra, мкм
IC807	0,1	46	210	1,4	33,1	0,24	0,8
IC907	0,1	38	260	2,45	21,4	0,52	1,2
IC807	0,3	40	310	1,1	42,3	0,1	2,2
IC907	0,3	30	490	1,5	35,4	0,3	2,5

При подаче $S = 0{,}3$ мм/об значительных колебаний шероховатости поверхности от скорости резания не обнаружено. Значение твердости обработанной поверхности во всех экспериментах составило 440 HV 0,05, что объясняется существенной погрешностью метода измерения в данных условиях.

Выводы

1. Установление качественного и количественного влияния износостойких покрытий на оптимальную температуру резания, угол условной плоскости сдвига, силы резания и другие параметры процесса резания позволяет расчетным путем определять параметры качества поверхностного слоя и оптимальные режимы резания с учетом износостойких покрытий режущего инструмента.

2. Применение оптимальных режимов резания для инструментов с покрытиями способствует повышению скорости резания и производительности обработки, так как износостойкие покрытия, обладая низким коэффициентом трения, снижают температуру резания, силы резания, способствуют увеличению угла условной плоскости сдвига стружки.

3. Использование износостойких покрытий, благоприятно влияющих на контактные параметры с точки зрения повышения оптимальных режимов резания, способствует возрастанию термомеханической напряженности режущего клина, появлению на его поверхности локальных вырывов инструментального материала, трещин и даже сколов, отслоению, что говорит о необходимости проектирования специальной геометрии инструмента с упрочненной режущей кромкой.

4. Применение износостойких покрытий с низким коэффициентом трения целесообразнее на высоких скоростях резания.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Безъязычный В.Ф., Рыкунов Н.С., Водолагин А.Л. и др.** Влияние технологических условий механической обработки на предел выносливости деталей газотурбинных двигателей. Рыбинск: РГАТА. 2007. 34 с.

2. **Силин С.С.** Метод подобия при резании материалов. М.: Машиностроение. 1979. 152 с.

3. **Табаков В.П.** Работоспособность режущего инструмента с износостойкими покрытиями на основе сложных нитридов и карбонитридов титана. Ульяновск: УлГТУ, 1998. 123 с.

4. **Табаков В.П., Власов С.Н.** Комбинированная упрочняющая обработка режущего инструмента. Дмитроград: ДИТУД. 2003. 124 с.

АНОНС

Читайте в следующем номере журнала:

Безъязычный В.Ф., Шеховцева Е.В. Контактная прочность зубьев зубчатых колес ГТД, изготовленных электроэрозионной обработкой с применением методов химико-термического упрочнения

УДК 621.793

М.А. Белоцерковский, А.В. Чекулаев *(ГНУ Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск)*
Тел.: (+37517)-284-28-63

Нанесение покрытий высокоскоростным газопламенным распылением полимерных шнуров

Представлена модель распыления полимерного шнура, подаваемого по оси высокотемпературной газовой струи. Рассмотрено формирование расплава на поверхности шнура, его удаление из зоны плавления и последующее диспергирование высокоскоростной струей. Описано тепловое и динамическое воздействия газовой струи на распыляемый материал. Установлена область параметров воздействия, обеспечивающая отсутствие деструкции полимера. На основании анализа результатов моделирования разработана оригинальная конструкция термораспылителя. Экспериментально определенны параметры зоны расплавления проволоки, отличающиеся от расчетных на 7...9 %. Сравнение покрытий из порошков и проволок показало улучшение механических свойств в случае использования проволоки с наноразмерным наполнителем.

Ключевые слова: *газопламенное напыление покрытий, полимерный шнур, высокоскоростное распыление, покрытие с нанонаполнителями.*

A model of polymer wire flame spraying at axial wire feed is represented. Stages of polymer melt forming, its removal from melting zone and subsequent atomizing were considered. Continuous level-by-level removal of polymer melt was accepted as boundary condition. Gas jet heat and dynamic influence upon atomizing material was described. An original thermal spraying gun was developed basing on modeling results analysis. Experimentally defined parameters of wire melting zone are differed from calculated ones at 7...9 %. Comparison of coatings from powder and wire showed that its mechanical properties are improved in case of wire with nano fillers.

Keywords: *flame spraying of coatings, polymer wire, high-velocity spraying, covering with nano fillers.*

Введение

В настоящее время для решения вопросов защиты поверхности деталей от абразивного, коррозионно-механического, эрозионного изнашивания, окисления, коррозионного воздействия кислот, щелочей и солей, а также для ремонта изношенных деталей с одновременным улучшением эксплуатационных свойств поверхности нашли широкое применение полимерные покрытия, наносимые на обрабатываемую поверхность методами газотермического напыления [1]. Для напыления используют как специальные марки полимерных порошков, имеющие строго регламентированный химический и гранулометрический состав, так и порошки, полученные криогенным измельчением гранул полимеров, применяемых при выпуске синтетических нитей. Однако технологии нанесения покрытий, использующие полимер в виде порошка, имеют определенные недостатки, а именно: сложность обеспечения стабильности свойств и надлежащего уровня качества покрытий; невозможность равномерного распределения в покрытии наполнителя, введенного в напыляемую шихту (особенно наноразмерных наполнителей), что обусловлено сегрегацией компонентов при смешивании и транспортировании смеси из дозирующих устройств в струю, а также сегрегацией порошковых частиц в процессе напыления. Сегрегация обусловливает неравномерность формирования структуры, снижение прочности и ухудшение эксп-

луатационных характеристик покрытий. Кроме того, при использовании порошковых материалов перед напылением необходимо производить их сушку и рассев, а при замене порошковых материалов – тщательно очищать дозирующие устройства.

Опыт газотермического напыления металлических покрытий свидетельствует о том, что указанных недостатков лишены шнуровые, проволочные или прутковые материалы. В настоящее время промышленно изготавливают, например методом экструзии, шнуры из множества термопластичных полимеров. В настоящей статье приведены результаты исследований процесса газопламенного распыления шнуров, изготовленных из полиамида и полиэтилена.

Физическая модель процесса газопламенного распыления

Несмотря на большое количество типов аппаратов для газопламенного распыления проволок, все они реализуют одну принципиальную технологическую схему, основными этапами которой являются: 1) плавление проволоки кольцевым факелом; 2) диспергирование расплава потоком сжатого газа и перенос образовавшихся частиц на напыляемую поверхность.

Однако анализ публикаций по газопламенному напылению [1–3] и проведенные исследования с применением установки проволочной термораспылительной "ТЕРКО", результаты которых приведены в табл. 1, показали, что классическая схема распыления не применима для проволок из термопластичных полимеров. Объясняется это прежде всего низкой теплопроводностью полимеров, обусловливающей аккумулирование тепла от факела на поверхности шнуров с последующей деструкцией полимерного материала.

С учетом теплофизических и реологических особенностей термопластов [4] было сформулировано основное требование к модели процесса распыления полимерных шнуров, заключающееся в необходимости непрерывного удаления с поверхности шнура образующихся

Таблица 1

Результаты распыления термопластичных шнуров на термораспылительной проволочной установке "ТЕРКО"

№	Материал проволоки, диаметр 3 мм	Показатель	
		Коэффициент использования материала, %	Максимальная скорость подачи проволоки, см/мин
1	ПА-6	20...24	30...40
2	ПЭВД	15...18	25...30

слоев расплава. Одним из возможных вариантов реализации этого условия является осуществление процесса нагрева и распыления (диспергирования) одной струей газа, обладающей энергией, способной не только расплавить полимер, но и обеспечить возникновение касательных напряжений, превышающих внутренние силы (вязкость) слоя расплава полимера. Определение необходимых и достаточных параметров струи газа является задачей теоретического анализа процесса распыления.

С физической точки зрения процесс газопламенного распыления полимерного шнура, подаваемого по оси высокотемпературной струи газа, можно рассматривать как результат одновременного воздействия на шнур теплового потока и динамического напора со стороны струи газа.

При подаче шнура в высокотемпературную струю газа между ними происходит конвективный теплообмен, и струя газа, имеющая плотность теплового потока q, передает тепловую энергию шнуру. По мере нагрева тепловое движение макромолекул полимера ослабляет силы межмолекулярного взаимодействия и полимер из стеклообразного физического состояния (твердое), проходя высокоэластическое состояние (твердое), переходит в расплавленное вязкотекучее состояние (жидкое). Толщина слоя расплава на поверхности шнура увеличивается до тех пор, пока касательные напряжения, возникающие вследствие симметричного обтекания шнура струей газа, не превысят вязкостный показатель этого слоя

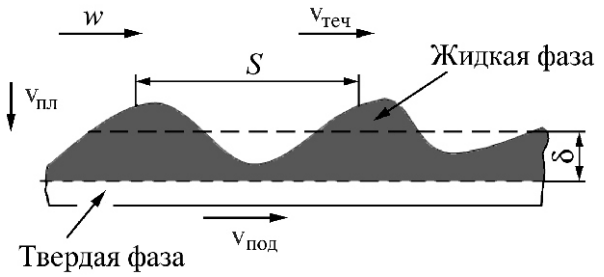


Рис. 1. Схема течения расплава

(рис. 1). Макромолекулы начинают скользить по направлению приложения касательных напряжений. Симметричное воздействие касательных напряжений и значительное превышение внутримолекулярных над межмолекулярными связями молекул расплава вызывает его вытягивание в нить. При достижении предельного значения вытягивания нить механически разрывается и уносится струей. Формирование покрытия происходит из кусочков нитей путем их перехлестывания и сплавления макромолекул в местах контакта.

Энергия газовой струи, передаваемая расплаву, должна быть ограничена вследствие специфики физических свойств термопластичных полимеров. С одной стороны, ее должно быть достаточно для удаления слоя расплава малой толщины, поскольку по мере возрастания толщины слоя расплава поток тепла в расплав полимера и скорость его плавления быстро уменьшаются [4]. С другой стороны, избыток тепловложения приводит к деструкции полимера, что резко снижает качество покрытия.

В ходе дальнейшего анализа были сделаны следующие допущения:

1) на участке L (зона плавления шнура) параметры газового потока постоянны;

2) гравитационные силы пренебрежимо малы;

3) расплав – несжимаемая жидкость;

4) шнур – сплошная однородная среда.

Математическая модель процесса газопламенного распыления

В связи с тем, что в зоне плавления шнура струя газа оказывает не только тепловое, но и динамическое воздействие, важно определить взаимосвязь между теплофизическими и динамическими параметрами струи. При этом параметры должны обеспечить требуемое качество покрытий и максимальную производительность. Очевидно, что этому условию соответствует равенство скоростей подачи шнура и удаления расплава.

Скорость удаления расплава при условии постоянства параметров струи газа на участке L определяется выражением

$$v_{теч} \quad (\quad _{мф} \quad _{min})/(2 \quad _2), \qquad (1)$$

где $_{мф}$ – касательное напряжение на границе раздела фаз, Па;

$_{min}$ – минимальная толщина слоя, при которой возможно удаление (течение) расплава, м;

$_2$ – динамическая вязкость расплава, Па с.

За время t струя газа с плотностью теплового потока q сообщает проволоке через поверхность $F = 2 \quad r \quad L$ количество тепла

$$Q \quad 2 \quad qrt \quad L, \qquad (2)$$

где r – радиус проволоки, м.

Время $t = (L \quad _{min})/(rv_{под})$, откуда $Q = (2 \quad qrL \quad _{min} \quad L)/(rv_{под})$.

Разделив полученное выражение на удельную теплоту плавления полимера C, получим массу расплава, образующегося за время t:

$$m \quad (2 \quad qrL \quad _{min} \quad L)/rv_{под}C), \qquad (3)$$

где C – удельная теплота плавления полимера, Дж/кг.

Объем расплава $V_{распл} = m/ \quad _2$. Подставив в это выражение уравнение (3), получим

$$V_{распл} \quad (2 \quad _{min}q \quad L \quad L)/(C \quad _2v_{под}). \qquad (4)$$

Помимо этого, объем расплава можно определить как

$$V_{распл} \quad V_{пр} \quad V_{тв},$$

где $V_{пр} = r^2 \quad L$ и $V_{тв} = (r - \quad _{min})^2 \quad L$ – объем проволоки и объем твердой (нерасплавлен-

ной) фазы проволоки на участке L соответственно. Таким образом

$$V_{\text{распл}} \quad L(2 \quad {}_{\min} r \quad {}^{2}_{\min}). \qquad (5)$$

Приравняв (4) и (5), сделав необходимые преобразования, получим

$$_{\min} \quad 2r \quad (2qL)/(C \quad {}_{2}\text{v}_{\text{под}}). \qquad (6)$$

Подставив (6) в (1), получим квадратное уравнение $\text{v}^{2}_{\text{под}} \quad \frac{\text{мф}}{2} r\text{v}_{\text{под}} \quad \frac{\text{мф} qL}{{}_{2}C \quad {}_{2}} \quad 0$, откуда

$$\text{v}_{\text{под}} \quad \frac{\text{мф} r}{2 \quad {}_{2}} \quad \sqrt{\frac{\text{мф} r}{2 \quad {}_{2}}^{2} \quad \frac{\text{мф} qL}{{}_{2}C \quad {}_{2}}}.$$

Так как $< r$, то решению будет соответствовать знак "–":

$$\text{v}_{\text{под}} \quad \frac{\text{мф} r}{2 \quad {}_{2}} \quad \sqrt{\frac{\text{мф} r}{2 \quad {}_{2}}^{2} \quad \frac{\text{мф} qL}{{}_{2}C \quad {}_{2}}}. \qquad (7)$$

Из условия $\frac{r}{2}^{2} \quad \frac{qL}{C} \quad 0$ получим соотношение теплофизических и динамических параметров газового потока в зоне плавления проволоки L:

$$_{\text{мф}} \quad \frac{4 \quad {}_{2}Lq}{r^{2}C \quad {}_{2}} \text{ или } q \quad \frac{r^{2}C \quad {}_{\text{мф}} \quad {}_{2}}{4 \quad {}_{2}L}. \qquad (8)$$

Касательное напряжение $_{\text{мф}}$ на границе раздела фаз зависит от режима течения газа (от числа Рейнольдса $\text{Re} \quad \frac{2R_{\text{т}} w_{1}}{}$).

Для ламинарного режима течения газа ($\text{Re} < 2\ 10^{3}$):

$$_{\text{мф}} \quad \frac{4w_{1} \quad {}_{1}}{R_{\text{т}}}. \qquad (9)$$

Для турбулентного режима течения газа ($2\ 10^{3} < \text{Re} < 10^{5}$):

$$_{\text{мф}} \quad 0{,}03 \quad {}_{1}w_{1}^{1,75} \quad \frac{}{R_{\text{т}}}^{0,25}, \qquad (10)$$

где w_1 – скорость газового потока, м/с;

– кинематическая вязкость газового потока, м^2/с;

$_1$ – динамическая вязкость газового потока, Па с;

$R_{\text{т}}$ – радиус сопла термораспылителя, м.

Таким образом, если подставить уравнения (9) и (10) в (7), получим:

для ламинарного режима течения газа

$$\text{v}_{\text{под}} \quad \frac{2w_{1} \quad {}_{1}r}{{}_{2}R_{\text{т}}} \quad \sqrt{\frac{2w_{1} \quad {}_{1}r}{{}_{2}R_{\text{т}}}^{2} \quad \frac{4w_{1} \quad {}_{1}q_{1}L}{{}_{2} \quad {}_{2}R_{\text{т}}}}, \qquad (11)$$

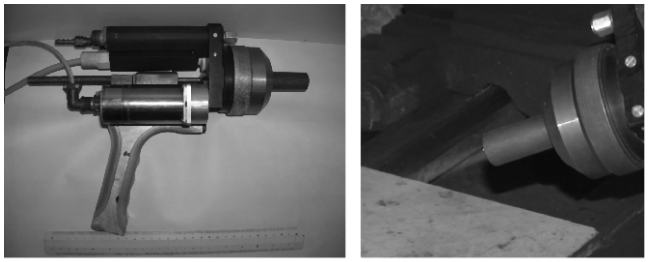
для турбулентного режима течения газа

$$\text{v}_{\text{под}} \quad \frac{0{,}015 \quad {}_{1}w_{1}^{7/4} r}{{}_{2}} \quad \frac{}{R_{\text{т}}}^{1/4} \quad \sqrt{\frac{0{,}015 \quad {}_{1}w_{1}^{7/4} r}{{}_{2}} \quad \frac{1}{R_{\text{т}}}^{1/4}}^{2} \quad \frac{0{,}015 \quad {}_{1}w_{1}^{7/4} r}{{}_{2}} \quad \frac{}{R_{\text{т}}}^{1/4} \quad \frac{q_{1}L}{{}_{2} \quad {}_{2}}. \qquad (12)$$

Экспериментальные исследования

Расчеты показали, что соотношение теплофизических и динамических параметров газового потока по условию (8) реализуется при использовании высокотемпературной струи газа, ускоренной до значений, превышающих скорость звука. Для реализации этого условия предложено использование микрофакельного сжигания пропано-воздушной смеси в камере сгорания специальной конструкции, применяемой в установках гиперзвуковой электрометаллизации [5].

Был разработан способ газопламенного распыления полимерных шнуров [6] и термораспылитель для его реализации (рис. 2) [7]. Установка обеспечивает скорость струи газа около 1 км/с (определено расчетом при давлении и температуре газа в камере сгорания: $P_{\text{к}}$ = 0,4 МПа, $T_{\text{к}}$ = 1600 К) и плотность теплового потока 50 кВт/м^2 (определено калориметрическим зондом).



а) *б*)

Рис. 2. Проволочный термораспылитель:
а – внешний вид; *б* – процесс напыления

Для экспериментальных исследований применяли полимерный шнур диаметром 3 мм из полиамида ПА-6 (C = 270 10^3 Дж/кг, = = 110 Па с, G = 0,015 Дж/м^2, a = 1,2 10^{-7} м^2/с, 0,3 Вт/(м град)) [8]. Выражение для необходимой длины зоны плавления шнура L, при которой исключено отделение нерасплавленных кусков шнура, получено экспериментально [9]:

$$L \quad \frac{Zd}{4a} \quad \frac{T_{пл}}{q} \quad ^{2}, \qquad (13)$$

где d – диаметр шнура, м;

Z – показатель, характеризующий процесс теплообмена между материалом и источником тепла в единицу времени (для полимеров Z = = 5, с $^{-1}$).

Согласно (13) скорость подачи шнура $v_{под}$ составляет 0,019 м/с. Экспериментами установлено, что устойчивое и качественное плавление обеспечивается при $v_{под}$ = 0,021 м/с. Дальнейшее увеличение $v_{под}$ приводит к отделению нерасплавленного шнура из области L. Таким образом, расхождение теории и эксперимента составляет не более 9,5 %.

На основании экспериментальных данных, используя выражение (12), построен график зависимости скорости подачи шнура, обеспечивающей качественное распыление, от теплофизических и динамических параметров струи (рис. 3).

Для оценки изменения структуры полимера, подвергаемого газотермическому воздействию, применяли метод *инфракрасной спектроскопии* (ИКС). На рис. 4 приведен спектр полиамида в шнуре и в покрытии, из которого следует, что число характеристических полос поглощения атомных групп и положение максимумов совпадает, изменяется лишь при некоторых волновых числах их интенсивность.

Изменение интенсивности поглощения основных линий свидетельствует об образовании С=О групп. Можно предположить о наличии незначительной окислительной деструкции поверхности по-

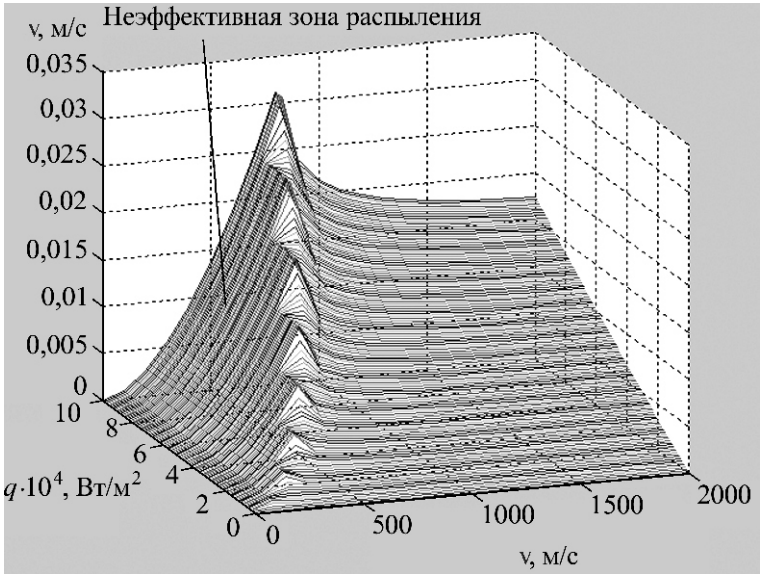


Рис. 3. Зависимость скорости подачи шнура из полиамида ПА-6 от плотности теплового потока *q* и скорости течения продуктов сгорания *w*

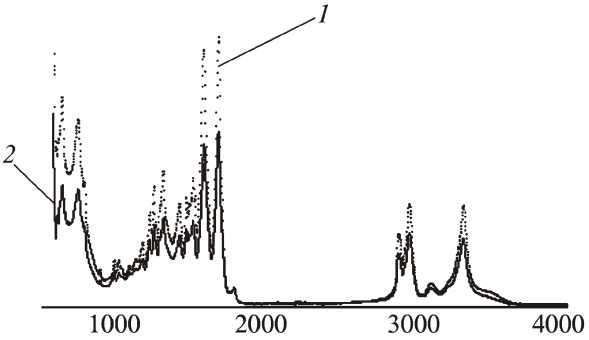
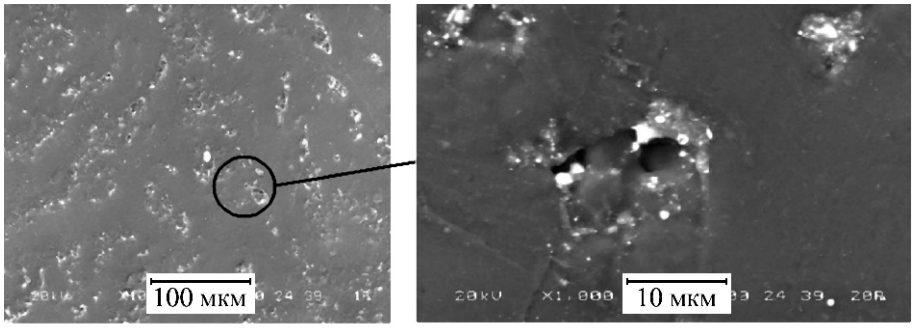


Рис. 4. Инфракрасный спектр полиамида ПА-6:
1 – в проволоке; *2* – в покрытии



а) *б*)

Рис. 5. Морфология полимерного покрытия, нанесенного газопламенным высокоскоростным распылением шнура из полиамида ПА-6 (мощность теплового потока 30 кВт/м^2)

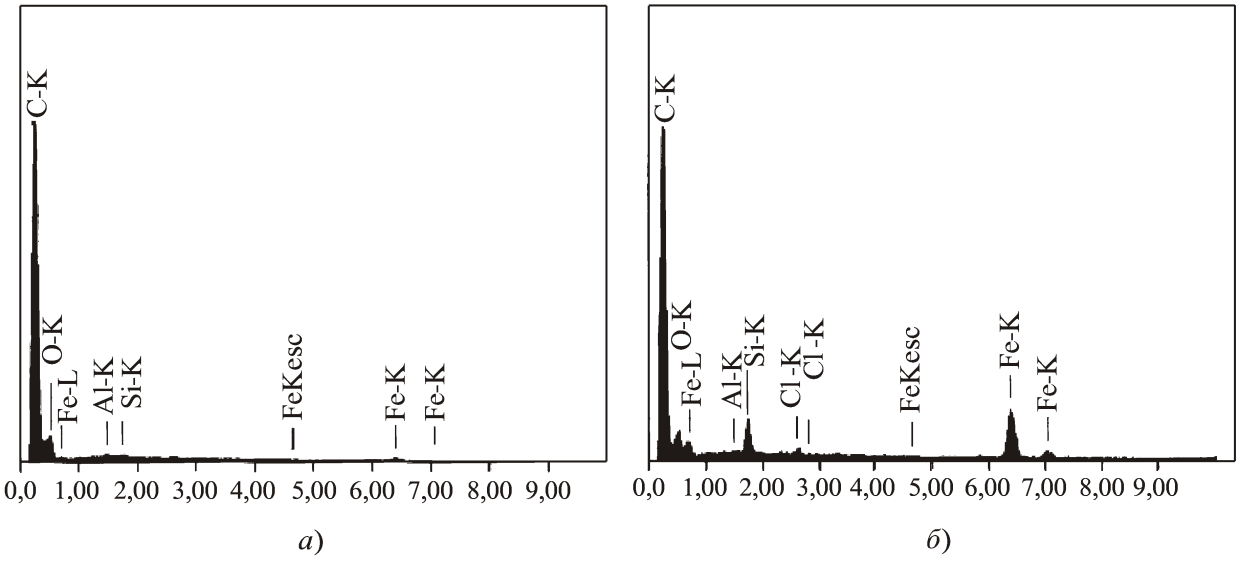
крытия, которая неизбежна при газотермическом формировании полимерных покрытий.

Исследование морфологии покрытий (рис. 5) проводили на сканирующем электронном микроскопе JSM-5610 LV с системой химического анализа EDX JED-2201. Установлено, что количество и размер образующихся воздушных пузырей в покрытии зависит от тепловой мощности газопламенной струи. При низкой мощности пузырей меньше, но они более крупные по величине. Было определено, что в поверхностных слоях (0...50 мкм от поверхности покрытия) содержание кислорода больше на 20...30%, чем во внутренних (100...200 мкм) (рис. 6).

На установке газопламенного напыления порошковых полимеров [10] с использованием разработанного термораспылителя были проведены сравнительные испытания газопламенных покрытий. Результаты показали, что введение в полимер наноразмерного углеродного наполнителя (алмазографитовый материал УДАГ) улучшает качество покрытия, причем использование шнура дает лучшие результаты, в сравнении с порошком (табл. 2).

Выводы

1. Предложен метод формирования полимерных покрытий газопламенным распылением полимерных шнуров высокоскоростной струей. Теоретически установлены и экспериментально подтверждены величины теплофизических и динамических параметров струи, обеспечивающие распыление полимерных шнуров, исключая значительную деструкцию полимера.



а) *б*)

Рис. 6. Содержание кислорода в покрытии:
а – в поверхностном слое (0...50 мкм, 19,89 % мас.); *б* – во внутреннем слое (100...200 мкм, 14,54 % мас.)

Таблица 2

Свойства полимерных покрытий с наноразмерным наполнителем

Исследуемая характеристика		Значения для покрытий из различных материалов		
		Порошок Rilsan, 200+50 мкм	Порошок ПА-6, 200+50 мкм + + углеродный наполнитель, 5+5 мкм	Шнур ПА-6, d = 3 мм + + углеродный наполнитель, 5+5 мкм
Прочность сцепления на отрыв, МПа		7,2...7,7	8,3...8,6	9,5...10,1
НВ, МПа		70	80	80
Коэффициент сухого трения, v = 0,65 м/с	P = 10 МПа	0,20	0,15	0,13
	P = 5 МПа	0,25	0,08	0,07

2. Разработана оригинальная конструкция термораспылителя, включающая в себя высокоскоростной факел пропано-воздушного пламени для распыления полимерных шнуров. Показано, что при газопламенном нанесении полимерных покрытий с наноразмерным наполнителем наиболее эффективно в качестве расходного материала использовать шнуры, так как при этом достигается более высокое качество покрытий.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Белоцерковский М.А.** Технологии активированного газопламенного напыления антифрикционных покрытий. Минск, 2004. 200 с.

2. **Кречмар Э.** Напыление металлов, керамики и пластмасс. М.: Машиностроение, 1966. 432 с.

3. **Хасуи А., Моригаки О.** Наплавка и напыление. М.: Машиностроение, 1985. 239 с.

4. **Тадмор З., Гогос К.** Теоретические основы переработки полимеров. М.: Химия, 1984. 632 с.

5. **Способ** газопламенного напыления полимерных покрытий. Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В. Патент BY 10711 C1. 2008.

6. **Белоцерковский М.А., Прядко А.С., Черепко А.Е.** Технологические особенности и области использования гиперзвуковой металлизации // Инновации в машиностроении: сборник научн. трудов. (Минск, 30–31 октября 2008 г.) / Редкол.: М.С. Высоцкий [и др.]. Минск: ОИМ НАН Беларуси. 2008. С. 479–484.

7. **Устройство** для газопламенного напыления проволочных материалов. Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В. Патент BY № 2996, опубл. 30.08.2006 г.

8. **Ван Кревелен Д.В.** Свойства и химическое строение полимеров. М.: Химия, 1976. 415 с.

9. **Белоцерковский М.А., Чекулаев А.В.** Исследование процесса нанесения защитных покрытий, получаемых газотермическим распылением полимерных экструдатов // Сварка и родственные технологии. Минск, 2005. № 7. С. 77–80.

10. **Белоцерковский М.А.** Активированное газопламенное напыление покрытий порошками полимеров // Упрочняющие технологии и покрытия. 2007. № 6. С. 19–23.

УДК 621.793.79

Ж.М. Бледнова, П.О. Русинов *(Кубанский государственный технологический университет, г. Краснодар)*
Тел./факс: (861) 2534997
E-mail: blednova@mail.ru

Формирование наноструктурированных поверхностных слоев из материалов с памятью формы на основе TiNi плазменной наплавкой[1]

Рассмотрен комбинированный метод формирования наноструктурированных поверхностных слоев из материалов с эффектом памяти формы, включающий плазменное нанесение поверхностного слоя и последующую двухступенчатую термомеханическую обработку с промежуточным отжигом. Разработана универсальная установка, позволяющая выполнить весь цикл обработки. Установлены управляющие параметры и рекомендованы оптимальные режимы обработки, обеспечивающие формирование наноструктурированного поверхностного слоя с эффектом памяти формы. Показана возможность и экономическая целесообразность использования поверхностного модифицирования деталей материалами с эффектом памяти формы.

Ключевые слова: *наноструктурированные покрытия, память формы, никелид титана, плазменная наплавка, плазматрон, аморфные покрытия, термомеханическая обработка, свойства, температура превращения, мартенсит, аустенит, фаза, кристаллическая решетка, плазмообразующий газ, отжиг.*

The combined method of formation nanostructure blankets from materials with SMA, including plasma drawing of a blanket and the subsequent two-level thermomechanical processing with intermediate annealing is considered. The universal installation is developed, allowing to execute all operation cycle. Operating parametres are established and the optimum modes of processing providing formation nanostructure of a blanket with SMA are recommended. On an example thermomechanical operated demountable connection possibility and economic feasibility of use of superficial modifying of details by materials with SMA is shown.

Keywords: *nanostructure coverings, memory of the form, nikel the titan, plasma facing, plasma generator, amorphous coverings, thermomechanical processing, properties, transformation temperature, martensite, austenite, a phase, a crystal lattice, plasma gas, annealing.*

Введение

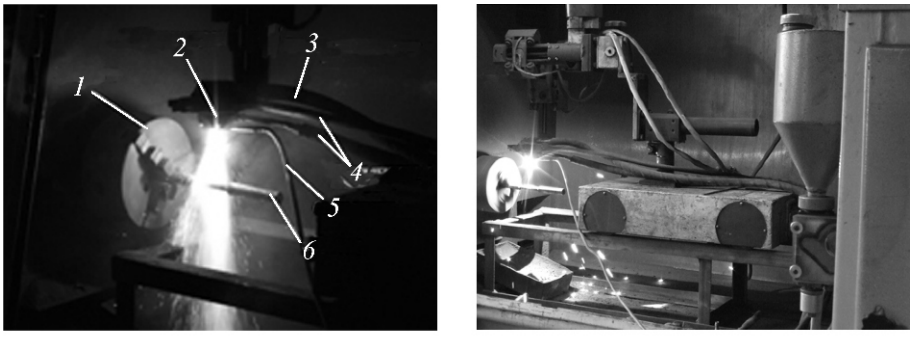
Расширяющееся практическое применение сплавов с *эффектом памяти формы* (ЭПФ) на основе никелида титана в различных областях техники, таких как авиа- и автомобилестроение, медицина, приборо- и машиностроение, космическая техника выдвигает на первый план не только непрерывно повышающиеся требования к обеспечению функциональных свойств, но и требования ресурсосбережения [1, 2]. Поэтому задача создания поверхностно-модифицированных слоев из материалов с ЭПФ, обеспечивающих функционально-механические характеристики объемного материала с памятью, доведенных до уровня, приемлемого для практического использования в деталях машин и элементах конструкций является и в обозримом будущем останется актуальной [3]. Для формирования поверхностно-модифицированных слоев из сплавов с ЭПФ на основе TiNi используется метод термического переноса масс, аргонно-дуговая и лазерная наплавка [4–8]. Одним из перспективных методов формирования поверхностных слоев является плазменное напыление [9].

Известно, что традиционные методы обработки материалов с ЭПФ приводят к формированию в сплавах развитой дислокационной субструктуры. Дополнительные возможности повышения комплекса функциональных свойств TiNi заключаются в применении к ним нетрадиционных схем комбинированной обработки, включающей *термическую обработку* (ТО) и интенсивное *поверхностное пластическое деформирование* (ППД), приводящих к формированию нанокристаллической или аморфной структуры. В этом направлении в последнее время получены многообещаю-

[1]Работа выполнена при поддержке грантов РНП 2.1.2.4958 (02.14.80) 2006–2008 гг.; РНП 2.1.2/6702 министерства образования и науки Российской Федерации.

щие результаты [10, 11]. Представляет интерес разработка ресурсосберегающих технологий формирования поверхностных наноструктурированных слоев из материалов с ЭПФ и исследование их функционально-механических свойств.

Цель работы – исследование возможностей формирования наноструктурированных поверхностных слоев из сплавов системы TiNi с помощью плазменной наплавки и последующей поэтапной *термомеханической обработки* (ТМО) для обеспечения функционально-механических свойств и создания экономичных функциональных материалов и деталей на их основе.



а) *б*)

Рис. 1. Плазменная наплавка сплава с ЭПФ TiNi (*а*); устройство для перемещения плазматрона (*б*):
1 – патрон; *2* – плазматрон ПП-25; *3* – подача плазмообразующих газов; *4* – шланги охлаждения плазматрона водой; *5* – подача порошка; *6* – образец

Материалы и методы исследования

Исследования проводили на конструкционных сталях 45 и 40Х. Плазменную наплавку TiNi осуществляли на универсальной плазменной установке на цилиндрические образцы (диаметр 10 мм, длина 50 мм) при угле наклона плазматрона 46 (рис. 1). В качестве плазмообразующего газа использовали смесь аргона и азота. В качестве материала для поверхностного модифицирования использовали порошок никелида титана марки ПН55Т45 (НПО "Тулачермет"). Размер частиц порошка составлял 0,1...20 мкм. Для наилучшей прочности сцепления покрытия с основой на сталь наносили подслой из порошка никеля марки ПНК1-ВЛ7.

Изучение размера частиц порошка ПН55Т45 показало, что их строение одинаково: форма покоробленных перфорированных чешуек наиболее ярко выражена в крупных частицах (рис. 2). Благодаря таким особенностям порошки TiNi в состоянии утряски имеют биполярную структуру, она представлена очень мелкими внутричастичными и крупными межчастичными порами. Установлено, что исходный размер частиц порошка оказывает существенное влияние на свойства формируемого слоя. Анализ дифрактограммы порошка ПН55Т45 показал, что его структура состоит преимущественно из аустенитной фазы (~ 95 %) с небольшим количеством мартенситной фазы (~ 5 %) (рис. 2). Перед плазменным напылением порошок ПН55Т45 просушивали в

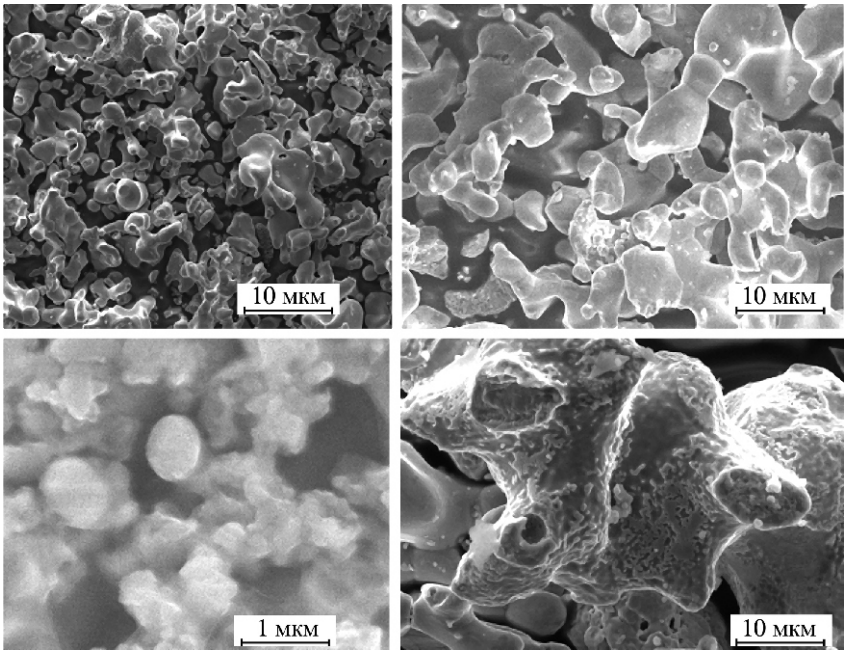


Рис. 2. Морфология частиц порошков марки ПН55Т45

вакуумном сушильном шкафу в течение 3...6 ч при температуре 120...180 С на противнях из нержавеющей стали при толщине засыпки до 25 мм. Для повышения прочности сцепления покрытия с основой проводили предварительную дробеструйную обработку поверхности стали с последующим ее травлением 15 %-ным раствором азотной кислоты.

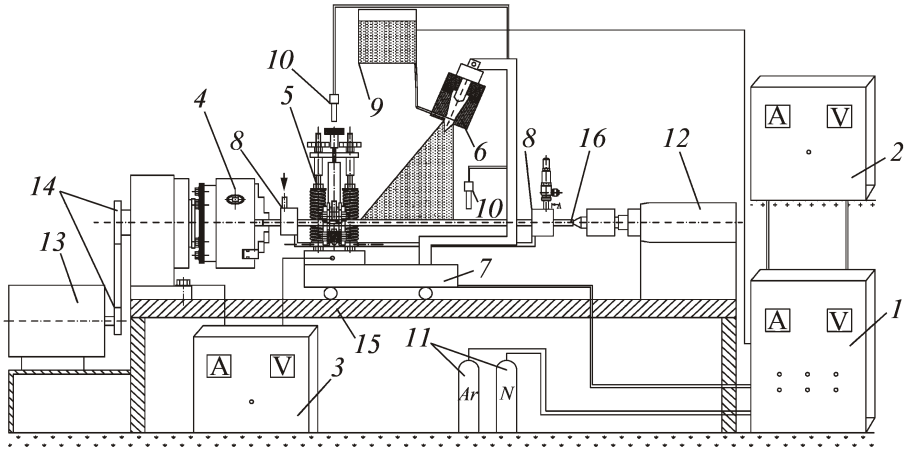


Рис. 3. Модернизированная установка для комбинированного получения наноструктурированных покрытий с ЭПФ

Измерения микротвердости проводили на приборе ПМТ-3 при нагрузке на индентор 100 г. Структуру и фазовый состав поверхностного слоя исследовали методами рентгеноструктурного анализа и световой микроскопии. Рентгенофазовый анализ проводили на приборе Shimadzu XRD–7000 в CuK -излучении. Исследование микроструктуры проводили на растровом электронном микроскопе сверхвысокого разрешения JSM–7500F, измерительном микроскопе ИМЦ-100, оптических микроскопах МИМ-8 и NU-2E (Carl Zeiss Jena) с планохроматическими объективами. При металлографическом анализе стальных образцов с поверхностно-модифицированным слоем TiNi использовали соответствующие травители: HNO_3 (0,5 мл), HCl (1 мл), глицерин (1...2 мл); $CuSO_4$ (1 г), HCl (5 мл), H_2O (5 мл); HNO_3 (10...20 мл), HF (10...20 мл), глицерин (20...60 мл).

Технология получения наноструктурированных поверхностных слоев из сплава с ЭПФ

Формирование поверхностных наноструктурированных слоев из материалов с ЭПФ проводили на модернизированной установке УПУ-3Д, позволяющей осуществлять последующую поэтапную ТМО (рис. 3).

Комбинированный процесс получения наноструктурированных слоев из материалов с ЭПФ осуществляли следующим образом: упрочняемую деталь *16* устанавливали в патроне *4* и в задней бабке *12*, которые закрепляли на раме *15*. Посредством электродвигателя *13*, шкивов *14* системе придавали вращательное движение. При помощи источника питания *2* и блока управления *1* производили включение устройства для перемещения плазматрона *6* и поджиг плазменной дуги. Одновременно производили включение порошкового дозатора *9* для подачи порошка из материалов с ЭПФ в плазменную струю. Измерение температуры упрочняемой детали перед фронтом плазменной дуги и в зоне ППД осуществляли пирометрами *10*. На устройстве для перемещения *7* плазматрона *6* закрепляли трехроликовое приспособление *5*, с помощью которого сразу после плазменного напыления проводили ППД. Напыление покрытия производили плазматроном *6*, расположенным под углом 46...50 . На обрабатываемой детали устанавливали приспособление *8* для подачи жидкого азота с целью охлаждения детали с поверхностным слоем из материалов с ЭПФ в случае отрицательного интервала температур мартенситных превращений полученного слоя. ППД осуществляли сразу после плазменного напыления в два этапа: на первом этапе в интервале температур 1073...1273 К, на втором – в интервале температур мартенситных превращений (M_s–M_f). В случае охлаждения детали с покрытием из сплава с ЭПФ после плазменного напыления до температуры менее 1073 К для разогрева детали до указанной температуры использовали сварочный трансформатор *3*.

Результаты исследований и их обсуждение

В процессе отработки технологии поверхностного модифицирования сталей 45 и 40Х никелидом титана при непосредственном плазменном напылении на сталь наблюдали дефекты в виде растрескивания и отшелушивания. Опыты по определению прочности сцепления покрытия с основой привели к неудовлетворительным результатам, что объясняется разницей в коэффициентах термического расширения титана и стали (порядка 8,3 и 16). Для устранения этого недостатка на поверхность наносили промежуточный слой никеля, имеющий неограниченную растворимость с железом и обладающий сродством к большинству частиц второй фазы, что привело как к повышению прочности сцепления покрытия с основой, так и к снижению дефектности.

Согласно многочисленным исследованиям [10, 11] основной причиной дефектности плазменных покрытий являются оксидные слои на границах раздела поверхностный слой–основа. Поскольку при плазменном напылении покрытие формируется путем послойной укладки затвердевших капель расплава, то оксидные слои по границам между затвердевшими каплями расплава могут стать причиной дефектности и снижения функциональных свойств. Металлографические исследования шлифов покрытий, полученных плазменным напылением, показали, что при прохождении частиц порошка через аргонно-азотную плазму они нагреваются и при ударе об основу затвердевают в виде деформированных дисков, которые имеют диаметр 10...30 мкм и толщину 2...3 мкм. Основными функциональными параметрами, характеризующими свойства плазменных покрытий, являются прочность сцепления покрытия с основой, пористость, структура и фазовый состав.

Проведенный предварительный анализ показал, что к основным параметрам плазменного напыления, влияющим на структуру и качество покрытия, следует отнести: величину тока дуги, напряжение, расход и состав плазмообразующего газа, расход порошка и транспортирующего газа, дистанцию напыления, угол напыления, скорость перемещения и подачу плазматрона, скорость вращения обрабатываемой детали. Проведенные исследования показали, что при плазменном формировании поверхностного слоя с ЭПФ на основе TiNi наилучшее качество покрытия достигается при использовании в качестве плазмообразующего газа смеси аргона (70...80 %) и азота (20...30 %) (рис. 4). При этом увеличивается прочность сцепления покрытия с основой на 30...40 %, когезионная прочность, снижается уровень остаточных напряжений и пористость покрытия TiNi [9].

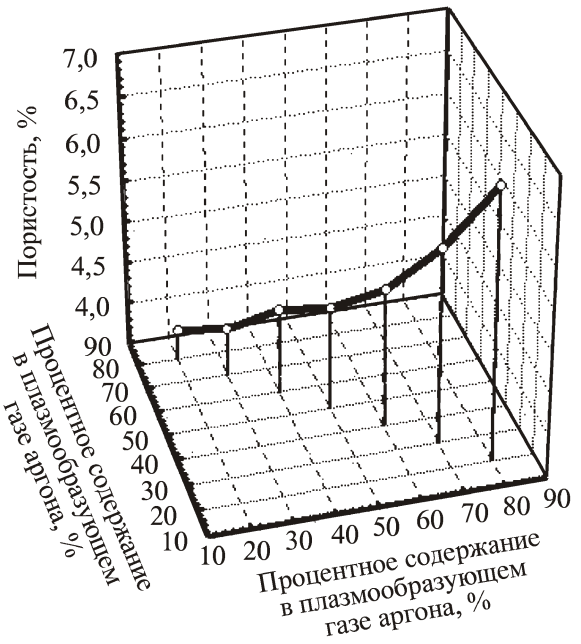


Рис. 4. Влияние состава плазмообразующих газов на пористость покрытия с ЭПФ TiNi

Макроанализ поверхностных слоев сплава TiNi, полученного по отработанной технологии, показал, что структура покрытия достаточно плотная с минимальным содержанием и размерами пор. Граница раздела между покрытием TiNi и основным материалом без видимых трещин. При комнатной температуре основными структурными составляющими поверхностного слоя TiNi являются: аустенитная B2-фаза с кубической решеткой, мартенситная фаза B19 с моноклинной решеткой и

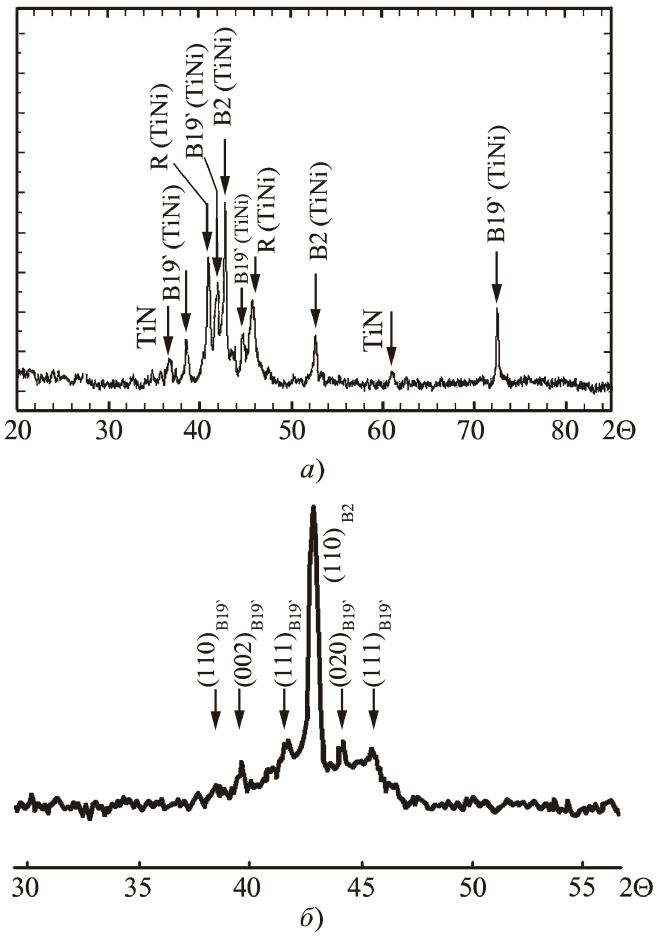


Рис. 5. Рентгенограмма поверхности никелида титана, полученного плазменной наплавкой, δ = 1 мм (*а*); порошка ПН55Т45 (*б*)

промежуточные фазы R с ромбоэдрической решеткой, в небольшом количестве отмечено наличие нитрида титана (TiN) менее 1 % (рис. 5).

Как показал металлографический анализ, структура формируемых в результате плазменного напыления слоев сплава TiNi имеет крайне слабую травимость обычными реактивами вследствие сильного измельчения зерна (рис. 6). Исследование микроструктуры поверхностного слоя TiNi на растровом электронном микроскопе высокого разрешения показало, что TiNi покрытие на 70...80 % имеет ультрамикрокристаллическую структуру с размером зерна 40...120 нм, а 20...30 % составляет аморфное состояние покрытия (рис. 7, 8). Во многом образование такого покрытия связано с особенностями плазменного напыления (высокая скорость соударения частиц с материалом основы, высокая скорость их охлаждения и быстрая закалка сплава). Кроме того, вероятно, присутствующий в покрытии TiN играет роль ультрамелкодисперсных включений – модификаторов, температура плавления которых много выше температуры плавления никелида титана. Это приводит к измельчению структуры, поскольку твердые частицы TiN являются центрами кристаллизации (рис. 7). Измельчение зерна, в свою очередь, приводит к уменьшению объемной концентрации пор на 18...24 % и формированию более плотных границ раздела.

Для всех исследованных образцов наблюдалось повышенное значение микротвердости наплавленного слоя никелида титана по сравнению с микротвердостью основного металла. Распределение микротвердости по глубине слоя TiNi после плазменной наплавки на стали 45 представлено на рис. 9. Микротвердость TiNi-слоя колеблется в пределах H = = 8,2...11,8 ГПа. Такое повышение микротвердости объясняется образованием высокопроч-

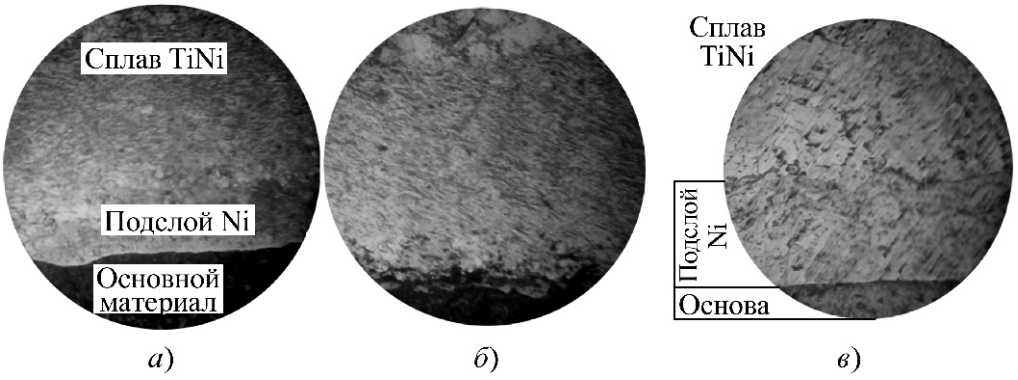


Рис. 6. Поверхностные слои TiNi после плазменного напыления на стали: 40Х (*а*, *б*); 45 (*в*), 400

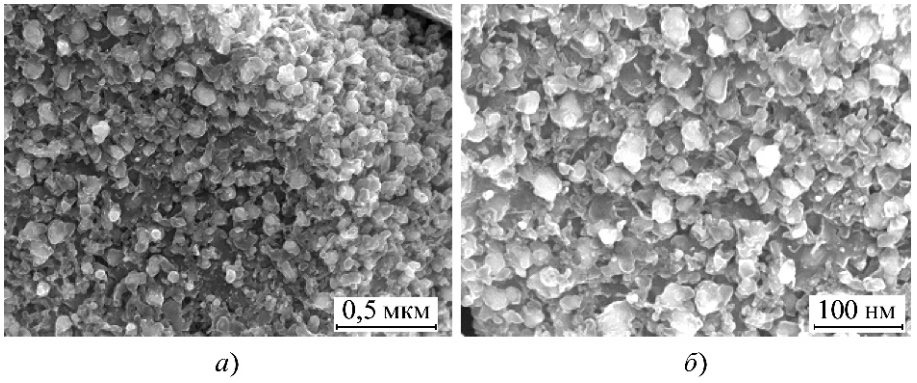


Рис. 7. Наноструктурированное TiNi покрытие, полученное плазменным напылением:
а – 27000; *б* – 37000

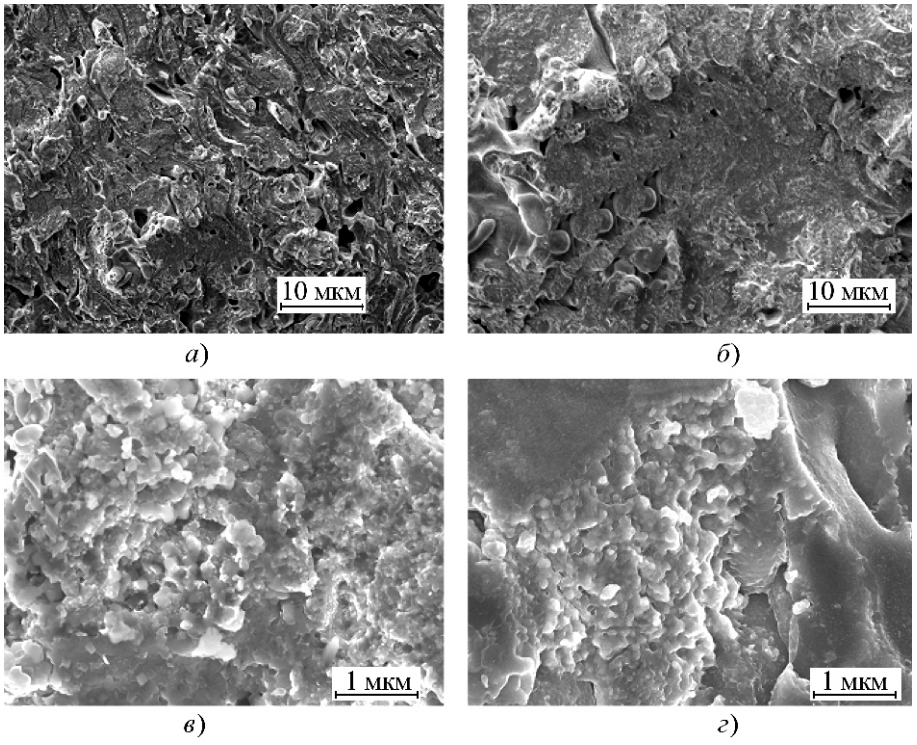


Рис. 8. Микроструктура TiNi покрытия, полученного плазменным напылением:
а – 650; *б* – 1700; *в* – 6000; *г* – 10000

ной, метастабильной структуры вследствие высоких скоростей охлаждения и быстрой закалки сплава.

Термическая и термомеханическая обработка поверхностных слоев из материалов с ЭПФ на основе TiNi

Функциональные свойства поверхностных слоев из материалов с ЭПФ являются структурно-чувствительными, что позволяет эффективно управлять ими как варьированием параметров при формировании поверхностного слоя, так и с помощью последующей ТО и ТМО. Разрабатываемая технология формирования поверхностно-модифицированного слоя из материала с ЭПФ на основе TiNi с использованием плазменного напыления ЭПФ представляет собой многостадийный процесс, на каждом этапе которого совершенствуются параметры функционально-механических свойств. Одним из таких этапов являются термические операции. Плазменная наплавка TiNi приводит к высокой плотности дефектов кристаллической решетки и возникновению внутренних напряжений (напряжения первого рода), причем их величина и характер определяются составом наплавляемых материалов и условиями наплавки. Внутренние напряжения, препятствуя подвижности границ двойникования, могут приводить к снижению функционально-механических свойств получаемых слоев, а также к растрескиванию или отслаиванию покрытий от основы. При гомогенизационном либо рекристаллизационном отжиге происходит частичная или полная релаксация внутренних остаточных напряжений, что способствует усовершенствованию характеристик памяти фор-

мы. Поэтому при поверхностном модифицировании поверхностных слоев материалами с ЭПФ в качестве промежуточной операции проводили отжиг – термическую обработку (ТО), в результате которой происходит стабилизация структуры покрытия TiNi и улучшение свойств памяти при уменьшении остаточных напряжений после наплавки. Отжиг проводили при температуре 1073 К в инертной среде (аргон) в течение 1 ч с последующим охлаждением с печью.

ТО оказывает существенное влияние как на структуру покрытия, так и на структуру стали. Рентгенофазовый и металлографический анализ поверхностных слоев TiNi после отжига при температуре 1073 К показал увеличение B2-фазы, при этом исчезает мартенситная фаза B19 с моноклинной решеткой и промежуточные R-фазы с ромбоэдрической решеткой, а также уменьшается содержание TiN, обнаруженное в небольшом количестве после плазменного напыления (рис. 10). Рентгенофазовый анализ показал либо отсутствие TiN в покрытии TiNi, либо небольшое его содержание, не превышающее 0,5 %.

После отжига наблюдается увеличение размера зерна в 2–3 раза (размер зерна в поверхностном слое TiNi составляет 200...500 нм), уменьшение аморфной составляющей в покрытии (установлено металлографическими исследованиями), что оказывает существенное влияние на микротвердость покрытий, которая "чувствительна" к структурным изменениям (рис. 11). В результате отжига происходит некоторое "смягчение" поверхностного слоя и снижение микротвердости покрытия TiNi (рис. 9). Таким образом, отжиг оказывает существенное влияние на структуру, микротвердость, снижает химическую неоднородность поверхностных слоев TiNi, что приводит к улучшению функциональных свойств поверхностного слоя с ЭПФ.

ППД – один из видов ТМО материалов. ТМО заключается в комбинированном цикле ТО и пластической деформации, это способ управления функционально-механическими

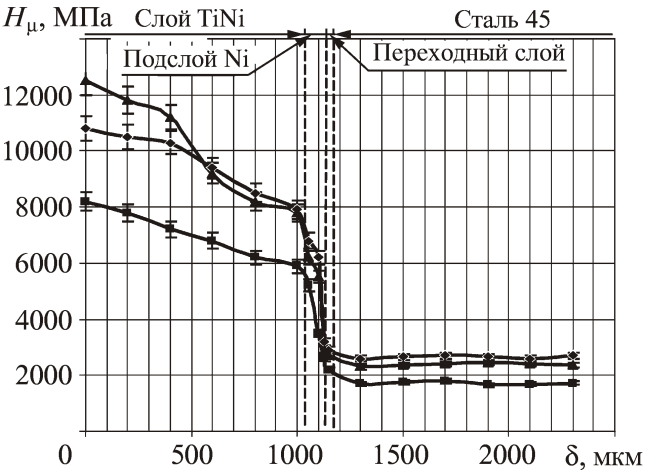


Рис. 9. Распределение микротвердости сплава Ni–TiNi, полученного плазменным напылением на сталь 45, δ_{TiNi} = = 1 мм:
1 – ПН TiNi, 1 мм; *2* – ТО, Т = 973 К; *3* – ТО и ППД, TiNi

свойствами сплавов с ЭПФ TiNi. ППД приводит к упрочнению слоя с ЭПФ TiNi, уменьшению шероховатости поверхности, устранению пор на 18...24 %. ППД является заключительным этапом термомеханического цикла получения деталей из сплавов с ЭПФ, повышающих их функциональные свойства.

Для создания реактивных напряжений и обратимой деформации, необходимых для формовосстановления слоев сплавов с ЭПФ, выполняли ППД слоев TiNi. ППД осуществ-

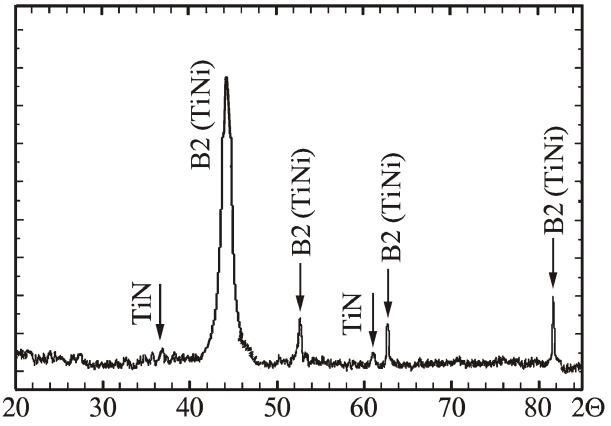
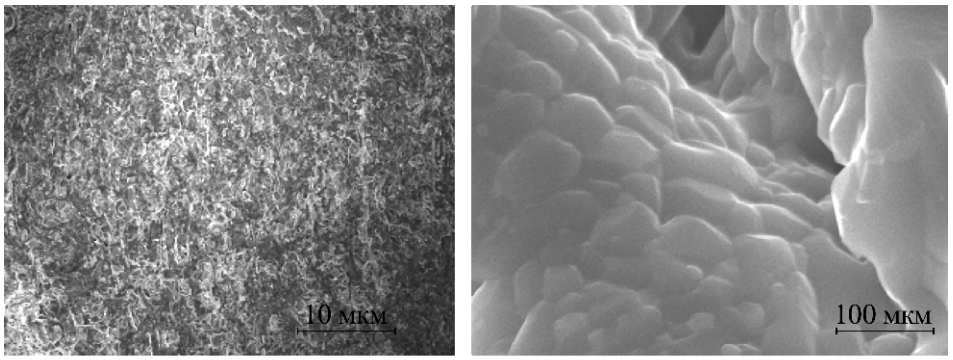
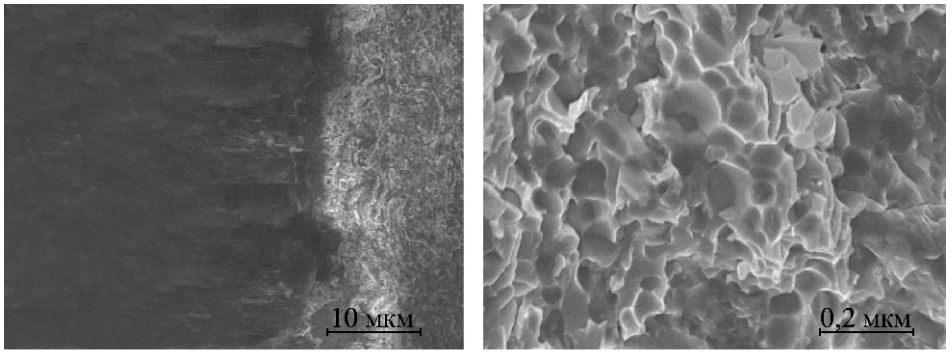


Рис. 10. Рентгенофазовый анализ сплава никелида титана после ТО (отжиг 1073 К, 1 ч)



а) *б*)

Рис. 11. Микроструктура TiNi покрытия с ЭПФ после ТО (отжиг при *T* = 1073 К):
а – 500; *б* – 33000



а) *б*)

Рис. 12. Микроструктура слоя сплава TiNi после ТМО с обкаткой:
а – 500; *б* – 6000

ляли обкатыванием поверхностей цилиндрических образцов в трехроликовом приспособлении в условиях комнатных и повышенных температур. Структура покрытия, полученная после плазменного напыления, ТО (отжиг при 1073 К) и последующего ППД представлена на рис. 12. Сразу после плазменного напыления проводили ППД слоя с ЭПФ TiNi при температуре 1073 К (рис. 3). После этой операции и ТО проводили ППД слоя с ЭПФ TiNi при комнатной температуре. В процессе обкатывания в трехроликовом приспособлении обеспечивается равномерное распределение давления на поверхностный слой TiNi за счет перераспределения усилий на роликах. В результате обкатывания происходит уменьшение размера зерна и равномерное его распределение по глубине слоя. После ППД образуется однородная нанокристаллическая структура слоя TiNi с размером зерна порядка 50... ...100 нм, зерна в слое TiNi практически равноосные круглой или овальной формы (рис. 12).

Применение сталей, поверхностно-модифицированных материалами с ЭПФ на основе TiNi, полученных плазменной наплавкой, для изготовления разъемных соединений деталей машин

Функциональные свойства поверхностного слоя из материала с ЭПФ на основе TiNi реализовано в термомеханически управляемом разъемном соединении типа "вал–втулка". Для осуществления разъемного соединения сплавом с ЭПФ типа "вал–втулка" производилось деформирование поверхностного слоя обкатыванием в трехроликовом приспособлении в радиальном направлении рис. 12. Режимы обкатывания: усилие обкатывания 4 кН, продольная подача 0,08...0,1 мм/об, скорость обкатывания 1200 мм/мин, число оборотов 20 мин [1]. После обкатывания средняя деформация в радиальном направлении при длине наплавленной поверхности 50 мм составила 7,86 %. Далее осуществляли сборку и нагрев соединения до температуры 57 С, превышаю-

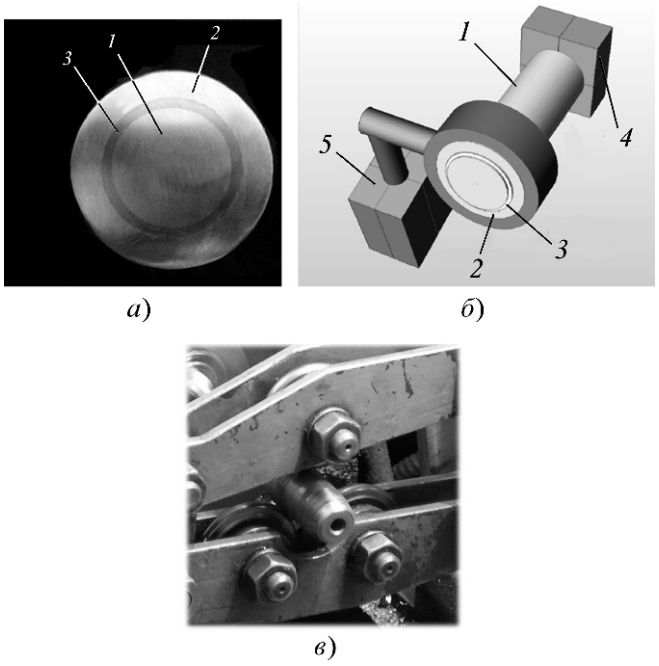


Рис. 13. Соединение "вал–втулка" материалом с ЭПФ TiNi (*а*); приспособление для проверки прочности соединения материалами с ЭПФ цилиндрических деталей (*б*); обкатка в трехроликовом приспособлении сплава с ЭПФ TiNi (*в*):
1 – вал; *2* – втулка; *3* – сплав с ЭПФ TiNi; *4* – опора; *5* – нагрузка

щей температуру аустенитных превращений A_s сплава Ni50,3Ti49,7 на 12 С. В результате получили прочное соединение "вал–втулка", способное выдержать крутящий момент 600 Нм (рис. 13).

Выводы

Предложена универсальная установка для получения наноструктурированных покрытий с ЭПФ, позволяющая выполнить плазменное нанесение покрытия и необходимую последующую обработку.

Установлены управляющие параметры поверхностного модифицирования стали материалом с ЭПФ на основе TiNi, контролирующие структурное состояние материала как на этапе плазменного напыления, так и при последующей комбинированной обработке, позволяющей целенаправленно влиять на функциональные свойства поверхностного слоя с ЭПФ.

Рекомендованы оптимальные режимы обработки (состав плазмообразующего газа, угол расположения плазматрона, режим ТО и ППД), обеспечивающие формирование наноструктурированного поверхностного слоя с ЭПФ. Обработка по оптимальным режимам приводит к увеличению плотности покрытия (18...24 %), увеличению прочности сцепления покрытия с основой (30...40 %), возрастанию микротвердости, повышению функционально-механических свойств и деформационно-силовых параметров поверхностных слоев с ЭПФ на основе TiNi.

На примере термомеханически управляемого разъемного соединения показана возможность и экономическая целесообразность использования поверхностного модифицирования деталей материалами с ЭПФ для обеспечения функциональных свойств.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Горынин И.В.** Создание технологий и освоение промышленного производства конструкционных металлических материалов с двукратным повышением важнейших эксплуатационных свойств // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 1–2. С. 37–40.

2. **Лякишев Н.П., Алымов М.И.** Наноматериалы конструкционного назначения // Российские нанотехнологии. 2006. Т. 1–2. С. 71–81.

3. **Панин В.Е.** Конструкционные материалы с наноструктурными поверхностными слоями: фундаментальные проблемы и области промышленного освоения // Ультрадисперсные (нано-) материалы. Научная сессия МИФИ-2005. Т. 9. С. 168–169.

4. **Бледнова Ж.М., Будревич Д.Г., Махутов Н.А., Чаевский М.И.** Поверхностное модифицирование материалами с эффектом памяти формы для получения разъемных соединений // Проблемы машиностроения и надежности машин. 2002. № 5. С. 64–71.

5. **Blednova J.M., Chaevsky M.I., Budrevich D.G.** The functional and mechanical possibilities of surface alloying by shape memory materials for producing demountable couplings. Phys. IV // Proc. Int. Conf. on Martensitic Transformations (ICOMAT-02). Helsinki. June, 2002, October, 2003. V. 112. P. 1151–1155.

6. **Способ** получения наноструктурированного металлического слоя на поверхности стального листа / Ж.М. Бледнова, Н.А. Махутов, М.И. Чаевский / Решение о выдаче патента на изобретение по заявке № 2007124930/02(027131); приоритет от 02.07.2007.

7. **Научные** основы повышения малоцикловой прочности; под ред. Н.А. Махутова. М.: Наука, 2006. 602 с.

8. **Бледнова Ж.М., Чаевский М.И., Русинов П.О.** Методические подходы и новые технические решения для формирования наноструктурированных поверхностных слоев в условиях высокого градиента температур // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 11. С. 46–52.

9. **Пузряков А.Ф.** Теоретические основы технологии плазменного напыления: учеб. пособие по курсу "Технология конструкций из металлокомпозитов". Изд. 2-е, перераб. и доп. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2008. 360 с.

10. **Валиев Р.З.** Создание наноструктурных металлов и сплавов с уникальными свойствами, используя интенсивные пластические деформации // Российские нанотехнологии. 2007. Т. 1–2. С. 208–216.

11. **Поверхностные** и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / отв. ред. В.Е. Панин; Рос. Акад. Наук, Сиб. отделение, ин-т физики прочности и материаловедения и др. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с. (Интеграционные проекты СО РАН; вып. 8).

УДК 621.762

Ю.И. Мулин *(Тихоокеанский государственный университет, г. Хабаровск),*
В.Д. Власенко *(Вычислительный центр ДВО РАН, г. Хабаровск)*
Тел.: (4212)22-59-22
E-mail: vlas1960@frumail.ru

Восстановление и упрочнение матриц для прессования алюминиевых профилей электроискровым легированием[1]

Представлены результаты исследования формирования жаростойких трехслойных покрытий, обеспечивающих высокую износостойкость рабочих поверхностей матриц для прессования алюминиевых профилей при температурах до 600 С, закономерности образования легированного покрытия, его физико-химические и эксплуатационные свойства. Разработан технологический процесс восстановления матриц, позволяющий значительно увеличить долговечность их работы.

Ключевые слова: *электроискровое легирование, рабочая поверхность матриц, алюминиевый профиль, многослойные покрытия.*

In work results of research on formation of the heat resisting three-layer coverings providing high wear resistance at temperatures to 600 C of working surfaces of matrixes for pressing of aluminium profiles are presented; results of researches of law of formation of the alloyed covering, its physical and chemical and operational properties. The conducted researches have allowed to develop technological process of restoration of matrixes, considerably to increase durability of their work.

Keywords: *electrospark alloying, working surface of matrixes, aluminium profile, multilayered coverings.*

Введение

Матрицы для производства алюминиевых профилей изготавливают из дорогостоящей инструментальной штамповой стали, например 4Х5В2ФС (рис. 1). В процессе эксплуатации в условиях высоких температур (до 550 С) и удельного давления (до $P = 100$ кгс/мм^2) в контактных зонах наблюдается абразивное изнашивание поверхностей инструмента по окиси алюминия (Al_2O_3) [1]. При достижении износа рабочих поверхностей до 0,2...0,7 мм матрицы стоимостью 15...20 тыс. руб. выбраковываются. Восстановление и упрочнение изношенных поверхностей матриц позволит снизить себестоимость производства алюминиевых конструкций.

Для восстановления и упрочнения рабочих поверхностей матриц предложено использование метода *электроискрового легирования* (ЭИЛ), имеющего преимущества по сравнению с другими методами и возможностью од-

[1]Работа выполнена при финансовой поддержке гранта РФФИ, проект № 08-01-98502.

новременного повышения износо- и жаростойкости [2, 3].

Известно применение метода ЭИЛ для упрочнения различного прессового, кузнечного, штампового инструментов, работающих в условиях высоких температур при использовании электродов из твердых сплавов типа ВК и ТК. Стойкость инструмента при этом повышается в 2–3 раза при толщине покрытия 0,05...0,1 мм [4]. Однако в литературе не достаточно освещена информация о восстановлении рабочих поверхностей матриц, износ которых превышает 0,2 мм и более [5].

Рис. 1. Общий вид матрицы для прессования алюминиевых профилей

Анализ условий работы матриц для производства алюминиевых профилей позволил выявить необходимость комплексного повышения эксплуатационных свойств поверхностей инструмента: износостойкости в условиях высоких температур (до 600 С), жаростойкости и теплопроводности после восстановления размеров матриц, что трудно обеспечить покрытием из материала одного химического состава.

Целью работы является разработка процесса восстановления размеров изношенных поверхностей матриц до 1,0 мм и их упрочнения. Для этого выполнено исследование закономерностей формирования многослойного покрытия и требуемых свойств при ЭИЛ. Предложено использовать три электрода различного химического состава.

На основании литературных данных по формированию *измененных слоев* (ИПС) на поверхности материалов при их взаимодействии [3, 6], а также априорной информации авторами предложена последовательная схема выбора материала легирующего электрода:

1. Материал первого электрода должен обеспечить наибольшую толщину ИПС, высокую прочность сцепления покрытия с основой.

2. Материал второго электрода должен обеспечить высокую износо- и жаростойкость покрытия при его высокой теплопроводности.

3. Материал третьего электрода должен обеспечить повышенную стойкость ИПС к газоабразивному изнашиванию [1].

При этом все три слоя должны иметь между собой границы взаимодействия, обеспечиваемые процессами, происходящими при ЭИЛ [2].

Для достижения указанной цели были поставлены следующие задачи:

1. Исследовать закономерности формирования многослойного покрытия.

2. Определить правила подбора материалов электродов для восстановления изношенных поверхностей и их упрочнения.

3. Определить последовательность нанесения покрытий.

4. Изучить влияние технологических режимов процесса ЭИЛ на качество рабочих поверхностей.

Ранее такие задачи для ЭИЛ не ставились, хотя решение их имеет большое практическое и теоретическое значение.

Методика исследований, оборудование и материалы

Исследования по формированию покрытий выполняли на электроискровых установках моделей "ИМ-05", "ИМ-101", "Элитрон-16". Изменяемыми параметрами технологического процесса являлись: приведенная величина энергии искровых разрядов при легировании $W_п$ (кДж/см^2) материала основы площадью 1 см^2, частота $f_и$ (Гц) и длительность $t_и$ (с) следования импульсов. Значения $W_п$ определены по усредненным величинам энергии одного искрового разряда $W_и$ (Дж), рассчитанным по вольтамперным осциллограммам, полученным с помощью осциллографа С8-17 непосредственно в искровом промежутке [7]. Численно величина $W_п$ рассчитывалась по выражению:

$$W_п \quad W_и N_и t \quad W_и (60 f_и K_и) t,$$

где $N_и$ – среднее количество импульсов, состоявшихся в течение 1 мин; t – время легирования 1 см^2 поверхности; $K_и = N_и/f_и$ – коэффициент, определяющий вероятность прохождения искрового импульса. Как правило, с повышением времени легирования $W_п$ линейно увеличивается.

Выбор материалов электродов определялся по результатам изучения массопереноса при ЭИЛ (эрозии анода, привеса катода), а также физикохимическими и эксплуатационными свойствами образуемого покрытия. Использовали электроды из твердых сплавов ВК6М, Т5К10, а также наиболее часто применяемые элементы: Ti, Cr, Ni, W, высоколегированный сплав 11Х15Н25М6АГ2 и полученные из минерального сырья на основе вольфрама: W–Cr, W–Ni [8, 9]. Подбору материалов электродов для формирования двух- и трехслойных покрытий предшествовало выполнение исследований с использованием имеющейся информации о повышении износостойкости поверхностей штамповых инструментов, работающих в условиях повышенных температур и удельного давления. Материал основы – сталь 4Х5В2ФС состава: C = 0,35...0,45 %; Cr = 4,5...5,5 %; W = 1,6...2,4 %; V = 0,6...1,0 %; Si = 0,8...1,2 %; Mn = 0,15...0,4 %; Ni = 0,3 %.

Величины удельной эрозии анода ^{a} и удельного привеса катода ^{k} определяли гравиметрическим методом через каждую 1 мин процесса ЭИЛ при использовании весов ВЛР-200 с точностью до 0,0002 г. По их значениям рассчитывали суммарную эрозию анода ^{a} и суммарный привес катода ^{k}. Коэффициент переноса материала рассчитывали по формуле $K = {}^k/{}^a$ при постоянном времени легирования для каждого материала электрода [7].

Металлографические исследования микроструктуры и толщины покрытий проводили на микроскопе МИМ-10 (разрешающая способность 2 мкм); дюрометрические – на микротвердомере ПМТ-3 с нагрузкой 50 Н с использованием косых шлифов; шероховатость поверхности определяли профилографом модели 296.

Испытания формируемых покрытий на срез проводили при использовании пресса УМ-5А и специального приспособления. Образец в виде плунжера с покрытием вставляли во втулку, которая через сферическую опору опиралась на корпус приспособления, установленного на столе пресса. При нагружении образца осевой силой происходил сдвиг (срез) слоя покрытия с основного металла. Отношение величины осевой силы нагружения на площадь поверхности покрытия определяет величину напряжений среза.

Испытания покрытий на газоабразивное изнашивание выполняли с помощью центробежного ускорителя модели ЦУК-3М в соответствии с ГОСТ 23.201–78.

Сравнительные испытания полученных покрытий на износостойкость проводили в соответствии с ГОСТ 23.222–84 на машине трения МТ-22П под нагрузкой 100 Н по схеме "вал–колодка", скорость скольжения вращающегося диска по образцу 0,25 м/с в условиях трения без смазки. Материалом образцов с покрытиями являлась инструментальная сталь 4Х5В2ФС (HRC 52...58), материал вращающегося диска – закаленная сталь 40Х (HRC 62...64). Износостойкость покрытий на образцах оценивали по сравнению с износом образцов без покрытия. Базой испытаний был принят путь трения, равный 20 км.

Исследование жаростойкости покрытий выполняли на дериватографе Q-1000 в соответствии с ГОСТ 6130–71 [10].

Результаты исследований и их обсуждение

Получены типовые зависимости изменения массы катода ^{k} (рис. 2, *а*) и анода – ^{a} (рис. 2, *б*) от величины приведенной энергии $W_п$, пересчитанной по значениям времени легирования 1 см^2 поверхности.

Анализ полученных результатов показал, что закономерности изменения массы анода и катода от величины приведенной энергии искровых разрядов для электродов имеют раз-

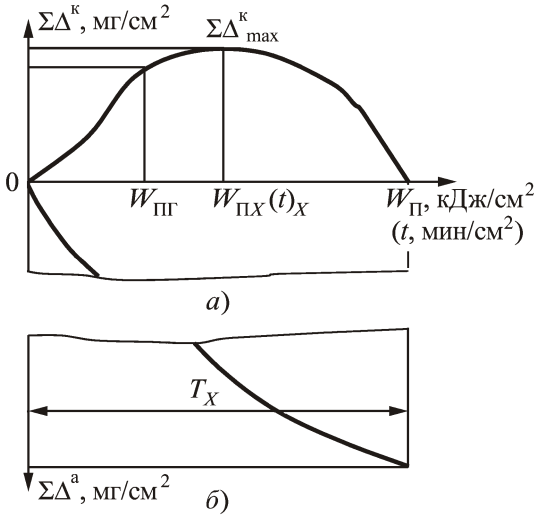


Рис. 2. Типовые зависимости изменения массы катода $_{t}^{k}$ (*а*) и анода – $_{t}^{a}$ (*б*) от величины приведенной энергии $W_п$, пересчитанной по значениям от времени легирования на 1 см^2 поверхности

личный вид. Аноду соответствует непрерывное, нелинейное уменьшение его массы; для катода в начале процесса непрерывное повышение массы (до времени t_X и соответствующей этому времени величины энергии $W_{пX}$), затем при $W_п > W_{пX}$ непрерывное ее уменьшение. Такое различие в закономерностях изменения массы электродов связано с особенностями образования и разрушения вторичных структур на поверхностях электродов и их поведения при искровых разрядах [7]. Закономерности изменения массы для различных пар электродов имеют одинаковый вид. Однако численные значения изменения массы различны и обусловлены элементным, фазовым составом электродов, окружающей среды, технологическими и энергетическими параметрами процесса ЭИЛ. Представленная на рис. 2, *а* закономерность изменения массы катода ограничивается временем критического порога разрушения поверхностного слоя (T_X).

В общем случае процесс образования ИПС на катоде можно разделить на три этапа. На первом этапе (при $W_п$ = 1...3 кДж/см^2) формирование покрытия определяется преимущественно количеством эродированного материала анода; на втором этапе структурной приспосабливаемости ($W_п$ $W_{пX}$) преимущественное формирование ИПС определяется влиянием образующей вторичной структуры материалов анода и катода, возрастанием внутренних напряжений в покрытии; на третьем этапе устойчивого отрицательного привеса ($W_п$ > > $W_{пX}$), объясняемого разрушением ИПС, которое определяется его напряженным состоянием, критическим количеством дефектов и физико-химическими свойствами вторичной структуры.

Выполненные исследования зависимости суммарного привеса катода от величины приведенной энергии позволили установить численные значения характеристик порога хрупкого разрушения $W_{пX}$ и соответствующие ему $_{max}^{k}$, а также рекомендуемые границы окончания процесса ЭИЛ ($W_{пг}$) [11] и соответствующие им ^{k} при режимах обработки: частота следования импульсов искровых разрядов $f_и$ = 600 Гц, усредненная длительность искрового разряда $_и$ = 90 мкс для исследованных материалов электродов, средние значения которых приведены в табл. 1. Анализ полученных результатов показывает, что материал электрода 11Х15Н25М6АГ2 обладает возможностью наибольшего массопереноса материала $_{max}$ = 142,8 мг/см^2 при ЭИЛ и может быть принят в качестве основного для выполнения процесса восстановления изношенных рабочих поверхностей, т. е. для образования первого слоя. Наилучшие результаты по формированию легированного слоя и его толщине (табл. 2, 3) данным электродом объясняются тем, что основные составляющие сплава 11Х15Н25М6АГ2 образуют неограниченные твердые растворы с материалом катода либо жаростойкие химические соединения [2]. Выполнение исследований покрытий на когезионную прочность (на срез), газоабразивное изнашивание, износостойкость при трении без смазки и жаростойкость позволяют рекомендовать материалы электродов для формирования второго и третьего слоев покрытий.

Таблица 1

Сравнительные характеристики рекомендуемой границы окончания процесса ЭИЛ ($W_{пг}$) и порога хрупкого разрушения ($W_{пX}$)

Материал электрода	Характеристики порога разрушения		Рекомендуемые границы окончания ЭИЛ		Коэффициент массопереноса материала
	$W_{пX}$, кДж/см^2	$^{k}_{max}$, мг/см^2	$W_{пг}$, кДж/см^2	^{k}, мг/см^2	$k_m = {}^{k}/{}^{a}$
Ti	13,4	19,1	11,0	18,3	0,12
Cr	15,8	44,6	12,8	42,6	0,52
Ni	12,2	31,2	10,1	30,0	0,68
W	9,3	18,7	8,1	18,2	0,38
W–Cr	17,6	77,9	15,1	75,6	0,76
W–Ni	17,0	50,7	14,0	48,6	0,81
ВК6М	13,4	26,9	11,4	16,1	0,59
Т5К10	10,2	10,7	8,3	10,3	0,38
11Х15Н25М6АГ2	26,1	148,0	22,0	142,8	0,86

Таблица 2

Экспериментальные результаты испытаний покрытий на срез $\tau_{ср}$

Материал электрода	Толщина покрытия, мкм	Средние напряжения среза $_{ср}$ покрытия, МПа	Допускаемые напряжения среза [$_{ср}$] по справочным данным, МПа	Усредненные значения энергетических параметров процесса ЭИЛ		
				$W_п$, кДж/см^2	$W_и$, Дж	$f_и$, Гц
Ti	20...30	85,6	50...75	9,8	0,10	Не зависит
Cr	80...100	101,2	60...70	8,0	0,25	600
Ni	60...90	80,6	60...80	8,7	0,30	600
Cu	50...70	26,0	10...15	10,0	0,22	Не зависит
W	50...70	98,9	90...100	8,0	0,40	600
W–Cr	70...90	102,3	–	8,5	0,30	500
ВК6М	50...80	150,4	–	9,0	0,10	Не зависит
Т5К10	30...40	86,2	–	8,0	0,10	Не зависит
11Х15Н25М6АГ2	110...130	97,0	48...55	8,5	0,25	600

Приведенные в табл. 2 значения допускаемых напряжений среза [$_{ср}$] для исследуемых материалов рассчитаны по формулам:

$$[\ _{ср}] \quad 0{,}6[\ _{р}];$$

$$[\ _{р}] \quad _{т}\ /k_{зп}k\ ;$$

$$[\ _{ср}] \quad (0{,}35\ldots0{,}45)\ _{т},$$

где [$_{р}$] – допускаемое напряжение при растяжении; = 0,9 – масштабный фактор; $k_{зп}$ = = (1,2...1,3) – допускаемый коэффициент запаса прочности; k = (1...1,2) – коэффициент концентрации; $_{т}$ – предел текучести материала [12]. Формирование ИПС методом ЭИЛ обеспечивает повышенные значения прочно-

Таблица 3

Характеристики образуемых покрытий, усредненные результаты исследований на газоабразивное изнашивание и износ при трении без смазки

Материал электрода	Толщина покрытия, мкм	Величина зоны термического влияния, мкм	Сплошность, %	Микротвердость, ГПа	Шероховатость *Ra*, мкм	Стойкость к газоабразивному изнашиванию, %	Износ при трении без смазки, г/м^2, на пути 20 км
Cr	34...90	8,0	98	9,8...12,4	3,0...6,0	120	61
W–Cr	40...100	7,0	96	9,6...10,1	3,2...6,1	76	71
ВК6М	50...90	6,5	97	12,8...20,4	3,1...5,2	91	67
Т15К10	26...80	6,0	95	10,6...18,2	3,1...6,0	82	69
11Х15Н25М6АГ2	200...700	10,0	98	4,6...5,6	3,7...7,0	109	90
11Х15Н25М6АГ2 + + (W–Cr)	270...760	9,2	100	9,4...9,8	3,2...6,3	85	63
11Х15Н25М6АГ2 + + ВК6М	250...750	9,6	100	10,6...17,2	3,1...6,6	116	67
11Х15Н25М6АГ2 + + (W–Cr) + Cr	300...840	10,1	100	9,6...9,8	3,2...6,0	122	54
11Х15Н25М6АГ2 + + ВК6М + Cr	288...810	10,2	100	10,4...12,6	3,0...6,1	126	30
11Х15Н25М6АГ2 + + Т15К10 + Cr	220...790	10,2	100	10,1...11,4	3,2...6,2	128	39

сти покрытия с основой на срез, которые объясняются действием на поверхности катода микрометаллургических процессов и эффекта диффузии. При использовании материалов электродов Ti, Cu, ВК6М, Т5К10 не установлено влияние частоты следования импульсов на средние напряжения среза покрытий со стальной основой.

Результаты исследований на газоабразивное изнашивание приведены в табл. 3. Наибольшая стойкость покрытий к газоабразивному изнашиванию по сравнению с материалом матрицы (сталь 4Х5В2ФС) получена для покрытий из хрома.

В табл. 3 также приводятся усредненные значения абсолютного износа при трении без смазки на пути испытания, равном 20 км. Приняты следующие варианты образования трехслойных покрытий электродами: 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr, 11Х15Н25М6АГ2+ +Т5К10+Cr, 11Х15Н25М6АГ2+(W–Cr)+Cr. Характеристики образуемых покрытий последовательно для каждого материала электрода, а также при формировании второго и третьего слоев приведены в табл. 3. Анализ принятых вариантов показывает, что за счет формирования многослойных равномерных покрытий повышается стойкость поверхности к газоабразивному изнашиванию. Наибольшие значения износостойкости получены при последовательном использовании электродов: 11Х15Н25М6АГ2+Т5К10+Cr, 11Х15Н25М6АГ2+ +ВК6М+Cr соответственно на 126 и 128 %, превышающих износостойкость материала основы. Хром является эффективным материалом электрода, завершающим формирование трехслойного ИПС при ЭИЛ.

Анализ экспериментально полученных величин износа при трении без смазки показывает, что образование трехслойных покрытий состава 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr позволяет получать износостойкую поверхность с гра-

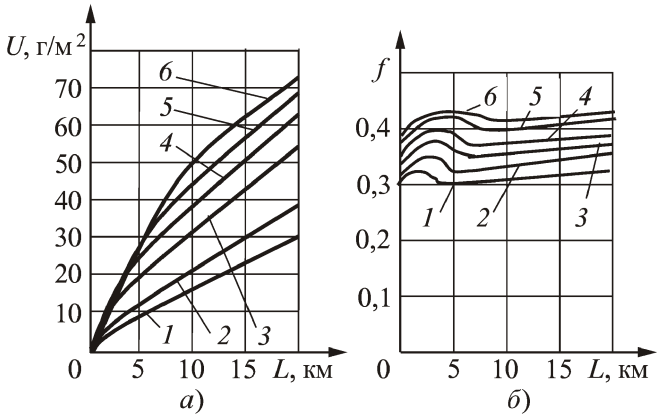


Рис. 3. Зависимости износа (*а*) и коэффициентов трения (*б*) для покрытий, образованных материалами электродов:
1 – 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr; *2* – 11Х15Н25М6АГ2 + + Т5К10+Cr; *3* – 11Х15Н25М6АГ2+(W–Cr)+Cr; *4* – 11Х15Н25М6АГ2+(W–Cr); *5* – 11Х15Н25М6АГ2 + + ВК6М; *6* – без покрытия

диентом свойств, соответствующим условиям работы матрицы при общей толщине покрытия до 1 мм и более. Второй слой покрытия электродом из ВК6М и третий из Cr позволяют дополнительно повысить износостойкость ИПС по сравнению с покрытием из материала 11Х15Н25М6АГ2 соответственно в 1,7 и 3,0 раза.

Для многослойных покрытий зависимости износа U (г/м^2) и коэффициентов трения f от пути трения при испытании без смазки приведены на рис. 3. Значения коэффициентов трения от пути при испытании имеют аналогичный порядок: для образцов, имеющих меньший износ, коэффициент трения меньший и т.д. Покрытия состава 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr обеспечивают наибольшее повышение износостойкости по сравнению с образцами без покрытия (в 2,4 раза).

Металлографические исследования и измерения микротвердости на указанных покрытиях (табл. 3) показали, что при толщине ИПС до 0,7 мм, образуемого электродом Х15Н25М6АГ2, микротвердость на поверхности покрытия составляет $H_{ср}$ 5,1 ГПа. При определении микротвердости в сечении покрытия обнаружено, что по мере приближения к линии сплавления с основой микротвердость возрастает до 6,4 ГПа у линии сплавления. При этом основной металл имеет структуру отпущенного мартенсита и микротвердость $H_{ср}$ 5,4 ГПа.

На рис. 4 приведена микроструктура штамповой стали 4Х5В2ФС после ЭИЛ с последовательным образованием трехслойного покрытия. При травлении покрытия и основы в 4 %-ном спиртовом растворе азотной кислоты выявляется структура только основы, а граница между нанесенными слоями и структура ИПС не проявляется. После выполнения чистовой обработки поверхности часть измененного слоя удаляется, но участок с повышенной твердостью остается. После нанесения второго и третьего слоев сплошность поверхности и шероховатость увеличиваются, микротвердость на поверхности покрытия возрастает до H = 10,4...12,6 ГПа. Повышение твердости вблизи линии сплавления на прилегающем к основе участке объясняется частичным перемешиванием нижнего и верхнего слоев с образованием карбидов вольфрама и хрома. При принятой последовательности нанесения слоев 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr высоколегированная сталь типа 11Х15Н25М6АГ2 в ре-

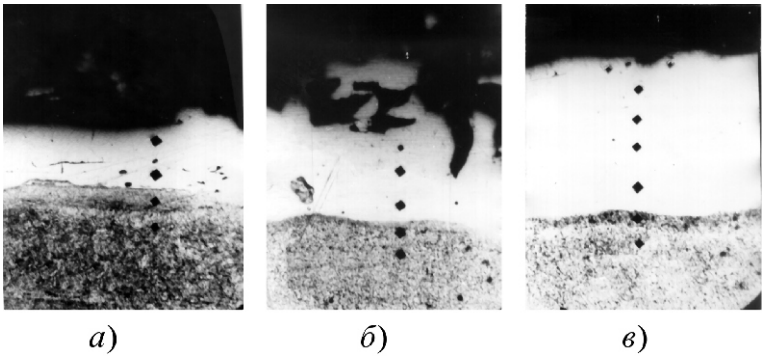


Рис. 4. Микроструктура штамповой стали 4Х5В2ФС после ЭИЛ электродами:
а – 11Х15Н25М6АГ2; *б* – 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М; *в* – 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr

зультате диффузии дополнительно обогащается карбидом вольфрама из верхнего слоя.

Исследования показали, что материал электрода 11Х15Н25М6АГ2 обеспечивает максимальную толщину покрытия до 1,0 мм при некотором снижении микротвердости H = = 4,5...5,5 ГПа по сравнению с микротвердостью H = 5,0...6,0 ГПа основы 4Х5В2ФС. Выбранные материалы электродов ВК6М, Cr для упрочнения рабочих поверхностей матриц повышают микротвердость ИПС по сравнению с основой более чем в 2 раза.

Результаты исследований образцов с трехслойным покрытием 11Х15Н25М6АГ2 + + ВК6М + Cr и без покрытия на жаростойкость представлены на рис. 5. Установлено, что образцы с покрытием 11Х15Н25М6АГ2 + + ВК6М + Cr при температуре изотермической выдержки 600 С в течение 12 ч имеют незначительное увеличение массы. При температуре 800 С увеличение массы у образцов с покрытием в два раза меньше, чем у образцов без покрытия, что определяет эффективность защиты основы от обезуглероживания при условии нанесения сплошного равномерного покрытия. Однако исследования образцов с покрытиями при температуре 900 С показали, что покрытие плохо защищает основной металл от образования окалины (рис. 5). В соответствии с этим можно считать достаточно эффективным применение указанного покрытия в пределах эксплуатационных температур до 550 С.

После нанесения покрытия и выдержке в течение 12 ч при температуре 800 С микротвердость ИПС вблизи основы H = = 4,5...6,1 ГПа, а в приповерхностном участке H = 9,2...10,5 ГПа. Толщина окисного слоя 0,06 мм. Основной металл после испытаний имеет микротвердость H = 4,5 ГПа. Обезуглероживание на этих образцах не обнаружено. Металлографические исследования показывают, что данное трехслойное покрытие улучшает свойства поверхности, работающей в условиях повышенных температур и может быть рекомендовано как защитное покрытие от окисления и обезуглероживания стали.

В соответствии с результатами выполненных экспериментальных исследований разработан процесс восстановления и упрочнения рабочих поверхностей матриц, состоящий в формировании многослойных покрытий последовательным применением следующих материалов электродов: первый слой – сплавом 11Х15Н25М6АГ2, второй слой – твердым сплавом ВК6М, третий слой – Cr.

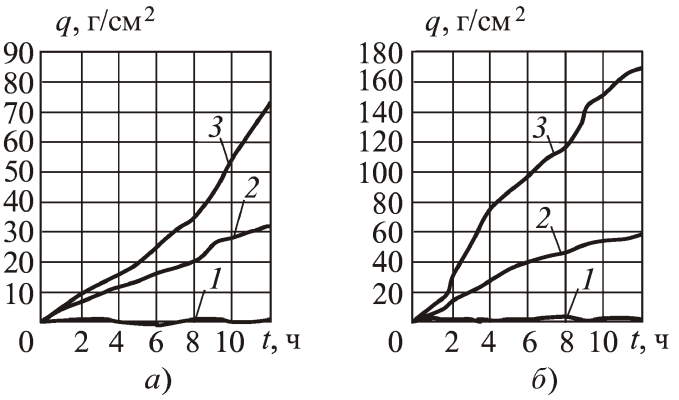


Рис. 5. Зависимость изменения удельного прироста массы q (г/м^2) образцов из штамповой инструментальной стали 4Х5В2ФС с покрытием 11Х15Н25М6АГ2+ВК6М+Cr (*а*), без покрытия (*б*), от времени изотермической выдержки при температурах:

1 – 600 С; *2* – 800 С; *3* – 900 С

Процесс восстановления изношенных боковых пазов выполняли при чередовании операций тонкой припиловки и ЭИЛ с учетом толщины образования окончательного упрочненного слоя материалами ВК6М и Cr . Формирование первого слоя толщиной 0,2...0,7 мм проводили на электроискровой установке модели ИМ-101 при режимах: рабочем токе $I_р$ = = 20...25 А, напряжении зарядки конденсаторов $U_{зк}$ = 96 В, частоте следования импульсов $f_и$ = 1000 Гц, емкости рабочих конденсаторов C = 290...310 мкФ, энергии единичного искрового разряда $W_и$ = 0,8 Дж и обеспечении границы окончания процесса не более $W_{пг}$ = = 22 кДж/см^2. Процесс легирования выполняли не торцовой поверхностью электрода, как это традиционно принято, а боковой, под углом от 3 до 10 .

После полного восстановления размеров изношенных рабочих поверхностей матрицы формируется второй слой толщиной 0,05... ...0,09 мм электродом ВК6М на установке модели "Элитрон-16" при режимах: рабочий ток $I_р$ = 4...5 А, напряжение зарядки конденсато-

ров $U_{зк}$ = 44 В, частота следования импульсов $f_и$ = 600 Гц, емкость рабочих конденсаторов C = 60 мкФ, энергия единичного искрового разряда $W_и$ = 0,2 Дж и обеспечение границы окончания процесса не более $W_{пг}$ = = 8,5 кДж/см^2. В результате этого упрочнения увеличивается сцепление ИПС с материалом основы, повышается микротвердость поверхности матрицы с H = 5,5 ГПа до H = = 10,6...14,2 ГПа.

Для нанесения третьего слоя покрытия толщиной 0,03...0,09 мм использовали материал электрода – Cr; процесс выполняли на установке модели "Элитрон-16" при режимах: рабочий ток $I_р$ = 4...5 А, напряжение зарядки конденсаторов $U_{зк}$ = 44 В, частота следования импульсов $f_и$ = 600 Гц, емкость рабочих конденсаторов C = 60 мкФ, энергия единичного искрового разряда $W_и$ = 0,2 Дж и обеспечение границы окончания процесса не более $W_{пг}$ = = 6,0 кДж/см^2.

На Хабаровском заводе строительных алюминиевых конструкций испытания в производственных условиях 23 комплектов матриц для прессования алюминиевых профилей, восстановленных и упрочненных по предлагаемому технологическому процессу, показали, что долговечность работы изделий превышает в 1,2–1,5 раза долговечность работы вновь изготовленных матриц без упрочнения [3].

Основные выводы

1. Образование многослойных покрытий различного химического состава методом ЭИЛ расширяет его технологические возможности, позволяет формировать покрытия толщиной до 0,7...1,0 мм с требуемым градиентом эксплуатационных свойств.

2. Для восстановления изношенных рабочих поверхностей матриц методом ЭИЛ рекомендуется применять материал электрода 11Х15Н25М6АГ2.

3. Средние значения напряжения на срез покрытий после ЭИЛ превосходят допускаемые напряжения на срез соответствующих материалов. Наибольшее влияние на прочность сцепления покрытий со стальной основой оказывает величина приведенной энергии $W_п$.

4. Стойкость к газоабразивному изнашиванию при формировании многослойных покрытий на стальных поверхностях электродами 11Х15Н25М6АГ2+ВК8+Cr и 11Х15Н25М6АГ2+ +Т15К6+Cr повышается на 28 %.

5. Формирование трехслойных покрытий при ЭИЛ электродами 11Х15Н25М6АГ2+ +ВК6+Cr обеспечивает повышение износостойкости в 2,4 раза и защиту поверхностей матриц из штамповой стали 4Х5В2ФС от воздействия температур до 600 С.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ерманок М.З.** Прессование профилей из алюминиевых сплавов / М.З. Ерманок, В.И. Фейгин, Н.А. Сухоруков. 2-е изд. М. : Металлургия, 1977. 264 с.

2. **Мулин Ю.И.** Электроискровое легирование рабочих поверхностей инструментов и деталей машин электродными материалами, полученными из минерального сырья / Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров. Владивосток: Дальнаука, 1999. 110 с.

3. **Патент** РФ № 2162488. Способ восстановления деталей / Ю.И. Мулин, А.Н. Вишневский, А.Н. Лысич. Опубл. 27.01.2001. Бюл. № 3.

4. **Верхотуров А.Д.** Формирование поверхностного слоя металлов при электроискровом легировании / А.Д. Верхотуров. Владивосток: Дальнаука, 1995. 323 с.

5. **Восстановление** деталей машин. Справочник / Ф.И. Пантелеенко, В.П. Лялякин, В.П. Иванов; под ред. В.П. Иванова. М.: Машиностроение, 2003. 672 с.

6. **Лешенко Б.А.** О критериях адгезионно-когезионной равнопрочности и термостойкости защитных покрытий / Б.А. Лешенко // Проблемы прочности. 1980. № 5. С. 114–117.

7. **Мулин Ю.И.** Феноменологическое описание закономерностей формирования поверхностного слоя при электроискровом легировании / Ю.И. Мулин, Л.А. Климова, Д.В. Ярков // Физика и химия обработки материалов. 2000. № 3. С. 50–56.

8. **Китаев А.М.** Справочная книга сварщика / А.М. Китаев, Я.А. Китаев. М.: Машиностроение, 1985. 256 с.

9. **Патент** РФ № 2043862 Кл. B22F 3/00. Способ получения электродов из вольфрамсодержащего минерального сырья и устройство для его осуществления / Ю.И. Мулин, А.Д. Верхотуров, В.В. Гостищев. Опубл. 20.09.95. Бюл. № 26.

10. **ГОСТ 6130–71.** Металлы. Методы определения жаростойкости. М.: Изд-во Стандартов, 1971. 10 с.

11. **Власенко В.Д.** Методика расчета параметров процесса электроискрового легирования для образования поверхностного упрочнения материалов / В.Д. Власенко, Ю.И. Мулин // Препринт № 120 / Вычислительный центр ДВО РАН. Владивосток: ДВО РАН, 2008. 22 с.

12. **Ничипорчик С.Н.** Детали машин в примерах и задачах / С.Н. Ничипорчик, М.И. Корженцевский, В.Ф. Калачев и др. Минск: Вышейшая школа, 1981. 432 с.

УДК 621.9.048.7

Р.Д. Агзамов, В.В. Будилов, Н.А. Амирханова
(Уфимский государственный авиационный технический университет)
Тел.: 8-(347)-273-07-63
E-mail: vipt127@mail.vb.ru

Защитные свойства многослойных покрытий Ti–TiN, полученных методом плазменно-ассистированного нанесения

Рассмотрено коррозионное поведение стали 08кп с многослойными покрытиями Ti–TiN, нанесенными методами катодной ионной бомбардировки и плазменно-ассистированным. Показано положительное влияние плазменного ассистирования на структуру формируемых многослойных покрытий и их антикоррозионные свойства.
Ключевые слова: *многослойные покрытия, коррозионная стойкость, структура, свойства.*

The corrosion behavior of a steel 08кп with the multilayered coatings Ti–TiN putting by methods by cathode ion bombardment and the plasma-assisted method is considered. Positive influence plasma assisting on structure of formed multilayered coatings and their anticorrosive properties is shown.
Keywords: *multilayered coatings, corrosion resistance, structure of coating, properties of coating.*

Введение

Для устранения или торможения коррозионных процессов на границе среда–металл, негативно воздействующих на эксплуатационные свойства материалов, целесообразно использовать вакуумно-плазменные покрытия на основе карбидов и нитридов металлов. Достижение положительного эффекта при применении вакуумно-плазменных покрытий во многом обусловливается физико-химическими свойствами покрытий: составом, структурой, толщиной, шероховатостью, остаточными напряжениями и др.

Защитные свойства вакуумных покрытий на основе TiN достаточно хорошо изучены.

Известно, что коррозионная стойкость зависит от:

• толщины покрытия TiN [1–4]. С увеличением толщины покрытия коррозионная стойкость увеличивается вследствие уменьшения пористости покрытия;

• вида подготовки поверхности перед осаждением [5]. Чем меньше шероховатость поверхности, тем выше коррозионная стойкость. Деформационное упрочнение поверхностного слоя способствует снижению коррозионной стойкости;

• наличия капельной фазы [6, 7]. После сепарации плазменного потока от капельной фазы коррозионная стойкость покрытий возрастает.

Однако во всех работах рассматривали коррозионные свойства комплекса подложка–покрытие без учета деформационного воздействия. В то же время большинство деталей эксплуатируют при воздействии различных напряжений (растяжения, сжатия, переменных, температурных и т.д.), что существенно влияет на защитные свойства покрытий. Практически не изучены защитные свойства многослойных покрытий типа Ti–TiN, полученных методом *плазменно-ассистированного нанесения покрытий* (ПАНП) [8].

Целью работы является изучение коррозионного поведения многослойных плазменно-ассистированных покрытий Ti–TiN после их деформации со степенью 20 %.

Методика проведения эксперимента

Для формирования покрытий методом ПАНП, состоящих из микро- и нанослоев Ti–TiN, применяли модернизированную установку ННВ–6,6–И1. На пластины размером 20 20 1,5 мм из стали 08кп наносили покрытия, состоящие из 2...20 слоев с толщиной одного слоя от 0,3 до 3 мкм. Общая толщина покрытия составляла 5...7 мкм. Ионную очистку производили с помощью плазменного источника с накальным катодом "ПИНК" в среде инертного газа (аргон).

Суть ПАНП заключается в использовании плазменного источника "ПИНК", работающего в едином цикле с вакуумным электродуговым испарителем. Применение ПАНП позволяет уменьшить содержание микрокапельной фазы в покрытии, что приводит к формированию покрытий с низкой плотностью дефектов и снижению внутренних напряжений в покрытии [7].

Рентгеноструктурные исследования проводили на дифрактометре общего назначения ДРОН-4-07. Физические профили рентгеновских пиков получали путем выделения из экспериментальных профилей соответствующих инструментальных профилей с помощью гармонического анализа.

Коррозионное поведение стали 08кп с покрытиями Ti–TiN оценивали по величине потенциалов без тока в 3 %-ном растворе NaCl. Исследуемые образцы помещали в электрохимическую ячейку с установочными окнами для электрода сравнения и капилляра Луггина-Габера. В качестве электрода сравнения использовали хлорсеребряный электрод. Потенциалы без тока измеряли на потенциометре до установления постоянного значения потенциала, т.е. пока значение не изменялось в пределах 10 мВ в течение 10 мин.

Для оценки коррозионного поведения образцов применяли метод поляризационных кривых. Измерения проводили на потенциостате с компенсацией *IR* типа EP20A в 3 %-ном растворе NaCl.

Скорость коррозии образцов с покрытиями определяли гравиметрическим методом по изменению массы образцов. Образцы помещали в 3 %-ный раствор NaCl и выдерживали в течение 7 сут.

Обсуждение результатов

Качественный фазовый анализ проводили рентгеноструктурным методом сравнения относительной интегральной интенсивности дифракционных линий и экспериментальных значений межплоскостных расстояний с эталонными межплоскостными расстояниями.

Характерные рентгенограммы покрытий Ti–TiN, нанесенных методами *катодной ионной бомбардировки* (КИБ) и ПАНП, представлены на рис. 1, расшифровка рентгенограмм приведена в табл. 1.

Анализ рентгенограмм показал, что однослойные покрытия, нанесенные как методом КИБ, так и методом ПАНП, преимущественно состоят из фазы TiN с ярко выраженной текстурой ⟨111⟩. Можно сделать вывод, что дополнительная бомбардировка ионами газа не приведет к существенному изменению фазового состава покрытия TiN.

Анализ рентгенограмм образцов с многослойными покрытиями показал наличие в покрытиях фазы –Ti и фазы TiN с текстурами различных направлений, причем с увеличением числа слоев увеличивается разориентация кристаллов указанных выше фаз. Данные явления проявляются в образовании равновесной мелкозернистой структуры.

Анализ физического уширения рентгеновских пиков показал, что с увеличением числа слоев также уменьшается уровень микроискажений кристаллической решетки, что свидетельствует о снижении внутренних напряжений в покрытии. Указанные особенности многослойных покрытий, полученных методом ПАНП, способствуют увеличению их защитных свойств от коррозии.

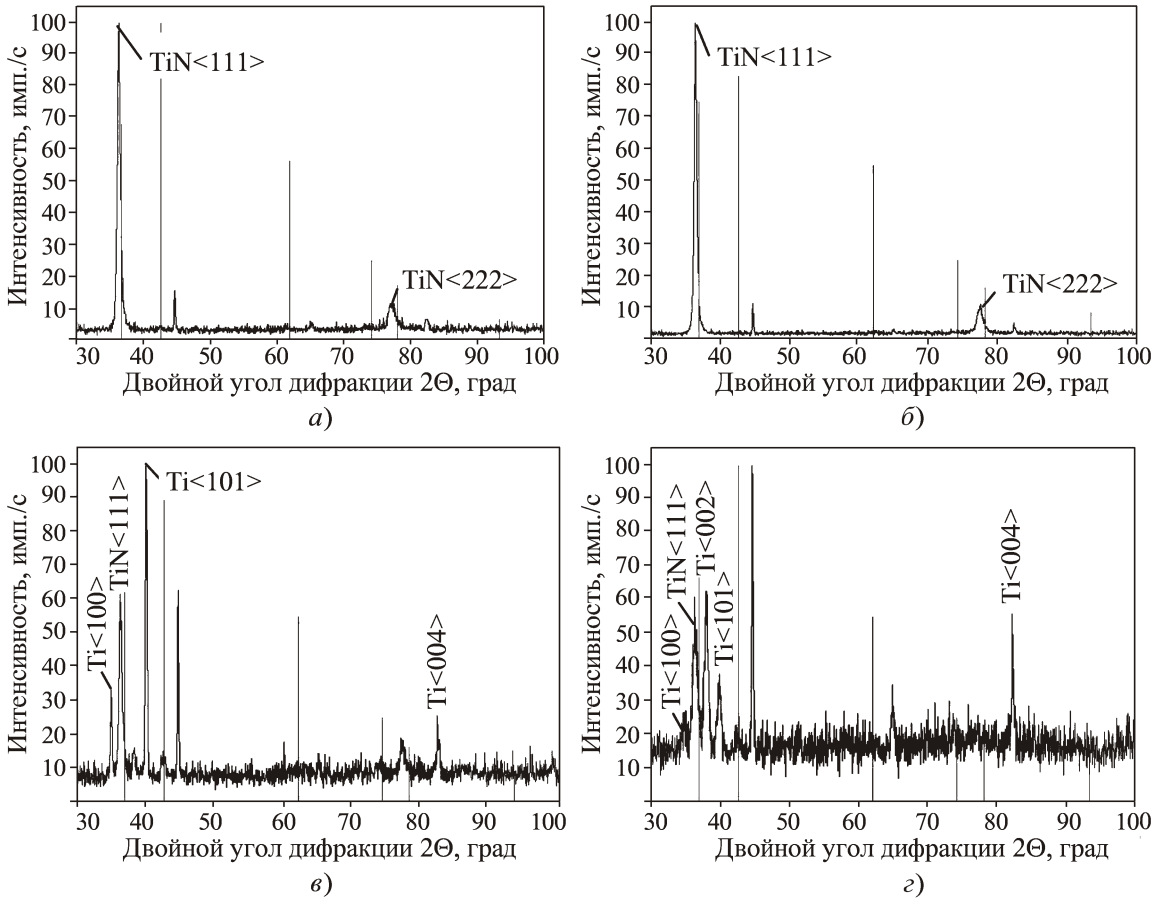


Рис. 1. Рентгенограммы покрытий:
а – 1 слой TiN (КИБ); *б* – 1 слой TiN (ПАНП); *в* – 2 слоя Ti–TiN (ПАНП); *г* – 20 слоев Ti–TiN (ПАНП)

Таблица 1

Расшифровка рентгенограмм многослойных покрытий Ti–TiN

Тип покрытия	Двойной угол дифракции 2 , град.	Межплоскостное расстояние d/n, Å	Интенсивность, имп./с	Фаза	Индексы Миллера *HKL*
TiN (КИБ)	36,40	2,468	100	TiN	111
	77,50	1,232	9	TiN	222
TiN (ПАНП)	36,30	2,475	100	TiN	111
	77,15	1,236	7	TiN	222
Ti–TiN 2 слоя (ПАНП)	35,00	2,564	29	Ti	100
	36,30	2,475	78	TiN	111
	38,30	2,350	10	Ti	002
	40,05	2,251	100	Ti	101
	42,30	2,137	12	TiN	002
	71,15	1,325	6	Ti	103
	77,15	1,236	18	Ti	201
	82,40	1,170	19	Ti	004

Продолжение табл. 1

Тип покрытия	Двойной угол дифракции 2 , град.	Межплоскостное расстояние *d/n*, Å	Интенсивность, имп./с	Фаза	Индексы Миллера *HKL*
Ti–TiN 8 слоев (ПАНП)	35,00	2,564	9	Ti	100
	36,45	2,465	97	TiN	111
	38,25	2,353	100	Ti	002
	40,05	2,251	19	Ti	101
	42,45	2,129	31	TiN	002
	52,95	1,729	5	Ti	102
	70,50	1,336	6	Ti	103
	77,55	1,231	8	Ti	201
	82,40	1,170	19	Ti	004
Ti–TiN 20 слоев (ПАНП)	34,75	2,581	21	Ti	100
	36,25	2,478	74	TiN	111
	37,95	2,371	71	Ti	002
	39,85	2,262	39	Ti	101
	42,65	2,120	15	TiN	002
	73,85	1,283	9	TiN	113
	75,90	1,254	12	Ti	112
	82,35	1,171	32	Ti	004

На рис. 2 приведены изменения потенциалов без тока от времени образцов из стали 08кп с покрытиями.

В табл. 2 приведены установившиеся значения потенциалов без тока для образцов с покрытиями.

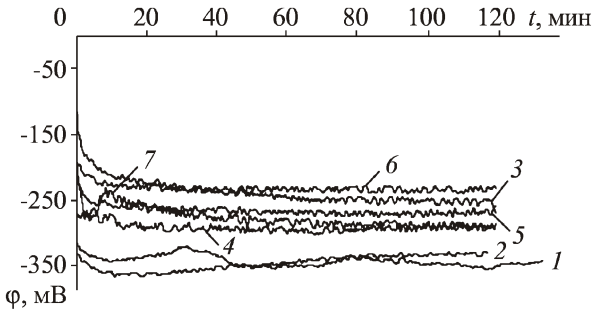


Рис. 2. Изменение потенциалов без тока от времени для образцов из стали 08кп с покрытиями:
1 – без покрытия; *2* – TiN (КИБ); *3* – TiN (ПАНП); *4* – Ti–TiN (ПАНП) 2 слоя; *5* – Ti–TiN (ПАНП) 4 слоя; *6* – Ti–TiN (ПАНП) 8 слоев; *7* – Ti–TiN (ПАНП) 20 слоев

Как видно из табл. 2, по мере увеличения числа слоев (с 2 до 8) значение сдвигается в область более положительных значений. Однако у образца с 20-слойным покрытием значение смещается в область более отрицательных значений.

Анализ значений потенциалов без токов образцов с однослойными покрытиями TiN позволил сделать вывод, что покрытия, полученные плазменно-ассистированным методом, обладают более высокими защитными свойствами по сравнению с покрытиями, полученными методом КИБ. Это объясняется увеличением плотности покрытия, уменьшением содержания капельной фракции и снижением внутренних напряжений в покрытии, напыленных методом ПАНП.

Полную картину коррозионного поведения стали 08кп с покрытиями Ti–TiN можно получить по поляризационным кривым (рис. 3).

Таблица 2

Установившиеся значения потенциалов без тока

Покрытия	Без покрытия	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti–TiN 2 слоя	Ti–TiN 4 слоя	Ti–TiN 8 слоев	Ti–TiN 20 слоев
, мВ	–348,2	–334,9	–254,6	–292,9	–269,7	–234,8	–295,1

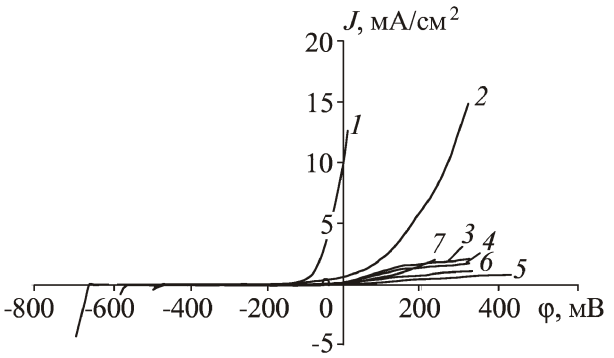


Рис. 3. Поляризационные кривые стали 08кп с покрытиями:
1 – без покрытия; *2* – TiN (КИБ); *3* – TiN (ПАНП); *4* – Ti–TiN (ПАНП) 2 слоя; *5* – Ti–TiN (ПАНП) 4 слоя; *6* – Ti–TiN (ПАНП) 8 слоев; *7* – Ti–TiN (ПАНП) 20 слоев

Как видно из рис. 3 сталь 08кп активно растворяется. При нанесении слоя TiN обычным методом КИБ анодное растворение начинается при более положительных значениях , т.е. однослойное покрытие TiN затормаживает коррозию, но при более положительных значениях образец с однослойным покрытием активно растворяется.

Совершенно иной вид имеют поляризационные кривые образцов с многослойными покрытиями, нанесенными методом ПАНП.

Рис. 4. Скорость коррозии образцов с покрытиями, определенная гравиметрическим методом

Исследования коррозионной стойкости образцов с покрытиями гравиметрическим методом приведены на рис. 4.

По результатам, приведенным на рис. 4, можно сделать вывод, что наибóльшую защиту от коррозии обеспечивает четырехслойное покрытие, нанесенное методом ПАНП.

Также следует отметить более высокую коррозионную стойкость образцов с однослойным покрытием, нанесенным в условиях ассистирования газоразрядной плазмы, по сравнению с однослойным покрытием, нанесенным методом КИБ.

Для исследования коррозионного поведения многослойных покрытий Ti–TiN под воздействием напряжений сжатия и растяжения

Таблица 3

Значения потенциалов без тока образцов с покрытиями, подвергнутых деформационному воздействию, мВ

Покрытия	TiN (КИБ)	TiN (ПАНП)	Ti–TiN 2 слоя (ПАНП)	Ti–TiN 4 слоя (ПАНП)	Ti–TiN 20 слоев (ПАНП)
С растягивающими напряжениями	–282,0	–284,0	–259,1	–257,0	–221,5
С сжимающими напряжениями	–272,0	–272,7	–246,3	–233,8	–226,6

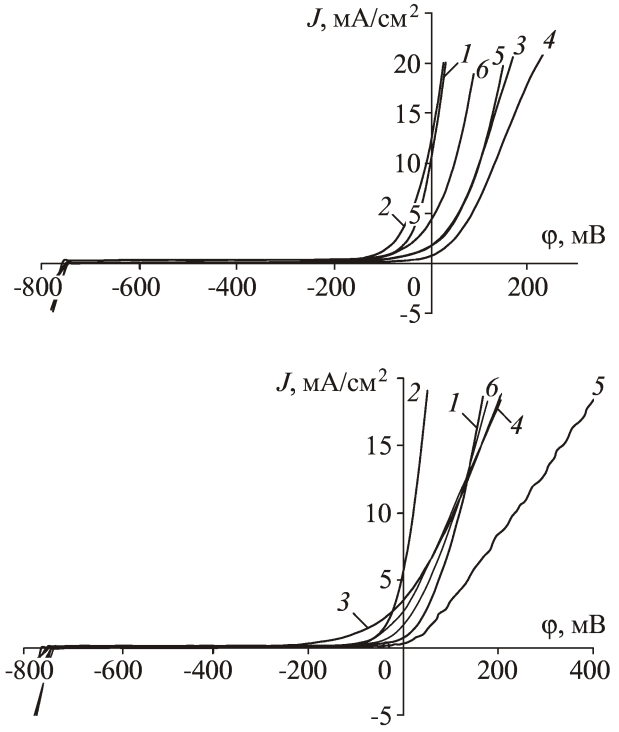


Рис. 5. Поляризационные кривые образцов с покрытиями после деформации под воздействием сжимающих напряжений:
1 – TiN (КИБ); *2* – TiN (ПАНП); *3* – Ti–TiN (ПАНП) 2 слоя; *4* – Ti–TiN (ПАНП) 4 слоя; *5* – Ti–TiN (ПАНП) 8 слоев; *6* – Ti–TiN (ПАНП) 20 слоев

образцы с покрытиями, предварительно нагретые в муфельной печи до температуры 500 С, были подвержены деформации порядка 20 %.

В табл. 3 приведены установившиеся значения потенциалов без тока образцов с покрытиями, подвергнутых деформационному воздействию.

Из табл. 2 и 3 видно, что потенциалы без тока образцов с покрытием после деформации приобрели более положительное значение, чем без деформации.

Результаты, приведенные в табл. 3, позволяют сделать вывод, что в условиях деформационного воздействия наилучшую защиту от коррозии обеспечивают многослойные покрытия.

На рис. 5 приведены поляризационные кривые образцов с покрытиями после деформации с напряжениями растяжения и сжатия.

Анализ поляризационных кривых после деформации показал, что скорость коррозии увеличивается у всех образцов с покрытиями. Однако у образцов с 2-, 4- и 8-слойными покрытиями скорость коррозии намного меньше, чем у образцов с однослойными покрытиями.

Выводы

1. Показано положительное влияние плазменного ассистирования на структуру формируемого многослойного покрытия.

2. Установлена взаимосвязь состава и строения многослойных покрытий Ti–TiN на их антикоррозионные свойства.

3. Для повышения коррозионной стойкости стали 08кп, подвергающейся деформации, рекомендуется нанесение многослойного Ti–TiN покрытия с количеством слов порядка 4...8, наносимого в условиях ассистирования газоразрядной плазмы.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Ильичев Л.Л., Кушнаренко В.М., Письменюк С.П. и др.** Защитные свойства покрытия из нитрида титана в сероводородосодержащих средах // Защита металлов. 1986. Т. 13. № 5. С. 811–813.

2. **Костржицкий А.И., Карпов В.Ф., Паскал В.В.** Электрохимическое поведение вакуумных покрытий из нитрида титана на стали // Физико-химическая механика материалов. 1988. Т. 2. С. 115–117.

3. **Вершина А.К., Бельчин И.А., Пителько А.А.** Защитно-декоративные свойства электродуговых вакуумных Ti- и TiN-покрытий, осажденных в потоках плазмы // Физика и химия обработки материалов. 1990. Т. 5. С. 93–96.

4. **Милашевская И.Г., Станкевич Е.В.** Коррозионные характеристики многослойных вакуумно-дуговых Ti–C-покрытий // Защита металлов. 2003. Т. 39. № 5. С. 529–532.

5. **Будилов В.В.** Коррозионные свойства вакуумно-плазменных покрытий на конструкционных сталях // Оптимизация технологических процессов по критериям прочности: межвуз. науч. сб. Уфа: УАИ, 1990. С. 48–54.

6. **Пятыхин Л.И., Падалка В.Г., Купченко В.В. и др.** Исследование коррозионных свойств вакуумно-плазменных нитридо-титановых покрытий на сплаве ВТ-8 // Защита металлов. 1988. Т. 24. № 6. С. 996–998.

7. **Вершина А.К., Изотова С.Д., Пителько А.А.** Влияние технологических параметров процесса осаждения из сепарированного плазменного потока TiN-покрытий и их защитные свойства // Физика и химия обработки материалов. 1991. Т. 3. С. 65–68.

8. **Коваль Н.Н.** Источники низкотемпературной плазмы и электронных пучков на основе дуговых разрядов низкого давления с полым анодом: дис. в виде науч. доклада на соискание ученой степени д-ра техн. наук. Томск, 2000.

ТЕХНОЛОГИЯ КОНСТРУКЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ:

учебник для студентов машиностроительных специальностей

А.М. Дальский, Т.М. Барсукова, А.Ф. Вязов и др.

6-е издание 592 с.: ил. ISBN 5-217-03311-8

Цена 319 р. с НДС

Рассмотрены современные и перспективные технологические способы производства черных и цветных металлов, изготовление заготовок и деталей машин из металлов и неметаллических материалов: литьем, обработкой давлением, сваркой, резанием и другими способами, а также прогрессивные малоотходные способы изготовления заготовок и деталей из порошковых материалов.

Шестое издание (5-е изд. 2003 г.) исправлено и дополнено новыми материалами по нанотехнологиям, публикацией задачника по всем основным разделам курса с доведением решения задач до числового значения. При этом обеспечивается очень тесная связь методического характера с учебным материалом в его приложении к технологии. В этом проявляется, в частности, старый мудрый принцип: "Знать – значит уметь!".

Учебник подготовлен коллективом преподавателей МГТУ им. Н.Э. Баумана.

Для студентов машиностроительных специальностей вузов.

Гриф Минобрнауки

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; по e-mail: realiz@mashin.ru
Дополнительную информацию можно получить по телефонам: (499) 269-66-00, 269-52-98 и на сайте WWW.MASHIN.RU

Реклама Вашей продукции в нашем журнале – один из способов достижения Вашего успеха!

Журнал "Упрочняющие технологии и покрытия" читают руководители и специалисты предприятий машиностроительного комплекса.

Публикация рекламного объявления в нашем журнале даст Вам возможность:

- найти партнеров, заинтересованных в современных исследованиях, а также внедрении Ваших идей и разработок в области машиностроения;
- установить контакты с организациями и фирмами в России и странах ближнего и дальнего зарубежья;
- наладить обмен информацией.

Наш журнал распространяется только по подписке – это является надежной гарантией того, что Ваше рекламное объявление прочитают именно специалисты, т.е. оно попадет точно в цель.

Обращайтесь в отдел продаж, маркетинга и рекламы
ООО "Издательство Машиностроение":
107076, г. Москва, Стромынский пер., д. 4
Тел.: (499) 269-66-00, 269-52-98 Факс (499) 269-48-97
E-mail: marketing@mashin.ru www.mashin.ru

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 подрисуночную 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.

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
E-mail: utp@mashin.ru. **Web-site: www.mashin.ru.**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Подживотов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 26.05.09 г. Подписано в печать 23.07.09 г. Формат 60 88 1/8. Бумага офсетная. Печать офсетная.
Усл. печ. л. 5,88. Уч.-изд. л. 5,68. Заказ 598. 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