

УДК 621.793

Применение газодинамического напыления при ремонте нефтегазового оборудования

Г.В. Москвитин (докт. техн. наук), В.Е. Архипов (канд. техн. наук), А.Ф. Лондарский (канд. техн. наук), М.С. Пугачев (научный сотрудник), Н.В. Широкова (научный сотрудник)
(Федеральное государственное бюджетное учреждение науки "Институт машиноведения им. А.А. Благонравова" Российской академии наук)

Приведены результаты исследований структуры и свойств покрытий, нанесённых методом "холодного" газодинамического напыления, и представлен механизм формирования свойств. Исследования включают когезию и прочность сцепления наносимых покрытий никеля, меди, алюминия, цинка; зависимость твёрдости нанесённого металла от технологических параметров процесса; параметры коэффициента трения покрытий никеля и цинка и коррозионной стойкости в среде слабого электролита. Использование метода "холодного" газодинамического напыления для ремонта и восстановления оборудования, работающего при добыче и переработке углеводородов под воздействием значительных нагрузок, агрессивной и агрессивно-абразивной среды, позволит снизить затраты на закупку новых деталей и повысить ресурс эксплуатируемых.

Оборудование и изделия, которые используются для добычи, транспортировки и переработки нефтепродуктов, как правило, испытывают значительное воздействие коррозионной и коррозионно-абразивной среды, которая существенно снижает сроки его эксплуатации. Например, отказ резьбового соединения насосно-компрессорных труб составляет порядка 50 % всех эксплуатационных отказов, что сказывается на количестве спускоподъёмных операций (СПО) и, соответственно, добыче углеводородов. Использование при ремонте и восстановлении изношенных по-

верхностей традиционных методов и приёмов нанесения покрытий не всегда обеспечивает получение необходимых результатов. Кроме того, не все методы можно применять для нанесения металла на локальные участки поверхности деталей без использования защитной оснастки при минимальном разогреве основного объёма металла. Поэтому разработка новых методов нанесения покрытий может позволить расширить номенклатуру восстанавливаемых деталей и повысить качество ремонта.

Нанесение многофункциональных покрытий газо-

динамическим напылением (ГДН) может быть использовано для восстановления геометрических размеров изделий, включая узлы трения скольжения, придания поверхности защитных свойств от воздействия коррозионной и коррозивно-абразивной среды, герметизации соединений, которые работают при низкой и высокой температурах и т. д. Этот метод нанесения покрытий имеет ряд существенных преимуществ перед традиционными, например газотермическими методами напыления. Его можно использовать в производственных и полевых условиях, так как качество покрытия существенно не зависит от воздействия внешней среды (температура, влажность) для нанесения на поверхность покрытий на основе никеля, меди, алюминия, цинка или их сочетания шириной от 6 мм и толщиной до 1 мм и более. Мелкодисперсные порошки металлов не нагреваются выше 50 °С, и поэтому их физико-механические характеристики существенно не изменяются. В процессе напыления разогрев деталей, изделий и конструкций не превышает 120...140 °С, благодаря чему геометрия и механические характеристики сохраняются. Данное преимущество позволяет наносить покрытия на тонкостенные изделия, изготовленные из металлов, имеющих низкую температуру плавления, например алюминия и его сплавов. При газодинамическом напылении для повышения качества покрытия используют механическую смесь из частиц металла и неметалла (корунда). Поэтому не всегда требуется предварительная подготовка поверхности к напылению, так как корунд, входящий в состав порошковой смеси, очищает поверхность от нестойких загрязнений. Более того, воздействие на поверхность твёрдыми частицами в сочетании с потоком нагретого воздуха может позволить снизить напряжения, возникающие в изделиях или конструкциях, например при использовании сварки.

Свойства покрытия зависят от величины относительного удлинения (δ) и температуры рекристаллизации наносимых металлов. При $\delta > 50\%$ пластичные частицы металла при соударении с подложкой и твёрдыми хрупкими частицами корунда деформируются и наклепываются с повышением твёрдости до 1600...1700 МПа (медь). При повышении температуры напыления за счёт низкой температуры рекристаллизации (200...320 °С) в покрытии происходит процесс возврата (отдыха), при котором состояние тонкой кристаллической структуры (решётки) изменяется и твёрдость падает на 300...400 МПа (рис. 1). Повышение твёрдости покрытия обусловлено на 80 % деформацией меди и

на 20 % наличием структурно-свободного корунда, массовая доля которого составляет 1,03 % [1].

Удельное электрическое сопротивление покрытия меди находится в пределах 0,025...0,030 Ом·мм²/м, и метод напыления можно использовать для электротехнических целей, например для ремонта контактов. Если у металла относительное удлинение (δ) менее 50 % (никель), то при соударении с подложкой и корундом исходная структура (зерно) дробится на фрагменты размером ≈ 100 нм и твёрдость возрастает до уровня 2700...2800 МПа. Так как температура рекристаллизации металла ($> 540^\circ$) выше температуры напыления, изменение параметров процесса не оказывает существенного влияния на твёрдость покрытия (рис. 2). Твёрдость покрытия имеет достаточно стабильное значение, и нагрев в печи при температуре 530 °С с выдержкой 2 ч не приводит к её существенному изменению (кривая 4 на рис. 2). Только нагрев

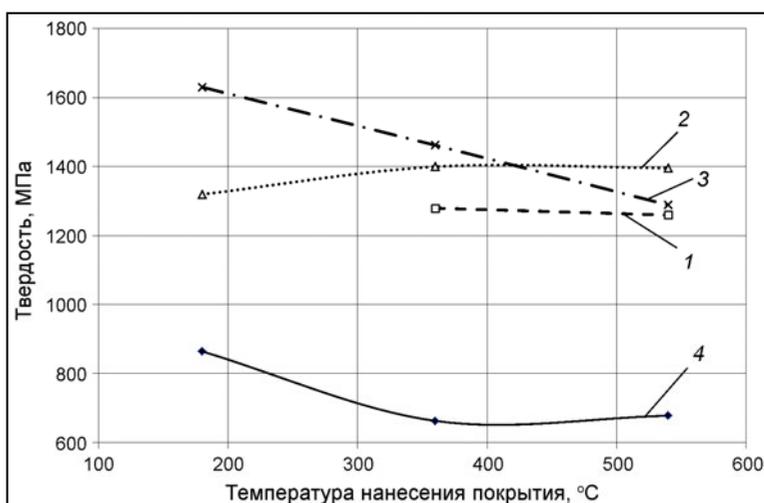


Рис. 1. Изменение твёрдости меди в зависимости от температуры и времени напыления:
1 – один цикл; 2 – 3 цикла; 3 – 5 циклов; 4 – 5 циклов с последующей термической обработкой в печи при температуре 760 °С и выдержке 4 ч

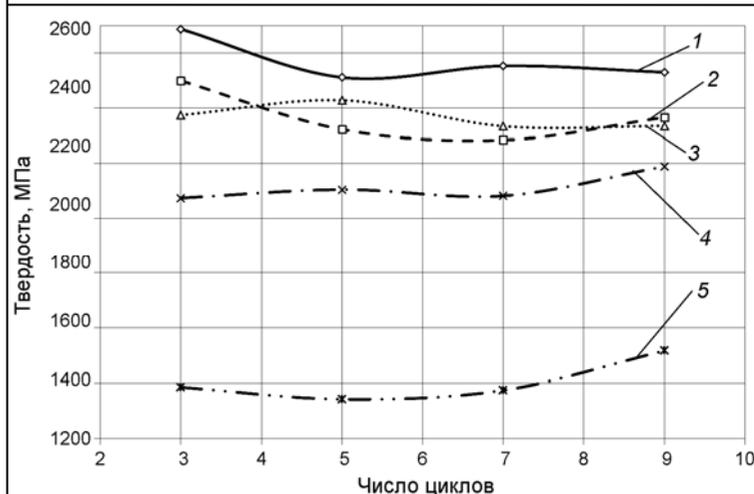


Рис. 2. Изменение твёрдости никеля в зависимости от времени и температуры напыления:
1 – 180 °С; 2 – 360 °С; 3 – 540 °С; 4 – 540 °С с последующей термической обработкой в печи при температуре 530 °С и выдержке 2 ч; 5 – 540 °С с последующей термической обработкой в печи при температуре 830 °С и выдержке 4 ч

до температуры 830 °С (рекристаллизационный отжиг) с выдержкой 4 ч приводит к значительному снижению твёрдости (кривая 5 на рис. 2). Остаточная твёрдость обусловлена наличием структурно-свободного корунда, массовая доля которого при температуре напыления 450 °С составляет 1,08 % [2].

В механической смеси размер частиц корунда колеблется в пределах 0,03...0,05 мм. В структуре слоя меди и никеля частицы корунда имеют размер менее 0,01 мм, в основном 0,002...0,005 мм, что говорит об их дроблении в процессе нанесения покрытия.

Твёрдость покрытия алюминия и цинка достигает 1000 и 700 МПа, соответственно, при увеличении в покрытии массовой доли структурно-свободного корунда до 4...5 %.

Прочность сцепления нанесённого покрытия меди с поверхностью образцов, изготовленных из стали, термически обработанной на твердость 45 HRC, при испытании на сдвиг составляет не менее 43 МПа [3].

При уменьшении твёрдости подложки прочность сцепления повышается. Столь высокие характеристики адгезии позволяют использовать метод для нанесения многофункциональных покрытий на термически обработанные детали, изделия и конструкции без изменения их механических характеристик.

Прочность покрытия (соединение частичек металла между собой – когезия) также находится на достаточно высоком уровне. Испытания нанесённого покрытия меди, алюминия и цинка на статическую прочность при растяжении показали, что величина когезии находится в пределах 52...56 МПа. При этом, если для покрытия меди прочность составляет порядка 25...30 % от прочности чистой меди, то для алюминия и цинка эта характеристика приближается к прочности (80 %) исходных металлов [4].

Покрытия меди и никеля были испытаны для получения трибологических характеристик по схеме палец – диск в сопряжении с контртелом в форме шарика диаметром 6 мм, изготовленного из стали ШХ15, термически обработанной на твердость 61...63 HRC (рис. 3). Исследования пары трения при погружении в ванну с маслом в диапазоне удельных нагрузок 30...60 МПа показали, что коэффициент трения находится в пределах 0,07...0,08 (медь) и 0,04...0,06 (никель). При этом на поверхности покрытия никеля и меди, нанесённого при температуре 450 °С, после испытания были выявлены следы пластической деформации (канавки) от воздействия шарика. На покрытии меди, нанесённом при температуре 270 °С, следов деформации не обнару-

живается, зато на контртеле – шарике был выявлен износ [4].

Проведены сравнительные испытания покрытия меди и образцов, изготовленных из латуни Л68, в сопряжении с контртелом из стали ШХ15, термически обработанной на твердость 61...63 HRC при сухом трении. Скорость перемещения контртела относительно образца составляла 1 м/с при удельном давлении 0,2 МПа. Результаты показали, что интенсивность изнашивания медного покрытия, напылённого при 450 °С, значительно ниже, чем у образцов, изготовленных из латуни при длине пути 18000 м (рис. 4).

Полученные результаты показывают возможность использования метода для нанесения покрытия при восстановлении пар трения скольжения или электрических контактов.

Для выявления коррозионных свойств покрытий никеля и цинка были проведены сравнительные испытания с низкоуглеродистой сталью 20 в среде сла-

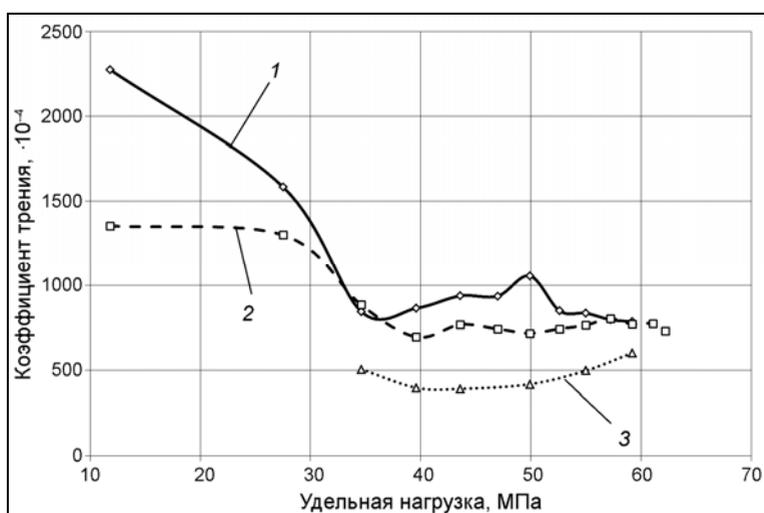


Рис. 3. Коэффициент трения покрытия никеля и меди в зависимости от удельной нагрузки:
1 – покрытие меди (270 °С); 2 – покрытие меди (450 °С); 3 – покрытие никеля (450 °С)

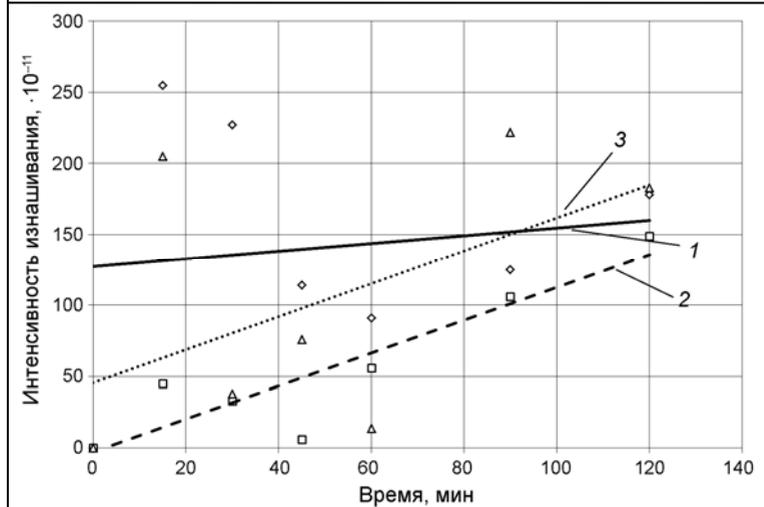


Рис. 4. Интенсивность изнашивания покрытия меди и образцов из латуни в зависимости от времени испытания:
1 – покрытие меди (270 °С); 2 – покрытие меди (450 °С); 3 – латунь Л68

бого электролита (3%-й раствор NaCl) в течение одного квартала. Образцы с нанесённым покрытием полностью погружались в неподвижный раствор на 168 ч и затем в соответствии с методикой промывались, просушивались и взвешивались на аналитических весах с точностью 0,001 г. По результатам взвешивания рассчитывались коррозионные потери массы и скорость коррозии [5]. Как известно из теории, сопротивление коррозии резко снижается при наличии в нанесённом покрытии напряжений и открытой пористости. Поэтому при напылении покрытия никеля на сталь 20 были использованы следующие варианты: 1-й – нанесение покрытия никеля при температуре 450 °С толщиной 0,3 мм; 2-й – то же самое, только с последующей механической обработкой поверхности наждачной бумагой до 8-го класса чистоты; 3-й – то же, что и в 1-м, только с последующей тепловой обработкой в течение 1 ч при температуре 300 °С для снятия напряжений; в 4-м варианте для устранения влияния открытой пористости на сопротивление коррозии на поверхность стали 20 было нанесено покрытие меди толщиной 0,3 мм газодинамическим напылением. Затем на него напылялось покрытие никеля толщиной 0,3 мм при температуре 450 °С.

В данном случае было нанесено композиционное покрытие без переналадки режимов и оборудования только за счёт переключения между емкостями с наносимыми порошками. При необходимости композиционные покрытия с сочетаниями металлов Ni, Al, Cu, Zn и других можно наносить на поверхность изделий и деталей, исходя из условий эксплуатации.

Взвешивание образцов показало, что у стали без покрытия, а также с покрытием никеля, нанесённым по вариантам 1 и 2, коррозионные потери массы имеют практически прямую зависимость от времени испытания (кривые 1–3 на рис. 5). Термическая обработка образцов значительно понижает коррозионные

потери массы при нахождении в коррозионной среде в течение 1160 ч (кривая 4 на рис. 5). Только более продолжительное испытание в коррозионной среде приводит к возрастанию коррозионной потери массы. Минимальные коррозионные потери массы отмечены у образцов из стали 20, на которые было нанесено композиционное покрытие (кривая 5 на рис. 5). Нанесение подслоя меди под покрытие никеля позволяет снизить открытую пористость и повысить сопротивление коррозии.

Рассчитанная скорость коррозии образцов с покрытием показала, что нанесение покрытия никеля увеличивает сопротивление коррозии в 1,9 раза, а после механической обработки поверхности до 8-го класса чистоты только в 1,4 раза (табл. 1, № 2 и 3). Последующая термическая обработка образцов с покрытием сопровождается повышением сопротивления коррозии стали 20 в 4,7 раза (табл. 1, см. № 4). Использование композиционного покрытия, где на подслое из меди наносится покрытие никеля, позволяет повысить сопротивление коррозии низкоуглеродистой стали в 21 раз (табл. 1, см. № 5).

Таблица 1

Результаты испытания на сопротивление коррозии покрытия никеля

Скорость коррозии, кг/(м ² ·год·10 ⁻¹⁵)				
№ 1	№ 2	№ 3	№ 4	№ 5
27,3	14,3	20,0	5,8	1,3
Повышение сопротивления коррозии, раз				
–	1,9	1,4	4,7	21

Примечание. № 1 – сталь 20; № 2 – сталь 20 с покрытием никеля; № 3 – сталь 20 с покрытием никеля и обработкой до V8; № 4 – сталь 20 с покрытием никеля и термической обработкой при температуре 300 °С в течение 1 ч; № 5 – сталь 20 с покрытием никеля, нанесённым на подслое меди.

Испытание на сопротивление коррозии покрытия цинка, нанесённого на образцы из стали 20 методом газодинамического напыления, проводилось в сравнении с образцами из стали 08Ю, покрытыми цинком методом горячего цинкования. Коррозионные потери массы образцов с покрытием, нанесённым газодинамическим напылением, до 1500 ч испытания в растворе слабого электролита выше, чем у образцов, покрытых методом горячего цинкования (кривые 2 и 3 на рис. 6). При продолжении испытаний они начинают снижаться, а у образцов из стали 08Ю с покрытием цинком методом горячего цинкования возрастают и к окончанию испытания значительно превышают аналогичные показатели для стали 20 с покрытием, нанесённым газодинамическим напылением (2016 ч).

Покрытие цинка, нанесённое газодинамическим напылением, повышает сопротивление воздействию коррозионной среды низкоуглеродистой стали до 45 раз, что в

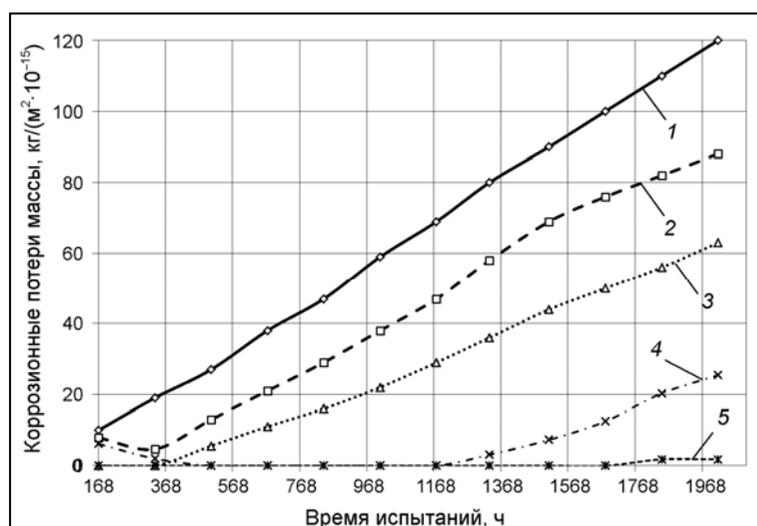


Рис. 5. Коррозионные потери массы образцов из стали 20 при испытании на сопротивление коррозии в среде слабого электролита:

1 – без покрытия; 2 – с покрытием никеля и обработкой поверхности до V8; 3 – с покрытием никеля; 4 – с покрытием никеля и термической обработкой в течение 1 ч при 300 °С; 5 – с покрытием никеля, нанесённым на подслое из меди

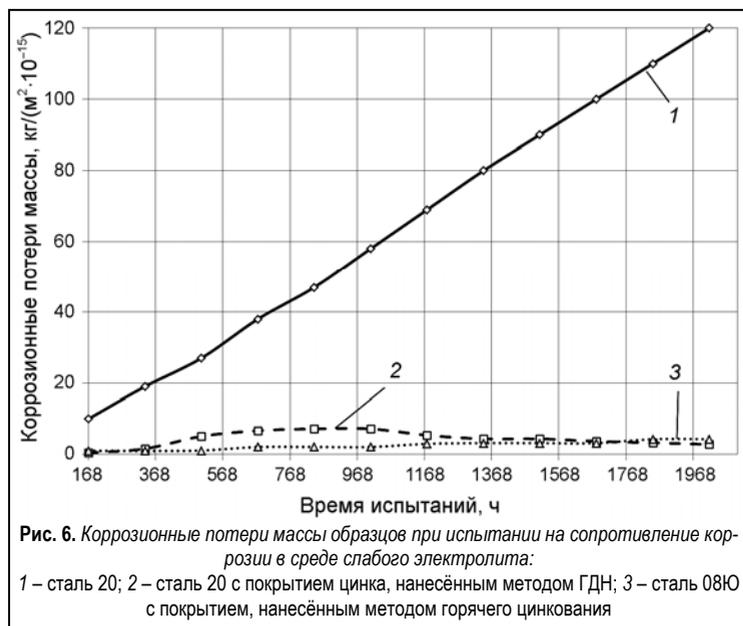


Рис. 6. Коррозионные потери массы образцов при испытании на сопротивление коррозии в среде слабого электролита: 1 – сталь 20; 2 – сталь 20 с покрытием цинка, нанесённым методом ГДН; 3 – сталь 08Ю с покрытием, нанесённым методом горячего цинкования

1,5 раза больше, чем при использовании метода горячего цинкования (табл. 2).

Таблица 2

Результаты испытания на сопротивление коррозии покрытия цинка

Скорость коррозии металлов и сплавов, кг/(м²год·10 ⁻¹⁵)		
№ 1	№ 2	№ 3
27,3	0,6	1,0
Повышение сопротивления коррозии, раз		
–	45,5	27,3

Примечание. № 1 – сталь 20; № 2 – сталь 20 с покрытием цинка, нанесённым газодинамическим напылением; № 3 – сталь 08Ю с покрытием цинка, нанесённым методом горячего цинкования.

Выводы

1. Газодинамическое напыление позволяет наносить многофункциональные покрытия с высокой прочностью сцепления с основой (адгезия >43 МПа) и достаточной для эксплуатации когезией – 55 МПа и выше.
2. Твёрдость наносимых покрытий никеля, меди, алюминия, цинка достигает 2700, 1600, 1100 и 700 МПа, соответственно, что предполагает возможность их использования в условиях абразивного воздействия.
3. Коэффициент трения покрытия меди и никеля в сопряжении со сталью имеет достаточно низкое значение (0,07...0,08 и 0,04...0,06, соответственно) при условиях работы в масляной ванне, а в условиях сухого трения покрытие меди имеет меньший износ, чем латунь.
4. Покрытие никеля и цинка позволяет повысить

сопротивление коррозии низкоуглеродистой стали в среде слабого электролита до 20 и 45 раз, соответственно.

5. Метод газодинамического напыления многофункциональных покрытий может найти широкое применение при ремонте изделий и восстановлении деталей, работающих в условиях воздействия коррозионной и коррозионно-абразивной среды, включая пары трения скольжения.

ЛИТЕРАТУРА

1. Нанесение медных покрытий на сталь газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, А.Ф. Мельшианов, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв // *Металлообработка*. – 2012. – № 2 (68). – С. 13–17.
2. Повышение качества газодинамических покрытий / В.Е. Архипов, А.В. Балашова, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв // *Вестник машиностроения*. – 2012. – № 8. – С. 48–51.
3. Когезия покрытий, нанесённых газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, А.Ф. Мельшианов, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв // *Упрочняющие технологии и покрытия*. – 2014. – № 12. – С. 19–22.
4. Триботехнические характеристики газодинамических покрытий / А.В. Дунаев, В.Е. Архипов, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв // *Трение и смазка в машинах и механизмах*. – 2013. – № 8. – С. 37–42.
5. Коррозионные свойства покрытий, нанесённых газодинамическим напылением / В.Е. Архипов, А.В. Дубравина, А.Ф. Лондарский, Г.В. Москвитин, М.С. Пугачёв, М.М. Хрущёв // *Коррозия: материалы, защита*. – 2014. – № 4. – С. 33–38.

LITERATURA

1. Nanesenie mednykh pokrytiy na stal' gazodinamicheskim napyleniem / V.E. Arkhipov, A.F. Londarskiy, A.F. Mel'shanov, G.V. Moskvitin, M.S. Pugachev // *Metalloobrabotka*. – 2012. – № 2 (68). – S. 13–17.
2. Povyshenie kachestva gazodinamicheskikh pokrytiy / V.E. Arkhipov, A.V. Balashova, A.F. Londarskiy, G.V. Moskvitin, M.S. Pugachev // *Vestnik mashinostroeniya*. – 2012. – № 8. – S. 48–51.
3. Kogeziya pokrytiy, nanesennykh gazodinamicheskim napyleniem / V.E. Arkhipov, A.F. Londarskiy, A.F. Mel'shanov, G.V. Moskvitin, M.S. Pugachev // *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. – 2014. – № 12. – S. 19–22.
4. Tribotekhnicheskie kharakteristiki gazodinamicheskikh pokrytiy / A.V. Dunaev, V.E. Arkhipov, A.F. Londarskiy, G.V. Moskvitin, M.S. Pugachev // *Trenie i smazka v mashinakh i mekhanizmaxh*. – 2013. – № 8. – S. 37–42.
5. Korrozionnye svoystva pokrytiy, nanesennykh gazodinamicheskim napyleniem / V.E. Arkhipov, A.V. Dubravina, A.F. Londarskiy, G.V. Moskvitin, M.S. Pugachev, M.M. Khru-shchev // *Korroziya: materialy, zashchita*. – 2014. – № 4. – S. 33–38.

ФГБУН "Институт машиноведения им. А.А. Благонравова" РАН

101990 Россия, г. Москва, Малый Харитоньевский пер., 4.
Тел.: 8(499) 135-35-95.
E-mail: vearkhipov@mail.ru