

Методика и некоторые результаты применения газодинамической технологии модификации поверхностей деталей машин с целью повышения их ресурса

д.т.н. проф. Москвитин Г.В., к.т.н. Архипов В.Е., к.т.н. Лондарский А.Ф.,
к.т.н. Поляков А.Н., Пугачев М.С., Широкова Н.В., Фалалеев Н.С.
*Федеральное государственное бюджетное учреждение науки
Институт машиноведения им А.А. Благонравова (ИМАШ РАН)
8(499) 135-77-90, gvmoskvitin@yandex.ru*

Аннотация. В статье представлен механизм формирования структуры и свойств покрытий на основе меди, алюминия, никеля, цинка, нанесённых газодинамическим напылением. Приведены результаты испытаний на адгезию, когезию, сопротивление коррозии, а также исследования коэффициента трения покрытий. Показаны примеры использования метода при восстановлении изношенных поверхностей деталей машин и защиты от коррозии изделий машиностроения.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, твёрдость, структура, адгезия, когезия, коррозия, коэффициент трения.

Ресурс многих машин и механизмов, изделий и конструкций ограничен не только эксплуатационными нагрузками, но и воздействием внешней агрессивной среды. Для повышения эксплуатационных характеристик используются разнообразные методы нанесения защитных, износостойких и других покрытий с использованием газотермических методов напыления, погружением изделий в расплав металлов или солей. Однако они не всегда способны обеспечить получение покрытия с высокими физико-механическими характеристиками.

Газодинамическое напыление (ГДН) может составить конкуренцию традиционным методам нанесения покрытий и расширить области применения, так как имеет ряд существенных технологических и экологических преимуществ. Его можно использовать в производственных и полевых условиях в силу того, что качество покрытия существенно не зависит от воздействия внешней среды (температуры, влажности). Покрытие наносится на основе никеля, меди, алюминия, цинка или их сочетания шириной от 6×10^{-6} м и толщиной до 10^{-6} м и больше. Мелкодисперсные порошки металлов не нагреваются выше 50°C , и поэтому их физико-механические характеристики не изменяются. В процессе напыления разогрев деталей, изделий и конструкций не превышает $120 - 140^\circ\text{C}$, 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. Этот метод на предприятиях используют для восстановления геометрических размеров изделий, включая узлы трения скольжения, придания поверхности защитных свойств от воздействия коррозионной и коррозионно-абразивной среды, герметизации соединений, которые работают при низкой и высокой температуре и т.д. [1].

В работе представлены результаты исследования структуры и свойств покрытий, нанесённых «холодным» газодинамическим напылением.

В установках газодинамического напыления используется рабочий газ (воздух, гелий), который под давлением ≈ 6 атм и при подогреве до 600°C направляется в аэродинамическое сопло (сопло Лавалья), где ускоряется до скорости, в несколько раз превышающей скорость звука. Мелкодисперсные частицы металла, попадая в поток воздуха, приобретают необходимую скорость и при соударении с поверхностью присоединяются к ней. Твёрдые частицы корунда, входящие в механическую смесь, деформируют и уплотняют нанесённый металл, повышая характеристики адгезии и когезии покрытия.

Свойства покрытия зависят от величины относительного удлинения (δ) и температуры

рекристаллизации используемых 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 (180 – 320°C) в покрытии происходит процесс возврата (отдыха), при котором состояние тонкой кристаллической структуры (решётки) изменяется и твёрдость падает на 300 – 400 МПа (рисунок 1). Повышение твёрдости покрытия обусловлено на 80% деформацией меди и на 20% наличием структурно свободного корунда, массовая доля которого составляет 1,03% [2].

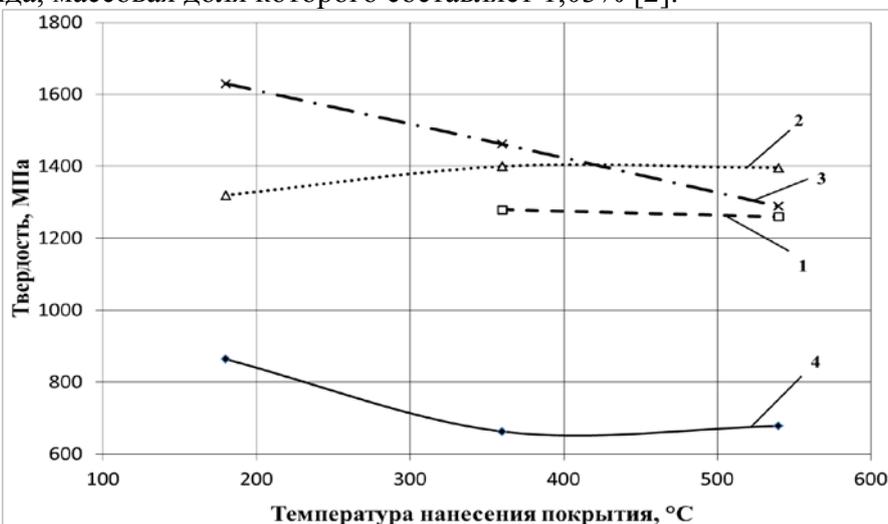


Рисунок 1. Изменение твёрдости меди в зависимости от температуры и времени напыления: 1 – один цикл; 2 – 3 цикла; 3 – 5 циклов; 4 – 5 циклов с последующей термической обработкой в печи при температуре 760°C и выдержке 4 часа

Аналогичное изменение твёрдости от температуры и времени напыления наблюдается при напылении алюминия (рисунок 2). Однако у алюминия низкая температура рекристаллизации и процесс возврата (отдыха) проходит во всём диапазоне температуры напыления (180–540°C).

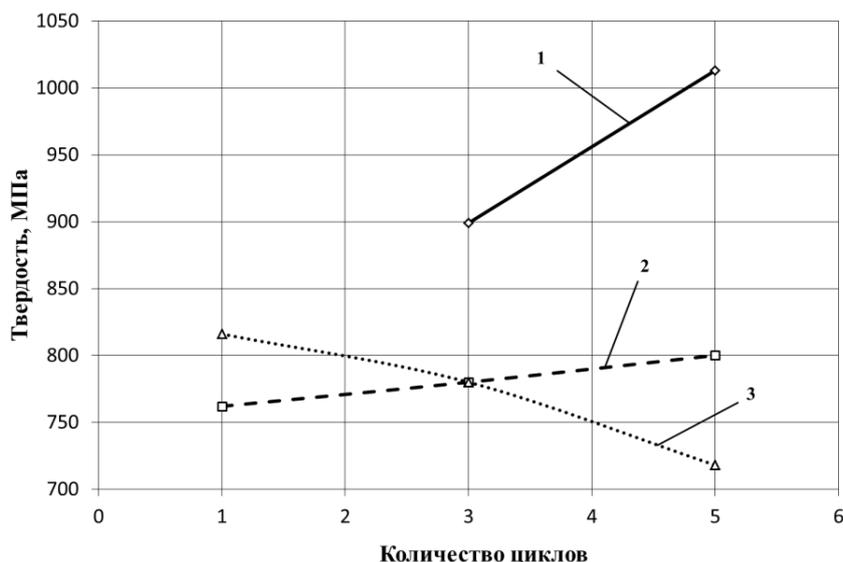


Рисунок 2. Зависимость твёрдости алюминия от времени напыления, нанесённого при температуре: 1 - 180°C, 2 - 360°C, 3 - 540°C

Твёрдость покрытия цинка может достигать ≈ 750 МПа при низкой температуре напыления и снижаться до 550 МПа при повышении температуры потока воздуха до 540°C. Покрытие состоит из частиц металла и включений структурно свободного корунда, массовая доля которого в покрытии цинка составляет 4–5%.

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 ($> 540^\circ\text{C}$) выше температуры напыления, то изменение параметров процесса не оказывает существенного влияния на твёрдость покрытия (рисунок 3). Твёрдость покрытия имеет достаточно стабильное значение и нагрев в печи при температуре 530°C с выдержкой 2 часа не приводит к её существенному изменению (см. 4, рисунок 3). Только нагрев до температуры 830°C (рекристаллизационный отжиг) с выдержкой 4 часа приводит к значительному снижению твёрдости (см. 5 рисунок 3). Остаточная твёрдость обусловлена наличием структурно свободного корунда, массовая доля которого при температуре напыления 450°C составляет 1,08%.

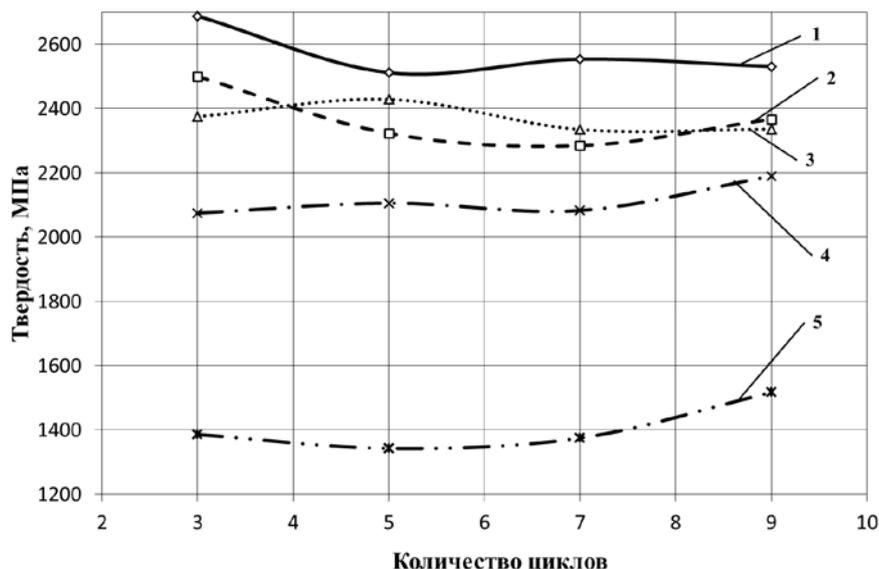


Рисунок 3. Изменение твёрдости никеля в зависимости от времени и температуры напыления: 1 – 180°C , 2 – 360°C ; 3 – 540°C ; 4 – 540°C с последующей термической обработкой в печи при температуре 530°C и выдержке 2 часа; 5 – 540°C с последующей термической обработкой в печи при температуре 830°C и выдержке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

Прочность сцепления нанесённого покрытия с поверхностью образцов из стали при испытании на сдвиг зависит от свойств используемых металлов (таблица 1). Результаты приведены для покрытий, которые нанесены на сталь твёрдостью 44 – 47 HRC. При использовании в качестве подложки более мягких металлов прочность сцепления с подложкой возрастает до 1,5 раз [3].

Таблица 1

Используемые металлы	Адгезия, МПа		
	Температура напыления, $^\circ\text{C}$		
	180	360	540
Медь	14,4	22,1	42,3
Алюминий	30,5	28,3	23
Цинк	34,7	33	13,7

Прочность покрытия (соединение частичек металла между собой – когезия) также находится на достаточно высоком уровне. Испытания нанесённого покрытия меди, алюминия и цинка на разрыв 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 по схеме палец – диск в сопряжении с контртелом в форме шарика диаметром 6 мм, изготовленного из стали ШХ15, термически обрабо-

танной на твёрдость 61 – 63 HRC (рисунок 4). 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°C, после испытания были выявлены следы пластической деформации (канавки) от воздействия шарика. На покрытии меди, нанесенном при 270°C, следов деформации не обнаружилось, зато на контртеле – шарике – был выявлен износ [5].

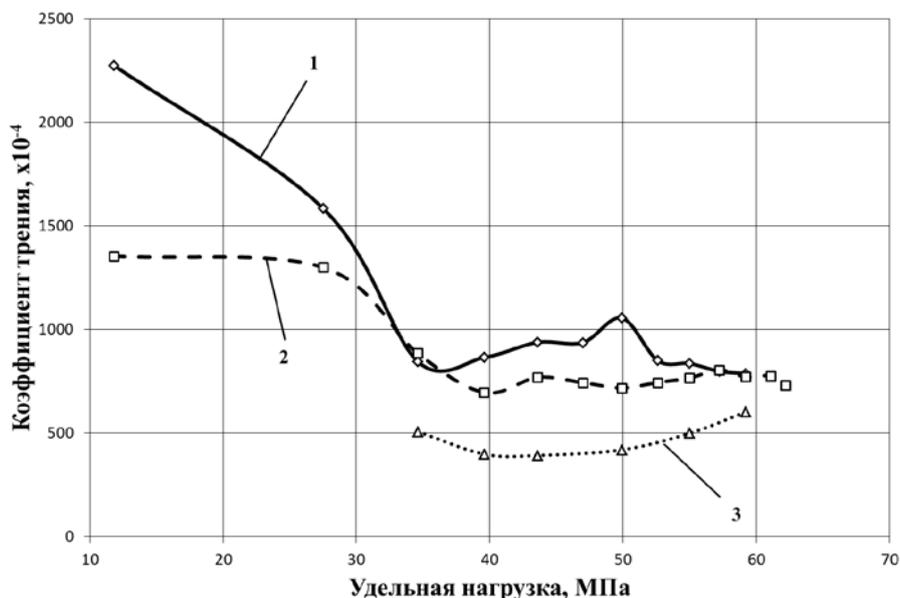


Рисунок 4. Коэффициент трения покрытия никеля и меди в зависимости от удельной нагрузки: 1 – покрытие меди 270°C; 2 – покрытие меди 450°C; 3 – покрытие никеля 450°C

Проведены сравнительные испытания покрытия меди и образцов, изготовленных из латуни Л68, в сопряжении с контртелом из стали ШХ 15, термически обработанной на 61 – 63 HRC при сухом трении. Скорость перемещения контртела относительно образца составила 3,32 м/сек при удельном давлении 0,02 МПа. Результаты показали, что интенсивность изнашивания медного покрытия, напылённого при 450°C на 18,6% ниже, чем у образцов, изготовленных из латуни при длине пути в 23700 м. Полученные результаты показали возможность использования метода для нанесения покрытия при восстановлении пар трения скольжения.

Для выявления антикоррозионных свойств покрытий никеля и цинка были проведены испытания низкоуглеродистой стали 20 в среде слабого электролита (3% раствор NaCl) в течение одного квартала. Образцы с нанесённым покрытием полностью погружались в неподвижный раствор на 168 часов 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 – нанесение покрытия никеля при температуре 450°C толщиной 0,3 мм; 2 – то же самое, только с последующей механической обработкой поверхности наждачной бумагой до 8 класса чистоты; 3 – то же, что в пункте 1, только с последующей тепловой обработкой в течение 1 часа при 300°C для снятия напряжений; 4 – в этом 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°C.

В данном случае было нанесено композиционное покрытие без переналадки режимов и оборудования только за счёт переключения порошкового питателя на блоке управления. При необходимости композиционные покрытия с сочетаниями металлов Ni, Al, Cu, Zn и т.д. можно наносить на поверхность изделий и деталей исходя из условий эксплуатации.

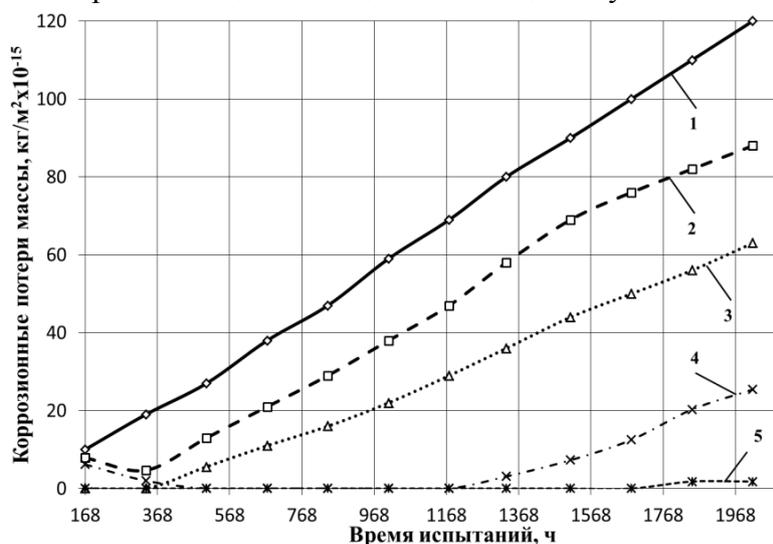


Рисунок 5. Коррозионные потери массы образцов при испытании на сопротивление коррозии в среде слабого электролита: 1 – сталь 20, 2 – сталь 20 с покрытием никеля и обработкой поверхности до ∇ 8, 3 – сталь 20 с покрытием никеля, 4 - сталь 20 с покрытием никеля и термической обработкой в течение 1 часа при 300°C, 5 – сталь 20 с покрытием никеля, нанесённым на подслое из меди

Таблица 2

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 ∇ 8; №4 – сталь 20 с покрытием никеля и термической обработкой при температуре 300°C в течение 1 ч.; №5 – сталь 20 с покрытием никеля, нанесённым на подслое меди				

Взвешивание образцов показало, что у стали без покрытия, а также с покрытием никеля, нанесённым по варианту 1 и 2, коррозионные потери массы имеют практически прямую зависимость от времени испытания (см. 1, 2, 3, рисунок 5). Термическая обработка образцов значительно понижает коррозионные потери массы при нахождении в коррозионной среде в течение 1160 часов (см. 4, рисунок 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 (см. 5, рисунок 5). Нанесение подслоя меди под покрытие никеля позволяет снизить открытую пористость и повысить сопротивление коррозии.

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

Испытание на сопротивление коррозии покрытия цинка, нанесённого на образцы, изготовленные из стали 20 методом газодинамического напыления, проводилось по сравнению с

образцами из стали 08Ю, покрытыми цинком методом горячего цинкования. Коррозионные потери массы образцов с покрытием, нанесённым газодинамическим напылением до 1500 часов испытания в растворе слабого электролита выше, чем у образцов, покрытых методом горячего цинкования (см. № 2 и № 3, рисунок 6). При продолжении испытаний они начинают снижаться, а у образцов из стали 08Ю с покрытием цинка методом горячего цинкования возрастают и к окончанию испытания значительно превышают аналогичные показатели для стали 20 с покрытием, нанесённым газодинамическим напылением (2016 часов).

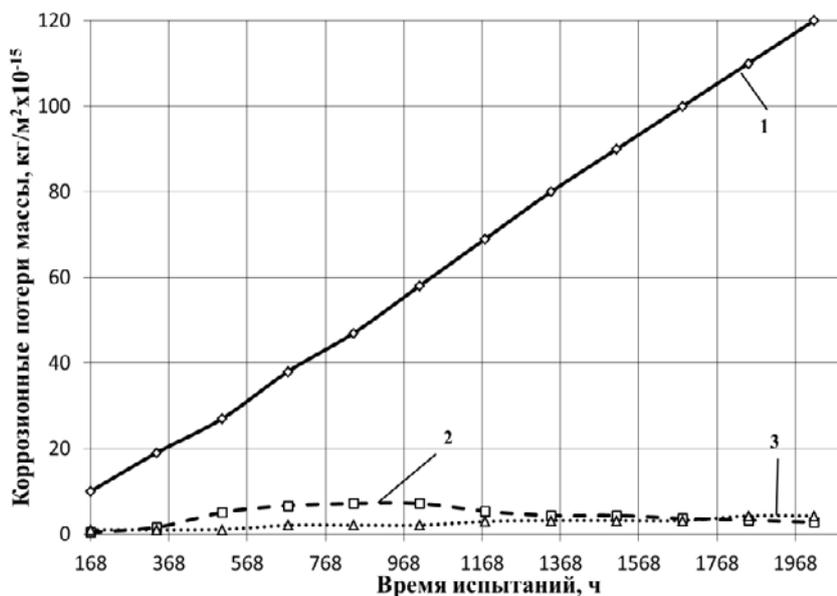


Рисунок 6. Коррозионные потери массы образцов при испытании на сопротивление коррозии в среде слабого электролита: 1 – сталь 20, 2 – сталь 20 с покрытием цинка, нанесённым методом ГДН, 3 – сталь 08Ю с покрытием, нанесённым методом горячего цинкования

Покрытие цинка, нанесённое газодинамическим напылением, повышает сопротивление воздействию коррозионной среды низкоуглеродистой стали до 45 раз, что в 1,5 раза больше, чем при использовании метода горячего цинкования (таблица 3).

Технология используется в машиностроении для устранения дефектов (трещин) алюминиевого поддона автомобиля «Вольво», защиты сварных соединений (швов), восстановления посадочных мест подшипника электродвигателя, устранения дефектов литья, ремонта трещин на головке блока цилиндров двигателя, восстановления посадочных мест подшипников на валу (рисунок 7 а и б) и т.д. [7].

Таблица 3

Скорость коррозии металлов и сплавов, кг/м ² год x 10 ⁻¹⁵		
№1	№2	№3
27,3	0,6	1,0
Повышение сопротивления коррозии, раз		
-	45,5	27,3

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

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00634 А.

Выводы

1. Свойства покрытий, нанесённых газодинамическим напылением, зависят от технологических режимов напыления и физико-механических характеристик металлов, а именно температуры рекристаллизации и относительного удлинения.
2. Газодинамическое напыление позволяет наносить многофункциональные покрытия с вы-

сокой прочностью сцепления с основой (адгезия ≥ 43 МПа) и достаточной для эксплуатации когезией ≈ 55 МПа.

3. Твёрдость наносимых покрытий никеля, меди, алюминия, цинка достигает 2700 МПа, 1600 МПа, 1100 МПа и 700 МПа соответственно, что предполагает возможность их использования в условиях абразивного и коррозионно-абразивного воздействия.
4. 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.
5. Покрытие никеля и цинка позволяет повысить сопротивление коррозии низкоуглеродистой стали в среде слабого электролита до 20 и 45 раз соответственно.
6. 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.

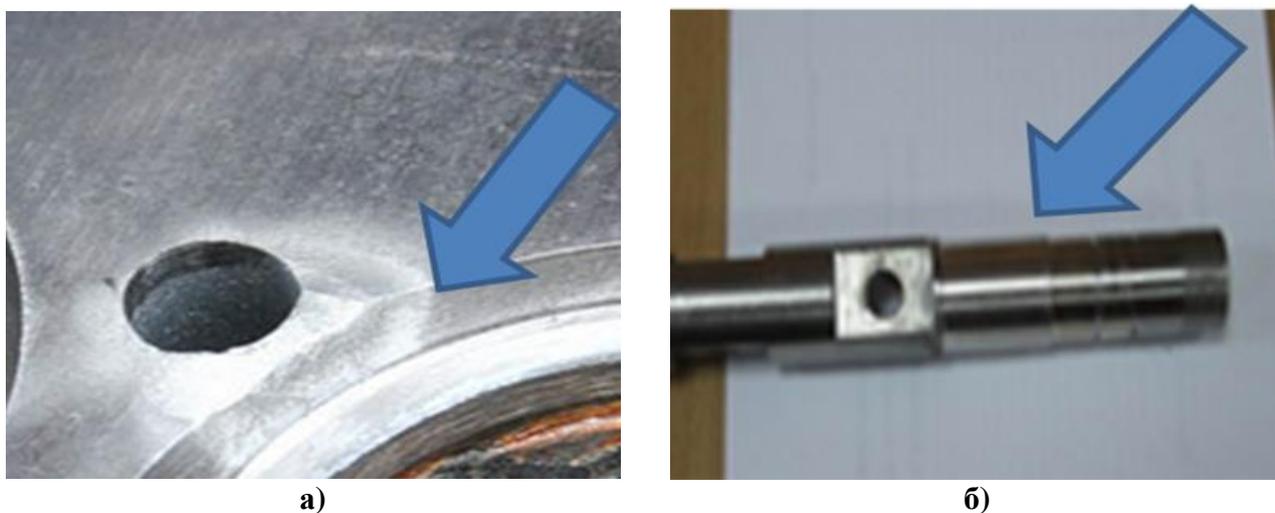


Рисунок 7. Ремонт блока цилиндров (а) и посадочного места на валу (б)

Литература

1. Алхимов А.П., Клинков С.В., Косарев В.Ф., Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика. – М.: Физматлит, 2010, 536 с.
2. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Нанесение медных покрытий на сталь газодинамическим напылением. Металлообработка. 2012. № 2 (68). С. 13 – 17.
3. Архипов В.Е., Балашова А.В., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Повышение качества газодинамических покрытий. Вестник машиностроения. 2012. №8. С. 48-51.
4. Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшанов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Когезия покрытий, нанесённых газодинамическим напылением. Упрочняющие технологии и покрытия. 2014. № 12. С. 19-22.
5. Дунаев А.В., Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С. Триботехнические характеристики газодинамических покрытий. Трение и смазка в машинах и механизмах. 2013. № 8. С. 37-42.
6. Архипов В.Е., Дубравина А.В., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Хрущёв М.М. Коррозионные свойства покрытий, нанесённых газодинамическим напылением. Коррозия: материалы, защита. 2014. № 4. С. 33-38.
7. Димет. Применение технологии и оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dimet-r.narod.ru/> - (Дата обращения 14.10.2014).