

Основные свойства газодинамических покрытий¹

Исследовано влияние механических и физических характеристик напыляемого металла и технических параметров газодинамического напыления на структуру и свойства получаемого покрытия. Определены прочностные и коррозионные характеристики покрытий алюминия, меди, цинка и никеля.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, покрытие, твердость, адгезия, когезия.

The influence of mechanical and physical characteristics of the sprayed metal and technical parameters of gas-dynamic spraying on structure and properties of the obtained coating is studied. The strength and corrosion characteristics of aluminum, copper, zinc and nickel coatings are determined.

Keywords: gas-dynamic spraying, coating, hardness, adhesion, cohesion.

Низкотемпературное (холодное) газодинамическое напыление достаточно широко используют для нанесения разных покрытий [1]. Данный метод обеспечивает получение ряда уникальных свойств и характеристик покрытий по сравнению с тради-

ционными методами нанесения покрытий, например газотермическими. Компактное и надежное оборудование серии "ДИМЕТ" позволяет наносить качественное покрытие в производственных и полевых условиях [1]. Используя узконаправленный поток нагретого воздуха и механическую смесь твердых и пластичных частиц, можно напылять покрытия алюминия, цинка, никеля и меди на труднодоступные локальные участки поверхностей изделий. Материал основы при напылении покрытия не нагревается выше 120–140 °С, поэтому механические свойства и геометрия изделий и конструкций не изменяются. Отсутствие значительного повышения температуры материала основы особенно важно при напылении покрытий на легкие сплавы, например алюминия с присадками магния. Применение газодинамического напыления при изготовлении или восстановлении деталей, оборудования и конструкций можно оценить по широкому использованию покрытий алюминия, цинка, никеля и меди в настоящее время.

Цель работы — исследование структуры и свойств покрытий, нанесенных методом низкотемпературного газодинамического напыления. Полученные результаты позволяют оценить технологические возможности метода и применить его для повышения ресурса изделий и конструкций.

¹ Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ № 14-08-00634 А.



(Окончание статьи. Начало см. на стр. 67)

ширины необходимо использовать полосу с увеличенной шириной в месте зажима (см. рис. 3).

При $\mu = 0,15$ (см. рис. 11, б и 12, б) силы трения затрудняют перемещение элементов заготовки по поверхности пуансона и их утонение. Опасное место (синий цвет) с минимальной толщиной s_f и радиусом r_f от оси Y , где происходит разрыв заготовки, сместилось от вершины донной части отформованной детали для $\mu = 0$, а для $\mu = 0,15$ находится вблизи границы контакта заготовки с пуансоном в вертикальной плоскости симметрии XY .

Задавая разную ширину полосы $b_0 = 0,2D_p; 0,4D_p; \dots; 1,4D_p$ и разный коэффициент трения в контакте полосы и инструмента штампа $\mu = 0; 0,05; 0,1; 0,15$, моделированием получим значения деформаций ε_1 и ε_2 в зоне возможного разрушения полосы, по которым с высокой точностью строим теоретическую ДПД $\varepsilon_1 = f(\varepsilon_2)$ (см. рис. 6, штриховая линия). Теоретические ДПУ и ДПН строятся по методике работы [2].

ДПД, построенную на основании CAD/CAE-моделирования формовки узких и широких заготовок со свойствами по ГОСТ 11701—84 полусферическим, плоским и полуэллипсоидным пуансонами, можно использовать при моделировании штамповки деталей для определения оптимальных параметров штамповки, выбора прессового оборудования, расчета вероятности разрыва заготовки, а также при разработке мероприятий по устранению разрыва заготовки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. **Жарков В. А.** Испытания материалов. Классификация и теория // Вестник машиностроения. 2016. № 6. С. 51—58.
2. **Жарков В. А.** Испытания материалов. Растяжение и обжатие узких и широких заготовок // Вестник машиностроения. 2016. № 8. С. 55—64.
3. **Жарков В. А.** Моделирование в системе Marc обработки материалов в машиностроении // Вестник машиностроения. 2012. № 8—12; 2013. № 2, 3.

Покрyтия никеля, меди, алюминия и цинка на поверхность образцов из стали 40X напыляли на газодинамической установке "ДИМЕТ-404". Для нанесения покрытий использовали механическую смесь мелкодисперсных порошков пластичных металлов (Ni, Cu, Al, Zn) и твердых хрупких частиц корунда (Al_2O_3) в состоянии поставки [1].

Образцы с покрытиями испытывали на универсальной сервогидравлической машине фирмы SHIMADZU с максимальной нагрузкой 50 кН при постоянной скорости актюатора 5 мкм/с. Регистрировали данные в координатах "нагрузка — перемещение". Основные механические характеристики определяли по ГОСТ 1497—84. Когезионную прочность покрытия (когезию) при испытании на растяжение (отрыв) рассчитывали по формуле

$$\sigma_{\text{ког}} = P_{\text{max}}/F,$$

где P_{max} — максимальная нагрузка, предшествующая отрыву, Н; F — площадь сечения нанесенного покрытия, мм².

Прочность сцепления покрытия с подложкой (адгезию) и основного металла при испытании на сдвиг определяли на цилиндрических образцах, имеющих в средней части покрытие в виде кольцевого пояса, по формуле [5]

$$\sigma_{\text{ад}} = P_{\text{max}}/(\pi dh),$$

где d — диаметр образца, мм; h — ширина покрытия (кольца), мм.

Ускоренные испытания на сопротивление коррозии проводили в среде слабого электролита (3 %-й раствор NaCl) в течение 2016 ч. Образцы из низкоуглеродистой стали 20 представляли собой пластину размером 60 × 60 × 3 мм. На обе поверхности образца (общая площадь ≈ 7200 мм²) наносили покрытие толщиной 200 ÷ 300 мкм. В процессе испытаний образцы периодически очищали от продуктов коррозии, для чего их вынимали из раствора и промывали в проточной воде. Затем сушили в термическом шкафу при температуре 60 ÷ 70 °С в течение 40 мин и взвешивали с точностью 0,001 г на аналитических весах. По результатам измерений рассчитывали коррозионные потери массы Δm в зависимости от времени испытания [2]. Скорость коррозии рассчитывали по формуле

$$K = (m_0 - m_1)/(St), \quad (1)$$

где m_0 и m_1 — масса образца первоначальная и после удаления продуктов коррозии, кг; S — площадь поверхности образца до испытания, мм²; t — время испытаний, год.

Свойства покрытий зависят от механических и физических характеристик напыляемого металла и технологических параметров напыления (темпера-

туры и времени процесса). При напылении меди — металла с высоким относительным удлинением (≈ 70 %), зерна меди деформируются при соударении с твердыми частицами корунда, в результате чего увеличиваются число микродефектов и величина микродеформаций.

При температуре напыления 180 °С медь имеет максимальную твердость $HV = 1600$ МПа (рис. 1). Температура рекристаллизации меди $T_p = 300 \div 320$ °С, поэтому при повышении температуры потока воздуха в деформированном металле проходят процессы возврата (отдыха) и величина микродеформаций значительно уменьшается, что сопровождается снижением твердости. При повышении температуры потока воздуха до 540 °С твердость снижается до 1300 МПа (см. рис. 1).

Структура покрытия состоит из плотно соединенных (спрессованных) частиц меди с включениями корунда, средний размер которых составляет 2 ÷ 5 мкм. Спектральный анализ покрытия, нанесенного при температуре 270 и 450 °С, показал наличие Al_2O_3 (корунда) в количестве соответственно 1,27 и 1,09 масс. %. Повышение твердости покрытия обусловлено на 70 ÷ 80 % деформацией пластичных частиц твердыми частицами и на 20 ÷ 30 % содержанием корунда [3].

Твердость покрытия алюминия составляет порядка 1000 МПа, что связано с более низкой температурой рекристаллизации ≈ 120 °С и процессами возврата (отдыха) даже при минимальной температуре напыления [3]. С повышением температуры напыления твердость снижается до 800 МПа (рис. 2). Повышение твердости покрытия на 30 ÷ 40 % связано с большим содержанием корунда в наносимом алюминии.

Никель имеет небольшое относительное удлинение (30 ÷ 40 %) и высокую температуру рекристаллизации (≥ 540 °С), поэтому при воздействии

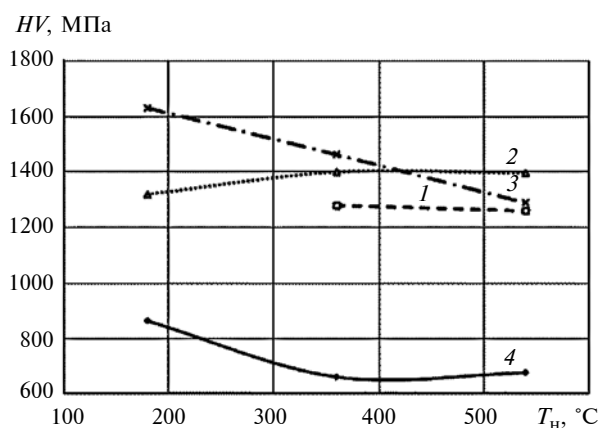


Рис. 1. Зависимости твердости HV покрытия Cu от температуры T_n и числа циклов напыления $n = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 5 с последующей ТО в печи при 760 °С и выдержке 240 с (4)

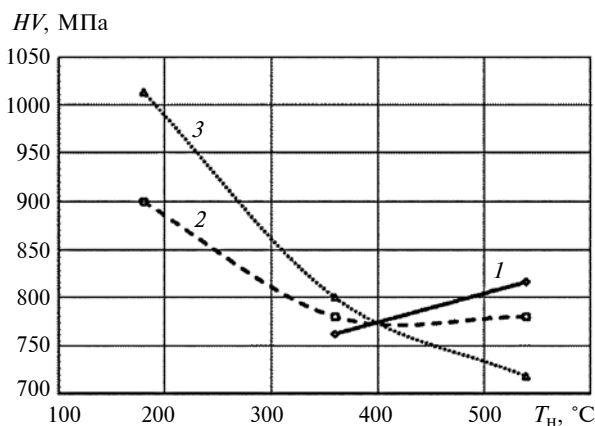


Рис. 2. Зависимости твердости HV покрытия Al от температуры T_n и числа циклов напыления $n = 1$ (1), 3 (2) и 5 (3)

твердых частиц корунда зерна никеля не деформируются, а дробятся на элементарные фрагменты (блоки мозаики) размером ≈ 105 нм [3]. Твердость покрытия никеля существенно не зависит от температуры и времени напыления (рис. 3). Максимальная твердость 2500÷2700 МПа достигается при минимальной температуре напыления 180 °С, дальнейшее повышение температуры и времени напыления приводит к ее снижению на 200 МПа — до 2300÷2500 МПа. Термическая обработка (ТО) покрытия никеля в печи при температуре 530 °С и времени выдержки 2 ч мало влияет на твердость. Однако при дальнейшем повышении температуры и времени ТО в печи твердость никеля снижается до 1400 МПа. Массовая доля корунда в металле покрытия составляет 1,03 % и его наличие повышает твердость на 30 %.

Твердость покрытия цинка мало зависит от температуры напыления и при ее повышении с 270 до 450 °С снижается с 800 до 600 МПа. Содержание корунда в металле покрытия составляет $\approx 4,5$ масс. %, что значительно повышает твердость покрытия.

Газодинамическое напыление без значительного изменения процесса напыления позволяет наносить композиции из нескольких последовательных слоев металлов: медь — никель, алюминий — никель и др. Можно наносить покрытия, состоящие из механической смеси порошков цинка и алюминия или цинка и меди. При ТО покрытие на основе цинка и меди превращается в латунь. При использовании смеси разных частиц закономерность изменения твердости от температуры напыления приобретает иной характер. Например, при увеличении времени и температуры напыления механической смеси алюминия и цинка твердость повышается (рис. 4). Так, повышение твердости до 900 МПа связано со значительным изменением соотношения алюминия и цинка в составе покрытия [4].

Исследования сцепления покрытий меди, алюминия и цинка с основой из стали 40Х при испы-

тании на сдвиг показали зависимость его прочности от технологических параметров процесса [5]. Прочность сцепления покрытия меди с основой при изменении температуры напыления со 180 до 540 °С повышается с 17 до 48 МПа. Термическая обработка стальной основы до твердости 45÷47 HRC мало влияет на адгезию покрытия (рис. 5).

Исследования [5] поверхности образцов с покрытиями алюминия и цинка после испытания и полного смещения нанесенного слоя металла показали наличие сплошного покрытия по всей площади нанесения (ГОСТ 28844—90). Полученные в этом случае результаты интерпретируются как когезионная прочность покрытия при испытании на сдвиг (срез).

Величина когезии для покрытий цинка и алюминия снижается при повышении температуры напыления (см. рис. 5). Когезионная прочность покрытия цинка при напылении с температурой 180 и 360 °С составляет порядка 35 МПа; при максимальной температуре 540 °С когезионная прочность сни-

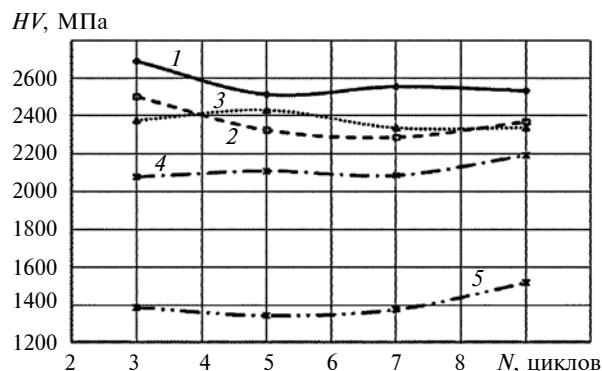


Рис. 3. Зависимости твердости HV покрытия Ni от температуры напыления $T_n = 180$ (1), 360 (2), 540 °С (3), 540 °С с последующей ТО в печи при 530 °С с выдержкой 2 ч (4) и при 830 °С с выдержкой 4 ч (5)

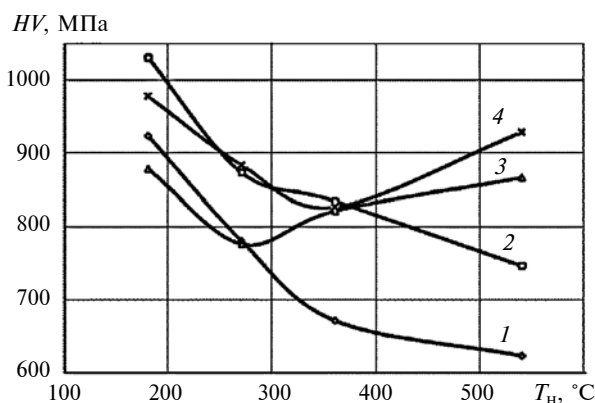


Рис. 4. Зависимость твердости HV двухкомпонентного покрытия Al—Zn от температуры T_n и числа циклов напыления $n = 1$ (1), 3 (2), 5 (3) и 7 (4)

жается до 14 МПа. Когезионная прочность покрытия алюминия несколько ниже — 27÷30 МПа, при повышении температуры напыления она снижается лишь до 23 МПа. Полученная зависимость когезионной прочности от температуры напыления достаточно хорошо согласуется с закономерностями изменения структуры и свойств покрытий, полученных методами металлофизических исследований [3].

Таким образом, когезионная прочность сцепления покрытий цинка и алюминия с подложкой составляет соответственно не менее 35 и 30 МПа.

Когезионная прочность покрытия алюминия при напылении с температурой 180 °С достигает 190 МПа, что более чем в 2 раза выше объемной прочности технически чистого алюминия (рис. 6). С повышением температуры напыления до 270 °С прочность резко снижается до 110 МПа. При температуре напыления 540 °С когезионная прочность уменьшается практически в 2 раза — до 55 МПа. Когезионная прочность покрытия меди при минимальной температуре напыления 180 °С достигает 175 МПа, что ниже объемной прочности

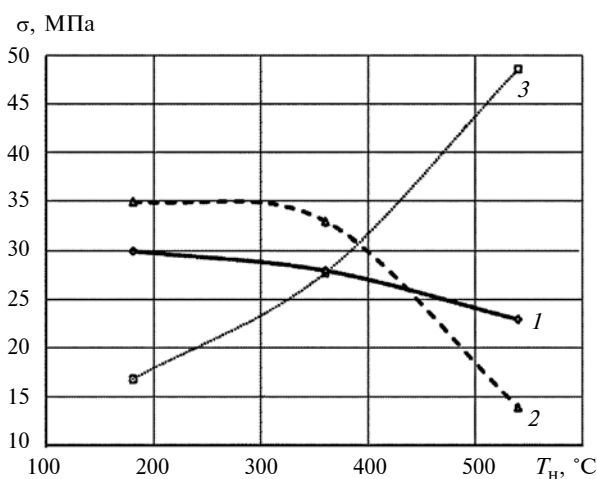


Рис. 5. Результаты испытаний на сдвиг покрытий Al (1), Zn (2) и Cu (3)

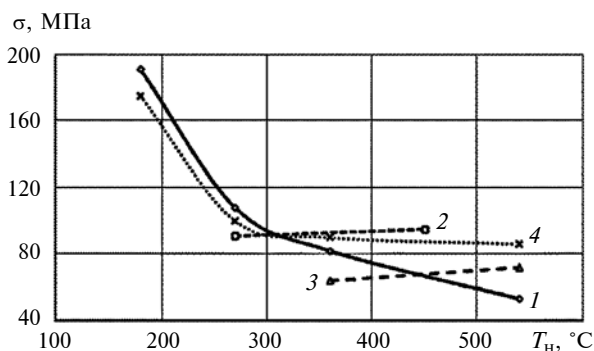


Рис. 6. Зависимости когезионной прочности σ покрытия Al (1), Zn (2), Ni (3) и Cu (4) от температуры T_n напыления

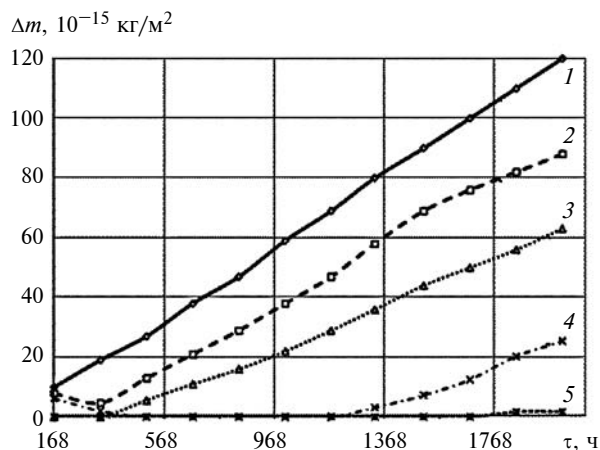


Рис. 7. Коррозионные потери массы Δm стали 20 (1) с покрытием Ni (3) и после обработки наждачной бумагой (2), в печи в течение 1 ч при 300 °С (4), нанесение Ni на слой из Cu (5)

220÷240 МПа технически чистой меди. При повышении температуры напыления когезия покрытия меди уменьшается до 90÷100 МПа.

Когезионная прочность покрытий цинка и никеля составляет соответственно 90÷95 и 63÷72 МПа и мало зависит от температуры напыления при ее повышении на ≈ 200 °С.

Коррозионные потери массы Δm образцов из стали 20 имеют практически линейную зависимость от времени τ нахождения в коррозионной среде и после 2016 ч испытания (12 недель) составляют $120 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² (рис. 7). Коррозионные потери массы Δm образцов с покрытием никеля после 336 ч (2 недели) испытаний имеют почти линейную зависимость от времени τ , а после завершения испытаний они в 2 раза меньше ($63 \cdot 10^{-6}$ кг/мм²), чем чистой стали 20. Обработка нанесенного покрытия наждачной бумагой до 8 класса чистоты снижает коррозионные потери массы Δm всего в 1,4 раза (см. рис. 7). При напылении в покрытии формируются напряжения, которые отрицательно влияют на сопротивление коррозии [2]. Поэтому ТО образцов с покрытием в печи при невысокой температуре (отпуске) снижает коррозионные потери массы Δm .

Пористость покрытий, нанесенных газодинамическим напылением, составляет 4÷8 % и зависит от режима напыления и свойств металла [1]. Предварительное напыление пластичной меди на подложку из стали 20 перед нанесением никеля позволяет получить минимальные коррозионные потери массы Δm .

Скорость коррозии образцов с покрытием никеля, рассчитанная по формуле (1), после завершения испытаний (2016 ч) почти в 2 раза меньше, чем незащищенной стали 20 (табл. 1). Обработка покрытия никеля наждачной бумагой незначительно повышает сопротивление воздействию коррозион-

ной среды. После ТО скорость коррозии снижается почти в 6 раз, а сопротивление коррозии повышается до 15 раз. Предварительное напыление на сталь 20 слоя меди с последующим нанесением слоя никеля повышает сопротивление коррозии низкоуглеродистой стали до 20 раз [2]. Покрытие никеля имеет самую большую твердость 2300÷2600 МПа, поэтому нанесение композиционных слоев металла повышает сопротивляемость разрушению изделий и конструкций не только при воздействии коррозионной среды, но и твердых частиц, находящихся в ней.

Ускоренные сравнительные испытания стали 20 с покрытиями из цинка, алюминия и смеси цинка с алюминием показали, что коррозионные потери массы Δm покрытия алюминия несколько снижались к концу испытаний — с $14,3$ до $10,1 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² (рис. 8). Коррозионные потери массы двухкомпонентного покрытия наоборот возросли с 0 (336 ч) до $10,2 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² (2016 ч) и достигли значений, полученных для покрытия из чистого алюминия. Коррозионные потери массы покрытия цинка возрастали в течение всего времени испытаний — с $0,47$ до $2,8 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² [2].

Таким образом, можно утверждать, что коррозионные потери массы двухкомпонентного покрытия определяются свойством металла, который имеет более низкое сопротивление коррозии.

После ТО двухкомпонентного покрытия коррозионные потери массы Δm снижались с

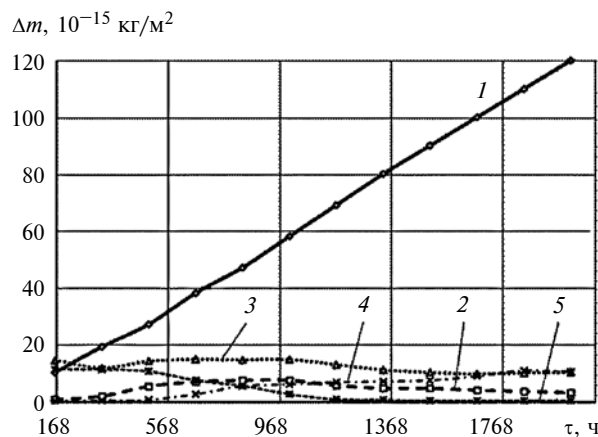


Рис. 8. Коррозионные потери массы Δm стали 20 (1) и стали 20 с покрытиями Zn (2), Al (3), Al + Zn (4), Al + Zn после ТО (5)

$11 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² до 0 в течение 1512 ч испытаний и далее не изменялись (см. рис. 8).

Покрытие алюминия и двухкомпонентное покрытие Al—Zn имели одинаковую скорость коррозии $2,2 \cdot 10^{-6}$ кг/мм² за год (табл. 2). Скорость коррозии двухкомпонентного покрытия после ТО была равна нулю.

Таким образом, высокие коррозионные и механические характеристики покрытий, нанесенных газодинамическим напылением, позволяют повысить ресурс изделий и конструкций, работающих в агрессивных средах и при механическом воздействии твердых частиц и взвесей.

Низкотемпературное газодинамическое напыление можно эффективно использовать для формирования кромок на деталях и изделиях из хрупких материалов (стекла, керамики) и твердых сплавов, например ВК6 или ВК12 [8].

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

1. Димет. Применение технологии и оборудования. <http://www.dimet-r.narod.ru>
2. Коррозионные свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В. Е. Архипов, А. А. Дубравина, А. Ф. Лондарский и др. // Коррозия: материалы и защита. 2012. № 4. С. 33—38.
3. Структура и свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В. Е. Архипов, А. А. Дубравина, Л. И. Куксенова и др. // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4. С. 18—24.
4. Технологические особенности газодинамического напыления покрытий / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов и др. // Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 64—69.
5. Оценка адгезии покрытий, нанесенных газодинамическим напылением / В. Е. Архипов, А. Ф. Лондарский, А. Ф. Мельшанов и др. // Заводская лаборатория. 2013. № 11. С. 45—49.
6. Пат. 2464357 RU: МПК C23C24/02, B23K31/02. Способ формирования кромок деталей машин.

Таблица 1

Скорость коррозии, кг/(мм²·год) 10^{-6} , покрытия Ni

Сталь 20 (основа)	Металл покрытия + последующая обработка поверхности			
	Ni	Ni + наждачная бумага	Ni + ТО	Ni на подслое Cu
27,3/—	14,3/1,9	20/1,4	5,8/14,7	1,34/20,4
Примечание. В знаменателе приведены данные, показывающие во сколько раз повысилось сопротивление коррозии.				

Таблица 2

Скорость коррозии, кг/(мм²·год) 10^{-6} , покрытий Zn и Al

Сталь 20 (основа)	Покрытие			
	Zn	Al	Al + Zn	Al + Zn + ТО
27,3/—	0,6/45,5	2,2/12,4	2,2/12,4	0/—
Примечание. В знаменателе приведены данные, показывающие во сколько раз повысилось сопротивление коррозии.				