

УДК 620.179.4:621.793

Влияние технологических параметров напыления на механические свойства газодинамических покрытий

Г.В. Москвитин, М. С. Пугачев

Федеральное государственное бюджетное учреждение Институт машиноведения им А.А. Благонравова Российской академии наук (ИМАШ РАН)
pugachevmax@mail.ru

Аннотация. Рассмотрены методики испытания покрытий меди, алюминия, цинка и никеля на сдвиг и растяжение методом «кольцевого отрыва», нанесённых газодинамическим напылением. Показано, что методики испытания на сдвиг и растяжение позволяют получать зависимости прочности сцепления покрытий с подложкой от температуры их нанесения. Испытания на когезионную прочность покрытий меди, алюминия, цинка при растяжении с использованием метода «кольцевого отрыва» показали минимальный разброс значений ($\leq 5\%$) при хрупком характере разрушения покрытия, что повышает достоверность полученных механических свойств.

Ключевые слова: газодинамическое напыление, адгезия, когезия, прочность покрытий.

Annotation. Methods of testing the coatings of copper, aluminum, zinc, and nickel for shear and stretching by means of an annular tear-off method applied by gas-dynamic spraying are considered. It has been shown that shear and tensile testing techniques make it possible to obtain the dependence of the adhesion strength of the coatings with the substrate from the temperature of their application. Tests for cohesive strength of coatings of copper, aluminum, and zinc at stretching with use of method of prevention of circular tear-off showed minimal spread of values ($\leq 5\%$). EFFECT: increased authenticity of obtained mechanical properties.

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

Введение

За счет улучшения качества поверхности изделий различного назначения, с помощью нанесения различных покрытий, можно повысить сопротивление ее разрушению под воздействием внешней нагрузки. При эксплуатации изделия всегда возникают нагрузки и соответствующие им напряжения, которые действуют по нормали или касательно к поверхности покрытия и приводят к его разрушению и преждевременному выходу из строя оборудования или авариям. Чтобы этого избежать, покрытия испытывают на когезионную прочность (когезию) и прочность сцепления нанесенного слоя металла с подложкой (адгезию).

Методики, материалы, оборудование

Напыление покрытий меди, алюминия, цинка и никеля на поверхность подложки из стали 40Х проводилось с использованием

газодинамической установки модели «ДИМЕТ-404». Покрытия формировались из механической смеси мелкодисперсных порошков металлов (Cu, Al, Zn, Ni) и твёрдых хрупких частиц корунда (Al_2O_3) [1].

Покрытия наносились с расстояния 10 мм от среза сопла установки до поверхности подложки, при этом скорость перемещения сопла составляла 10 мм/сек. Температура напыления для каждого порошка подбиралась с учетом его физико-механических свойств и находилась в интервале 180-540°C.

Величина адгезии покрытия с подложкой определялась по методике отрыва нанесенного слоя от подложки при испытании на сдвиг [2]. Нагружение покрытий осуществлялось на универсальной сервогидравлической испытательной машине INSTRON с записью диаграммы нагрузка – перемещение. Образец с покрытием устанавливался в матрицу и под воздействием нагрузки (P , рис. 1) и постоянной скорости перемещения 8×10^{-6} м/сек продавливался до резкого падения сопротивления нагрузке, при этом покрытие смещалось по отношению к образцу или смещалось с разрушением.

Предел прочности сцепления покрытия с подложкой вычисляли по формуле [3]

$$\tau = P / \pi Dh, \text{ МПа} \quad (1)$$

где P – максимальная нагрузка в момент разрушения – смещения слоя покрытия, H ; h – ширина пояска покрытия, м; D – диаметр образца, м.

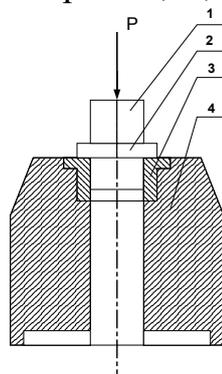


Рисунок 1 – Схема испытания образцов на адгезию при сдвиге:
1 – образец; 2 – слой металла; 3 – матрица; 4 – корпус

Для проведения испытаний на когезионную прочность покрытия изготавливались образцы, на основе промышленного стандарта, регламентирующего испытание покрытий, нанесённых газотермическими методами [4]. Образец состоял из двух симметричных частей, совмещенных с помощью центрирующей втулки и за фиксированных шпилькой с гайками (рис. 2).

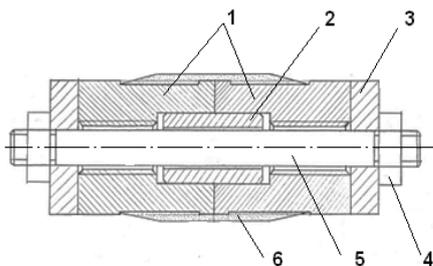


Рисунок 2 – Образец для испытания на растяжение покрытия «методом кольцевого отрыва»: 1 – части образца, 2 – центрирующая втулка, 3 – уплотнительная шайба, 4 – гайка, 5 – шпилька, 6 – покрытие

На поверхность образца наносилось покрытие с последующей механической обработкой до получения заданной толщины слоя. После этого шпилька удалялась, и в каждую часть закручивались хвостовики для установки образца в захваты испытательной машины. Вид покрытия на поверхности образца после разрушения (рис. 4), дал название предлагаемой методике – метод «кольцевого отрыва» [5].

Образцы испытывались на универсальной сервогидравлической испытательной машине фирмы «SHIMADZU» с максимальной нагрузкой 50 кН. Нагружение осуществлялось при постоянной скорости движения актюатора 5×10^{-6} /сек. Регистрация данных при испытании на растяжение велась в координатах нагрузка – перемещение (рис. 3).

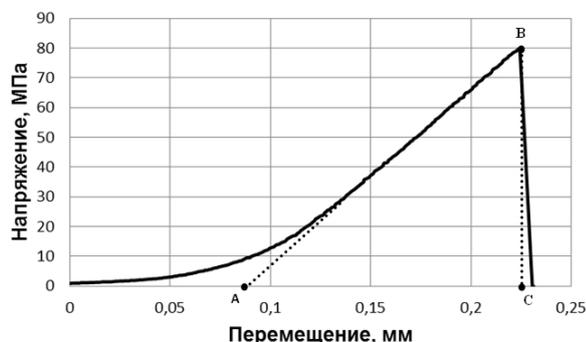


Рисунок 3 – Диаграмма испытания покрытия алюминия при растяжении

Основные механические характеристики покрытия определялись согласно ГОСТ 1497-84. Расчет величины когезионной прочности покрытия проводился по следующей формуле [5]:

$$\sigma_{\text{ког}} = \frac{P_{\text{max}}}{F}, \quad (2)$$

где P_{max} – максимальная нагрузка предшествующая разрушению, Н; F – площадь покрытия, мм^2 .

Площадь напыленного слоя металла рассчитывалась как разность между площадью поперечного сечения образца с покрытием и без покрытия.

Жесткость нагружения оценивалась как отношение предела упругого участка диаграммы напряжение – перемещение (отрезок ВС, рис. 3) к соответствующему ему перемещению (отрезок АС, рис. 3).

Результаты испытаний

После испытаний покрытия меди на сдвиг поверхность подложки содержала остатки покрытия, которые занимали менее 50% ее исходной площади, что позволяет интерпретировать результаты как прочность сцепления покрытия с подложкой. На поверхности подложки видна регулярная текстура из точек красного цвета, а на образце после сдвига покрытия меди, нанесенного при температуре 540°C, по краям слоя присутствуют сплошные участки меди шириной до 1,8 мм, на которых наблюдаются полосы сдвига (рис. 4). Адгезия покрытия меди с подложкой из стали имеет зависимость от температуры напыления и достигает максимального значения 50 МПа при температуре 540°C (рис. 5).



Рисунок 4 – Общий вид образца после испытания на сдвиг

Поверхности подложек образцов с нанесенным покрытием алюминия и цинка после испытания на сдвиг показали наличие на поверхностях сплошного слоя наносимого металла по всей площади подложки, что позволяет интерпретировать результаты испытаний как когезионная прочность покрытия при испытании на сдвиг.

Когезионная прочность покрытия цинка при напылении с температурой потока воздуха до 360°C составляет 35 МПа, повышение температуры потока воздуха до максимальной сопровождается снижением когезионной прочности металла до 14 МПа (рис.5).

У покрытия алюминия когезионная прочность металла практически не зависит от температуры напыления и составляет в среднем 27 МПа (рис. 5). Полученная зависимость когезионной прочности от температуры напыления достаточно хорошо согласуется с выявленными закономерностями изменения структуры и свойств покрытия с использованием металлофизических методов исследования [6-8].

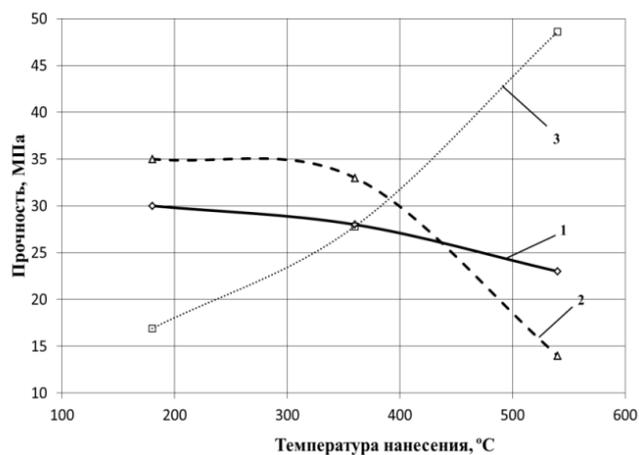


Рисунок 5 – Результаты при испытании на сдвиг покрытия:
1 – алюминий, 2 – цинк, 3 – медь

Рассматривая результаты, полученные при испытании на сдвиг нанесенного слоя покрытия меди, алюминия и цинка, следует отметить, что данный метод позволяет выявить закономерности изменения прочности сцепления покрытия с подложкой, а также когезионной прочности металла покрытия от технологических параметров напыления. Такие испытания должны рекомендоваться и использоваться для исследования механических характеристик покрытий, нанесенных газодинамическим напылением.

В результате испытаний покрытий меди, алюминия, никеля и цинка на когезионную прочность методом «кольцевого отрыва» выявляются четкие зависимости этой характеристики от температуры напыления (табл. 1).

Когезионная прочность покрытия алюминия при повышении температуры напыления сопровождается резким снижением, при этом снижается жесткость покрытия и растет его пластичность.

Для покрытия меди прослеживается аналогичная зависимость когезионной прочности от температуры напыления.

Полученная зависимость изменения когезионной прочности покрытия меди и алюминия от температуры напыления достаточно хорошо согласуется с изменениями в структуре, полученными металлофизическими методами исследования [9].

Повышение температуры напыления покрытия цинка практически не влияет на когезионную прочность металла покрытия и сопровождается снижением жесткости и увеличением пластичности.

Повышение температуры напыления покрытия никеля сопровождается увеличением когезионной прочности и пластичности, при этом значительно снижается его жесткость.

Исследование поверхности образцов после разрушения покрытия, как и вид диаграмм испытаний показывает, что разрушение хрупкое (рис. 3 и рис. 6).

Таблица 1

Результаты испытаний методом «кольцевого отрыва»

Металл для напыления	Температура напыления, °С	Прочность покрытия, МПа	Удлинение, мм	Жесткость, МПа/мм
Алюминий	180	181	0,1	1894
	270	108	0,145	746
	360	82	0,144	573
	540	53	0,146	362
Цинк	270	91	0,135	681
	450	95	0,160	594
Никель	360	64	0,044	1695
	540	72	0,152	473
Медь	180	165	0,091	2375
	270	100	0,134	751
	360	90	0,158	576
	540	86	0,148	585

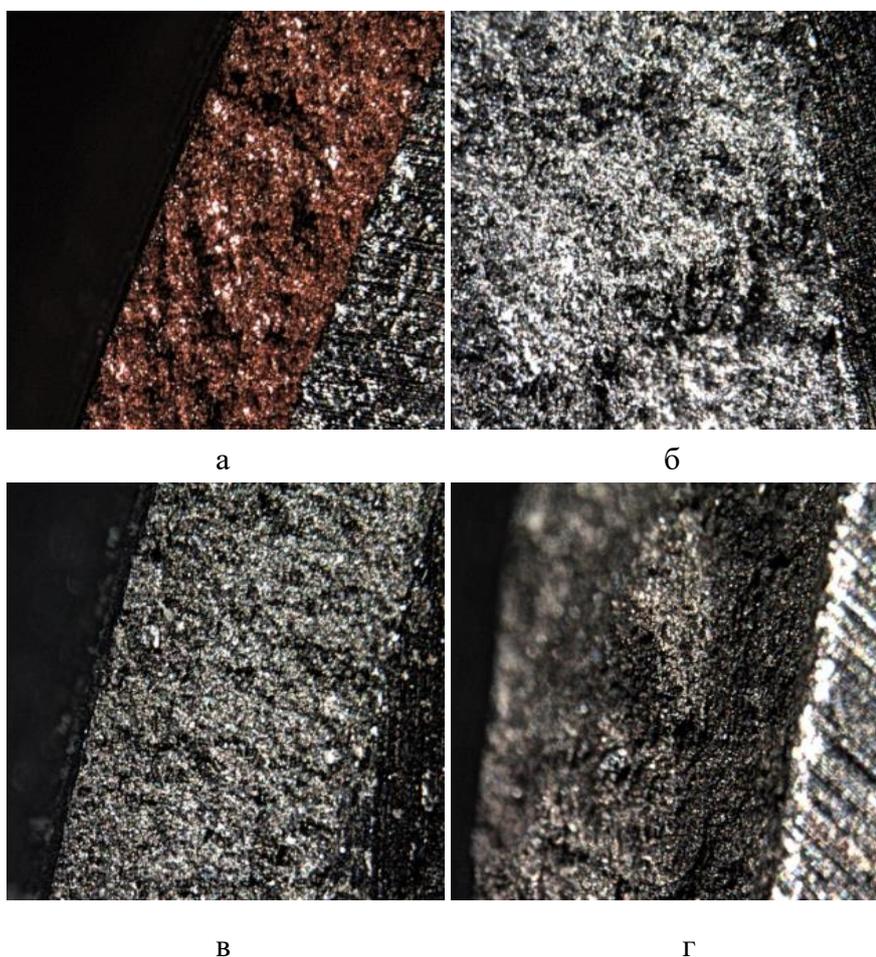


Рисунок 6 – Поверхность разрушения покрытия меди (а), алюминия (б), цинка (в), никеля (г)

Оценка когезионной прочности покрытий методом «кольцевого отрыва» показывает низкий разброс значений. Среднее отклонение результатов по серии образцов составляет от 0,5 до 5%, что очень важно при наличии хрупкого разрушения.

Заключение

Определение механических свойств покрытия при испытании на сдвиг позволило получить зависимость прочности сцепления покрытия с подложкой от температуры напыления, при этом, если адгезия покрытия превышает когезионную прочность нанесенного слоя металла, то методика позволяет оценить когезионную прочность при испытании на сдвиг.

Адгезия покрытия меди с подложкой из стали растет с увеличением температуры напыления и достигает максимального значения 50 МПа при температуре 540°C. Максимальная когезионная прочность покрытий на основе алюминия и цинка составляет соответственно 30 и 35 МПа и падает с увеличением температуры напыления.

Определение механических свойств покрытия методом «кольцевого отрыва» дает возможность исследовать их зависимость от технологических параметров напыления.

Максимальное значение когезионной прочности покрытий составило алюминия 181 МПа, меди 165 МПа, никеля 72 МПа, цинка 95 МПа, при этом прочность покрытий алюминия и меди снижается с ростом температуры нанесения покрытия, для никеля наоборот прочность возрастает, а для цинка остается без изменений.

Метод «кольцевого отрыва» обладает высокой достоверностью оценки когезионной прочности покрытий.

Литература

1. Димет. Применение технологии и оборудования. [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.dimet-r.narod.ru/> - (Дата обращения 14.10.2017).
2. Определение прочности сцепления газотермических покрытий с основой. Методические рекомендации. МР 250-87. – М. ВНИИНМАШ, 1987. - 17 с.
3. *Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшианов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.* Свойства медных покрытий, нанесённых газодинамическим напылением. – Упрочняющие технологии и покрытия. – 2011. - №9. С.17-23.
4. *Хасуи А, Моригаки О.* Наплавка и напыление. – М.: Машиностроение, 1985. – 239 с.
5. *Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.* Оценка когезионной прочности газодинамических покрытий. – Вестник машиностроения. 2019. № 4. С. 64-70.
6. *Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Мельшианов А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.* Технологические особенности газодинамического нанесения покрытий. – Вестник машиностроения. 2015. № 9. С. 64-70.
7. *Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С., Фалалеев Н.С.* Свойства алюминий-цинкового покрытия, нанесенного газодинамическим напылением. – Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. № 6. С.28-34.
8. *Архипов В.Е., Дубравина А.А., Куксёнова Л.И., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.* Структура и свойства покрытий, нанесенных газодинамическим напылением. – Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. № 4 (124). С. 18-24.

9. *Архипов В.Е., Лондарский А.Ф., Москвитин Г.В., Пугачев М.С.* Газодинамическое напыление: структура и свойства покрытий. М.: КРАСАНД, 2017. – 240 с.