

<https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464>

УДК 621.793

## Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией

Чл.-кор. НАН Беларуси, докт. техн. наук, проф. Ф. И. Пантелеенко<sup>1)</sup>, асп. М. Н. Карпец<sup>2)</sup>,  
докт. техн. наук, доц. М. А. Белоцерковский<sup>3)</sup>, канд. техн. наук А. В. Сосновский<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Белорусский национальный технический университет (Минск, Республика Беларусь),

<sup>2)</sup>ОАО «Беларуськалий» (Солигорск, Республика Беларусь),

<sup>3)</sup>ГНУ «Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси» (Минск, Республика Беларусь)

© Белорусский национальный технический университет, 2021  
Belarusian National Technical University, 2021

**Реферат.** Известно, что в настоящее время для восстановления и упрочнения различных изношенных деталей машин широко применяются методы газотермического напыления. Как правило, металлические покрытия, нанесенные газотермическим напылением, обладают худшими прочностными характеристиками, чем сплошные материалы. Считается, что прочность покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величины последних зависят от различных факторов, связанных в том числе с природой материалов и технологией нанесения покрытий. Важным показателем, характеризующим возможность применения металлических покрытий в различных отраслях промышленности, является прочность сцепления (адгезия) покрытий с основным металлом. В статье представлено определение адгезионной и когезионной прочности покрытий из разных материалов, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации. Приведены результаты испытаний прочности металлических покрытий из проволоки марки ER316LSi, нихрома (X20H80) и молибденовой проволоки. По результатам металлографических исследований определена доля участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий, а также описаны некоторые особенности разрушения покрытий. Установлено, что участие когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий отличается в зависимости от применяемого материала. В прочности покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие – основа. Для покрытий из нихрома и особенно из молибдена преобладающей является когезионная составляющая прочности, при которой разрушение происходит не по границе покрытие – основа, а между слоями покрытия.

**Ключевые слова:** прочность покрытий, адгезия покрытий, испытание покрытий, гиперзвуковая металлизация, металлические покрытия

**Для цитирования:** Определение адгезионной и когезионной прочности металлических покрытий, нанесенных гиперзвуковой металлизацией / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // *Наука и техника*. 2021. Т. 20, № 6. С. 459–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464>

### Адрес для переписки

Пантелеенко Федор Иванович  
Белорусский национальный технический университет  
ул. Я. Коласа, 24,  
220013, г. Минск, Республика Беларусь  
Тел.: +375 17 293-95-99  
panteleyenkof@tut.by

### Address for correspondence

Panteleenko Fiodor I.  
Belarusian National Technical University  
24, Ya. Kolasa str.,  
220013, Minsk, Republic of Belarus  
Tel.: +375 17 293-95-99  
panteleyenkof@tut.by

## Determination of Adhesive and Cohesive Strength in Metal Coatings Deposited by Hypersonic Metallization

F. I. Panteleenko<sup>1)</sup>, M. N. Karpets<sup>2)</sup>, M. A. Belotserkovsky<sup>3)</sup>, A. V. Sosnovsky<sup>3)</sup>

<sup>1)</sup>Belarusian National Technical University (Minsk, Republic of Belarus),

<sup>2)</sup>JSC “Belaruskali” (Soligorsk, Republic of Belarus),

<sup>3)</sup>The State Scientific Institution “The Joint Institute of Mechanical Engineering of the National Academy of Sciences of Belarus” (Minsk, Republic of Belarus)

**Abstract.** It is known that at present, methods of thermal spraying are widely used to restore and strengthen various worn-out machine parts. As a rule, metal coatings applied by thermal spraying have lower strength characteristics than solid materials. It is believed that the strength of coatings is proportional to their adhesive and cohesive strength. The value of adhesive and cohesive strength depends on various factors, including the nature of the materials and the technology of coating. An important factor characterizing the possibility of using metal coatings in various industries is the strength of adhesion of coatings to the base metal. The paper presents the determination of the adhesive and cohesive strength of coatings from different materials, applied by the method of hypersonic metallization. The results of testing the strength of metal coatings made of ER316LSi-grade wire, nichrome (Cr20Ni80) and molybdenum wire are given in the paper. Based on the results of metallographic studies, the proportion of the participation of cohesive and adhesive components in the strength of coatings has been determined, and some features of coating destruction have been described. It has been found that the participation of the cohesive and adhesive components of the coating strength differs depending on the material used. The cohesive component prevails in the strength of coatings made of high-alloy wire of the ER316LSi-grade, at which destruction mainly occurs along the coating-base boundary. For nichrome coatings and especially for coatings made of molybdenum, the cohesive component is predominant, in which the destruction of the coating occurs not along the coating-base boundary, but between the coating layers.

**Keywords:** strength of coatings, coating adhesion, coating testing, hypersonic metallization, metal coatings

**For citation:** Panteleenko F. I., Karpets M. N., Belotserkovsky M. A., Sosnovsky A. V. (2021) Determination of Adhesive and Cohesive Strength in Metal Coatings Deposited by Hypersonic Metallization. *Science and Technique*. 20 (6), 459–464. <https://doi.org/10.21122/2227-1031-2021-20-6-459-464> (in Russian)

### Введение

Известно, что прочность металлических покрытий пропорциональна их адгезионной и когезионной прочности. Величина адгезионной прочности зависит от механического, физического и химического взаимодействия между частицами и подложкой; когезионная – от взаимодействия частиц между собой, фазового и химического состава напыленного слоя, размера зерна напыленного слоя, пористости покрытия. Развитие механических связей между напыляемыми частицами и подложкой достигается повышением шероховатости последней. Для этого производится предварительная подготовка поверхности путем нарезания резьбы, струйно-абразивной и электроискровой обработки, химического травления и другими способами. Химическому взаимодействию способствует подготовка поверхности под напыление – активация поверхности, удаление оксидной пленки и создание наклепа. Теплопроводность покрытий ниже, чем у сплошного материала. За счет разницы коэффициентов теплопроводности температура контакта между слоями покрытия выше, чем между слоем по-

крытия и компактной основой. Более того, температура в покрытии при напылении без подогрева выше, чем контактная температура, необходимая для прочного соединения частиц с компактным материалом. Поэтому в большинстве случаев когезионная прочность покрытия больше адгезионной [1].

Разрушение покрытия может происходить, если внешние нагрузки или остаточные напряжения превысят его прочность. В случае превышения адгезионной прочности будет иметь место отслоение покрытия, когезионной – растрескивание или отделение слоев покрытия [1].

Цель исследований – определение адгезионной и когезионной составляющих прочности покрытий из разных материалов, нанесенных методом гиперзвуковой металлизации (ГМ).

### Подготовка образцов

Для проведения исследований применялись штифтовые образцы из низкоуглеродистой стали марки Ст3, диаметр контактной поверхности штифта составлял 2,0–4,0 мм. В качестве материалов для нанесения покрытий использовали

сварочную проволоку марки ER316LSi диаметром 1,2 мм, проволоку марки X20H80 (нихром) диаметром 1,8 мм, молибденовую проволоку диаметром 1,6 мм, химический состав которых приведен в табл. 1.

Выбор метода ГМ обусловлен тем фактом, что данная технология позволяет наносить высокоплотные металлические покрытия, используя в качестве присадочного материала проволоочные электроды [2, 3], что значительно дешевле по сравнению с порошками. В процессе ГМ расплытие жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволоочных электродов, производится струей продуктов сгорания пропано-воздушной смеси. При этом скорость струи на выходе из сопла достигает 1500 м/с при температуре 2200 К, а скорость полета распыляемых частиц, формирующих покрытие, – около 500 м/с [4]. Нанесение покрытий на образцы выполнялось при режимах, указанных в табл. 2.

Для активации поверхности перед нанесением покрытий рабочая поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке смесью, состоящей из корунда (~50 %) и колотой дроби (~50 %), при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа.

### Проведение механических испытаний

Испытания прочности покрытий выполнялись по штифтовому методу на разрывной машине KASON WDW-50 (максимальная разрывная нагрузка 50 кН, погрешность измерений  $\pm 0,5\%$ ). После нанесения покрытий их минимальная толщина на образцах составляла 0,4 мм, чего достаточно для оценки прочности сцепления покрытия с основой с помощью штифтового метода [8]. Измерение толщины покрытия выполняли штангенциркулем ШЦ-125 с погрешностью 0,01 мм. Испытаниям подвергали серию из пяти образцов для каждого материала. За результат принимали среднеарифметическое значение (табл. 3).

Таблица 1

Химический состав применяемых проволок [5–7]

Chemical composition of applied wires [5–7]

Марка проволоки	Массовая доля химических элементов, %								
	Mo	Mn	Cu	C	Si	Ni	Cr	Ti	Al
ER316LSi	2,60	1,80	0,12	0,01	0,9	12,2	18,4	–	–
X20H80	–	≤0,70	–	0,10	0,9–1,5	Остальное – Ni	20–23	≤0,3	≤0,2
Молибден	99,92–99,96	Остальное – примеси							

Таблица 2

Режимы нанесения покрытий

Coating modes

Марка проволоки	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Давление, МПа		Дистанция напыления, мм
				сжатого воздуха	пропан-бутановой смеси	
ER316LSi	117–130	32,0	4,6	0,40	0,40	100–150
X20H80	130–140	32,0	2,0	0,40	0,40	100–150
Молибден	165–170	32,5	1,2	0,35	0,35	100–150

Таблица 3

Результаты испытаний прочности покрытий

Testing results of coating strength

Материал покрытия	Диаметр проволоки, мм	Толщина покрытия, мм	Диаметр штифта, мм	Разрывное усилие, кН	Прочность покрытия, МПа
ER316LSi	1,2	0,7–0,8	4,0	0,343	27,34
X20H80	1,8	0,6–0,7	4,0	0,442	35,16
Молибден	1,6	0,5–0,6	2,0	0,094	29,94

Более наглядно результаты испытаний представлены на рис. 1.

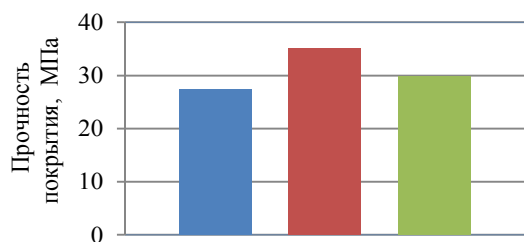


Рис. 1. Прочность покрытий из различных проволочных материалов: ■ – ER316LSi; ■ – X20H80; ■ – молибден

Fig. 1. Durability of coatings from various wire materials: ■ – ER316LSi; ■ – X20H80; ■ – molybdenum

Проанализировав представленные данные, можно отметить, что наибольшей прочностью обладают покрытия из проволоки марки X20H80, прочность которых превышает прочность покрытий из проволоки марки ER316LSi на 29 %, из молибденовой проволоки – на 17 %. При этом прочность покрытий из молибденовой проволоки на 10 % превышает прочность покрытий из проволоки ER316LSi.

### Металлографические исследования образцов

Для определения доли участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий выполнили металлографический анализ микрошлифов. Микрошлифы представляли собой поперечное сечение штифтового образца после отрыва штифта от покрытия (рис. 2).

В процессе экспериментов на микрошлифе были различимы контактные поверхности штифта и шайбы с остатками покрытия на

торцевой поверхности штифта. Исследование проводили с использованием микроскопа «Альтами МЕТ П». Для анализа изображений применяли программное обеспечение Altami Studio. Травление образцов не выполняли. Долю участия адгезии и когезии определяли по отношению суммарной длины участков с частицами покрытия, оставшимися после отрыва, а также без них к условной длине торцевой поверхности штифта (рис. 3).



Рис. 2. Поперечное сечение штифтового образца: 1 – покрытие; 2 – шайба (основа); 3 – штифт

Fig. 2. Cross-section of pin sample: 1 – coating; 2 – washer (base); 3 – pin

По результатам исследования микрошлифов определено, что участие когезионной и адгезионной составляющих прочности отличается в зависимости от применяемого материала (табл. 4).

При испытании покрытий из проволоки марки ER316LSi в большинстве случаев преобладает адгезионное разрушение, т. е. отрыв покрытия происходит по границе покрытие – основа (рис. 3а). Разрушение покрытий из нержавеющей стали (X20H80) проходило как между слоями, так и по границе покрытие – основа, но здесь преобладало когезионное разрушение (рис. 3б).

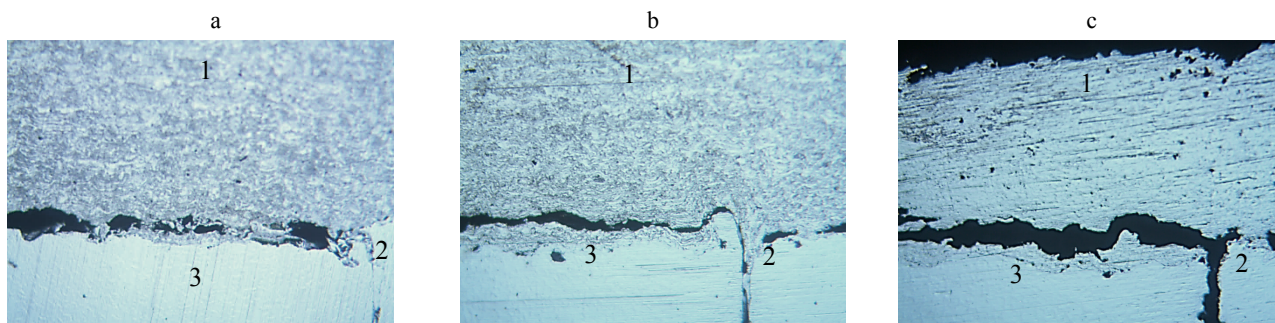


Рис. 3. Фрагмент поперечного сечения штифтового образца после отрыва покрытия (×100) для проволок марок ER316LSi (а), X20H80 (б) и молибденовой проволоки (с): 1 – покрытие; 2 – шайба; 3 – штифт

Fig. 3. Fragment of cross-section of pin sample after tearing off the coating (×100) for wire brands ER316LSi (a), X20H80 (b) and molybdenum wire (c): 1 – coating; 2 – washer; 3 – pin

Таблица 4

Доля участия когезионной и адгезионной составляющих в прочности покрытий из различных материалов  
Share of cohesive and adhesive component participation in strength of coatings from various materials

Марка проволоки	Адгезия, %	Когезия, %
ER316LSi	20–50	50–80
X20H80	55–65	35–45
Молибден	95–100	До 5

Более высокая адгезионная прочность покрытий из нихрома связана с его свойством практически не окисляться при высоких температурах [9] и, вероятнее всего, способностью демпфировать остаточные напряжения в покрытии за счет относительно высокой пластичности материала покрытия. Адгезионная прочность частиц молибдена превысила когезионную прочность самих частиц, поэтому разрушение покрытий из молибдена происходило между слоями покрытия (рис. 3с). Высокая адгезионная прочность покрытий из молибдена связана с его более высокой температурой плавления, что приводит к возникновению химического взаимодействия на контактных поверхностях основы и напыляемого материала. Химическое взаимодействие происходит за счет местного повышения температуры материала основы или предварительно осажденной частицы, при котором частицы и основа получают избыток энергии, необходимой для совершения процесса химической реакции, – энергии термической активации [1, 10]. Кроме того, температура плавления молибдена выше, чем температура кипения его оксида, а это вызывает испарение оксида в процессе напыления. Поэтому на поверхности частиц молибдена при взаимодействии с основой практически отсутствуют оксиды, что способствует сплавлению частиц молибдена с основой и образованию металлических связей [9].

## ВЫВОДЫ

1. Установлено, что участие когезионной и адгезионной составляющих прочности по-

крытий отличается в зависимости от применяемого материала. В прочности покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi преобладает когезионная составляющая, при которой разрушение в основном происходит по границе покрытие – основа.

2. Для покрытий из нихрома (X20H80) и особенно молибдена преобладающей является когезионная составляющая, при которой разрушение происходит не по границе покрытие – основа, а между слоями покрытия. Из этого следует, что такой немаловажный фактор, как прочность сцепления, характеризующий возможность применения металлических покрытий, для покрытий из нихрома и особенно молибдена будет превышать представленные в исследовании результаты прочности.

3. Чтобы повысить прочность сцепления покрытий из высоколегированной проволоки марки ER316LSi, нужно увеличить адгезионную составляющую. Для покрытий из нихрома и молибдена требуется увеличение когезионной составляющей. Температура контактной поверхности основы и напыляемых частиц – важный фактор, оказывающий влияние на прочность сцепления покрытий. Поэтому увеличение адгезионной и когезионной составляющих в прочности покрытий может быть достигнуто подбором оптимальных режимов напыления покрытий для каждого применяемого материала. При этом оптимальные режимы не должны способствовать чрезмерному окислению расплавленного материала, выгоранию легирующих элементов и увеличению остаточных напряжений в покрытии.

4. В некоторых случаях потребуется применение предварительного подогрева основы до оптимальных температур, не способствующих образованию поверхностной оксидной пленки и возникновению чрезмерных остаточных напряжений. В то же время не менее эффективным способом увеличения прочности покрытий может быть принудительное охлаждение основы для уменьшения остаточных напряжений в покрытии.

ЛИТЕРАТУРА

1. Коробов, Ю. С. Анализ свойств газотермических покрытий. Ч. 2. Оценка параметров покрытий / Ю. С. Коробов. Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2016. 92 с.
2. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. 4365 Респ. Беларусь, МПК7 В05В7/20 / М. А. Белоцерковский, А. С. Прядко, А. Е. Черепко. Оpubл. 30.03.2002.
3. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации / Ф. И. Пантелеенко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. 2019. Т. 49, № 4. С. 48–54.
4. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления: Евраз. пат. 024778, МПК В05В7/18, В05В7/22 / М. А. Белоцерковский, А. А. Дюжев, А. С. Прядко, А. Е. Черепко, В. А. Скворцов, А. В. Сосновский. Оpubл. 31.10.2016.
5. Компания ESAB. Продукция и решения [Электронный ресурс]. Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. Дата доступа: 29.09.2019.
6. Сплавы прецизионные. Марки: ГОСТ 10994–74. М.: Изд-во стандартов, 1989. 27 с.
7. Проволока молибденовая для источников света. Технические условия: ГОСТ 27266–87. М.: Изд-во стандартов, 2004. 18 с.
8. Методы исследований материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л. И. Тушинский [и др.]. М.: Мир, 2004. 384 с.
9. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Мorigaki; пер. с яп. В. Н. Попова; под ред. В. С. Степина, Н. Г. Шестеркина. М.: Машиностроение, 1985. 240 с.
10. Газотермическое напыление / под общ. ред. Л. Х. Балдаева. М.: Маркет ДС, 2007. 344 с.

Поступила 04.11.2020

Подписана в печать 05.01.2021

Опубликована онлайн 30.11.2021

REFERENCES

1. Korobov Yu. S. (2016) *Analysis of gas Thermal Coating Properties. Part 2. Estimation of Coating Parameters*. Ekaterinburg, Publishing House of the Ural University. 92 (in Russian).
2. Belotserkovsky M. A., Pryadko A. S., Cherepko A. E. (2002) *Device for High-Speed Coating Spraying (Options)*. Patent No 4365 Republic of Belarus (in Russian).
3. Panteleenko F. I., Belotserkovskii M. A., Karpets M. N., Sosnovskii A. V. (2019) Comparative Analysis of Physical and Mechanical Properties of Coatings Applied by Methods of Electric arc and Hypersonic Metallization. *Mekhanika Mashin, Mekhanizmov i Materialov = Mechanics of Machines, Mechanisms and Materials*, 49 (4), 48–54 (in Russian).
4. Belotserkovsky M. A., Dyuzhev A. A., Pryadko A. S., Cherepko A. E., Skvortsov V. A., Sosnovsky A. V. (2016) *Hypersonic Metallization Method and Device for its Implementation*. Eurasian Patent No 024778 (in Russian).
5. *ESAB Company. Products and Solutions*. Available at: <https://www.esab.ru/ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. (Accessed 29 September 2019) (in Russian).
6. State Standard 10994–74. *Precision Alloys. Grades*. Moscow, Publishing House of Standards, 1989. 27 (in Russian).
7. State Standard 27266–87. *Molybdenum Wire for Light Sources. Technical Conditions*. Moscow, Publishing House of Standards, 2004. 18 (in Russian).
8. Tushinsky L. I., Plokhov A. V., Tokarev O. A., Sindeev V. I. (2004) *Materials Research Methods: Structure, Properties and Processes of Inorganic Coating Application*. Moscow, Mir Publ. 384 (in Russian).
9. Hasui A., Morigaki O. (1985) *Surfacing and Spraying*. Moscow, Mashinostroenie Publ. 240 (in Russian).
10. Baldaev L. Kh., Borisov V. N., Vakhalin V. A., Gannochenko G. I., Zatoka A. E., Zakharov B. M., Ivanov A. V., Ivanov V. M., Kalita V. I., Kudinov V. V., Puzryakov A. F., Sborshchikov Yu. P., Khamitsev B. G., Shkol'nikov E. Ya., Yaroslavtsev V. M. (2007) *Gas-Thermal Spraying*. Moscow, Market DS Publ. 344 (in Russian).

Received: 04.11.2020

Accepted: 05.01.2021

Published online: 30.11.2021