

ТРАНСПОРТ

УДК 621.793

ВЛИЯНИЕ РЕЖИМОВ ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА ПРОЧНОСТЬ СЦЕПЛЕНИЯ МЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОКРЫТИЙ

*чл.-кор. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф. Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО,
(Белорусский национальный технический университет, Минск),*

М.Н. КАРПЕЦ

(ОАО «Беларуськалий», Солигорск),

*д-р техн. наук, доц. М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ, канд. техн. наук А.В. СОСНОВСКИЙ
(Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, Минск)*

Исследовано влияние параметров режима гиперзвуковой металлизации (диаметра проволоки, силы тока и скорости подачи проволоки) на прочность сцепления, пористость и шероховатость металлических коррозионностойких покрытий. Установлено, что напыление покрытий из проволоки марки ER316LSi Ø 1,2 мм на силе тока выше оптимальной уменьшает прочность сцепления покрытий за счет возникновения чрезмерных остаточных напряжений, увеличивает пористость и уменьшает шероховатость покрытий. При использовании проволоки данной марки Ø1,6 мм в покрытии увеличивается пористость и содержание оксидов.

***Ключевые слова:** гиперзвуковая металлизация, металлические покрытия, адгезия покрытий, испытания покрытий.*

Введение. В различных отраслях промышленности для восстановления и упрочнения деталей машин широко применяется газотермическое нанесение покрытий. Одной из наиболее важных эксплуатационных характеристик покрытий является прочность сцепления покрытий с основным металлом. На показатели прочности сцепления покрытий с основой, как правило, оказывают влияние различные факторы, в т.ч. связанные с технологией нанесения покрытий. Известны различные методы газотермического нанесения покрытий, имеющие свои преимущества и недостатки. С экономической точки зрения предпочтительным методом нанесения металлических покрытий является гиперзвуковая металлизация (ГМ). ГМ позволяет наносить высокоплотные металлические покрытия различного назначения, используя при этом в качестве присадочного материала проволоочные электроды [1–3], 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 расплываемых частиц, формирующих покрытие, – около 500 м/с [4].

Целью данной работы является экспериментальное исследование влияния параметров режимов напыления (диаметра проволоки, силы тока и скорости подачи проволоки) на прочность сцепления, пористость и шероховатость металлических коррозионностойких покрытий.

Основная часть. Для проведения исследований напыление покрытий выполнялось методом ГМ на установке АДМ-10. В качестве источника питания использовали сварочный полуавтомат ESAB Warrior 500i. Для определения влияния диаметра проволоки на шероховатость, пористость и прочность сцепления покрытий сварочную проволоку марки ER316LSi (таблица 1) Ø1,2 мм и Ø1,6 мм напыляли на пластины из низкоуглеродистой стали марки Ст3 размерами 80x40x5 мм (образцы № 1.2п, № 1.6п) и образцы-штифты из низкоуглеродистой стали марки Ст3 (образцы № 2ш, №5ш). Для определения влияния силы тока и скорости подачи проволоки на пористость, шероховатость и прочность сцепления покрытий сварочную проволоку марки ER316LSi Ø1,2 мм на различных режимах напыляли на образцы-штифты из низкоуглеродистой стали марки Ст3 (образцы №№ 1ш–4ш). В установке АДМ-10 присутствует взаимосвязь между установленной силой тока и скоростью подачи проволоки, поэтому в работе рассматривается влияние изменения силы тока, которая автоматически корректируется сварочным полуавтоматом пропорционально изменению скорости подачи проволоки.

Для активации поверхности перед нанесением покрытий рабочая поверхность образцов подвергалась абразивно-струйной обработке смесью, состоящей из корунда (~50%) фракцией 1,8 мм и колотой дроби (~50%) фракцией 1,2 мм, при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа и расходе воздуха 3 м³/мин. Для проведения исследований напыление покрытий выполнялось на параметрах режима, указанных в таблице 2.

Покрытия наносили в два–три слоя. Толщина покрытий – от 0,4 до 0,8 мм. Температура нагрева образцов после напыления – 100–150 °С.

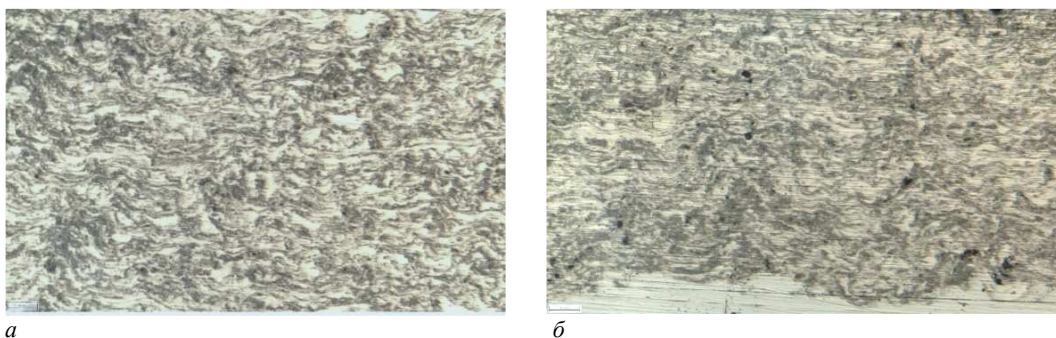
Таблица 1. – Химический состав применяемой проволоки [5]

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	–	–

Таблица 2. – Параметры режима ГМ

№ образца	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Напряжение дуги, В	Скорость подачи проволоки, м/мин	Давление сжатого воздуха, МПа	Давление пропан-бутановой смеси, МПа
1ш	1,2	117–120 (1-й слой)	32	4,6	0,4	0,4
2ш, 1.2п		123–125	32,2	4,6	0,4	0,4
3ш		130–140	32,2	5,75	0,4	0,4
4ш		160–170	32	7,1	0,4	0,4
5ш, 1.6п	1,6	123–125	32	2,3	0,4	0,4

Металлографические исследования. Металлографические исследования на предмет пористости покрытий выполнялись с применением микроскопа МИ-1. Для получения и анализа изображений, подсчета пористости применялось программное обеспечение SIAMS 800. Травление образцов не выполнялось. Общая пористость определялась с помощью программы SIAMS 800 путем соотношения суммарной площади пор, обнаруженных на анализируемом участке покрытия, к проанализированной площади участка покрытия. По результатам исследования влияния диаметра проволоки на пористость покрытий было определено, что общая пористость покрытий в образце № 1.2п составляет до 0,6%, в образце № 1.6 – до 1,25%, частицы в покрытии образцов №№ 1.2п и 1.6п имеют сильно деформированную форму (рисунок 1). Кроме того, в образце № 1.6п просматривается большее содержание оксидов, чем в образце № 1.2п. Большее значение общей пористости и оксидов в образце № 1.6п можно объяснить увеличенным размером расплавленных капель металла за счет применения проволоки большего диаметра.



а – образец № 1.2п; б – образец № 1.6п

Рисунок 1. – Микроструктура образцов, увеличение x200

По результатам исследования влияния силы тока и скорости подачи проволоки на пористость покрытий было определено, что с увеличением силы тока от 117 до 125 А общая пористость не изменяется и составляет до 0,59%, максимальный размер пор не изменяется и составляет до 10 мкм, количество пор не изменяется. С увеличением силы тока от 125 до 140 А общая пористость увеличивается с 0,59 до 1,05%, максимальный размер пор увеличивается с 10 до 20 мкм (рисунок 2), при этом количество пор уменьшается.

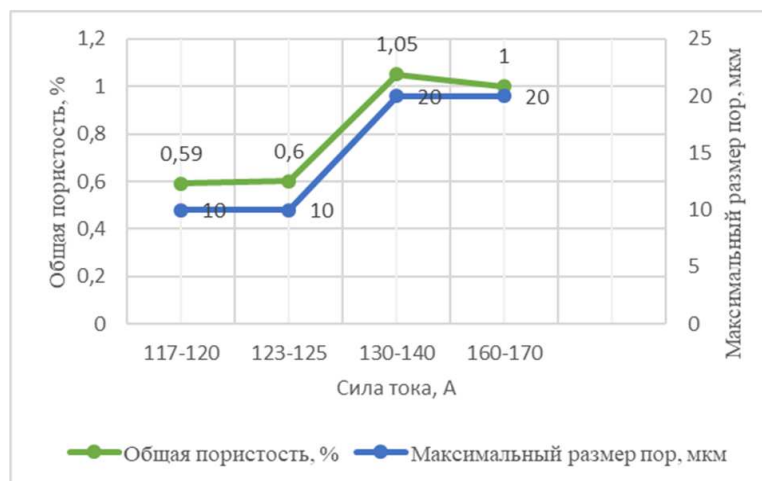
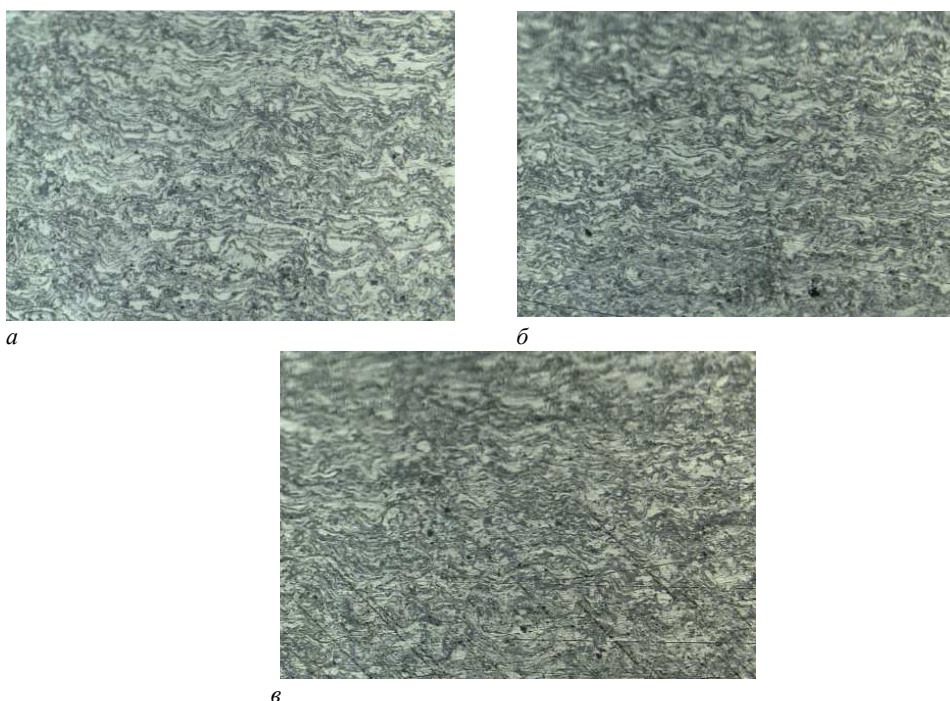


Рисунок 2. – Анализ пористости покрытий

С увеличением силы тока от 140 до 170 А общая пористость практически не изменяется и находится в пределах до 1,0%, максимальный размер пор не изменяется и составляет до 20 мкм, количество пор не изменяется. С увеличением силы тока от 117 до 170 А в структуре покрытий было замечено увеличение содержания оксидов (рисунок 3).

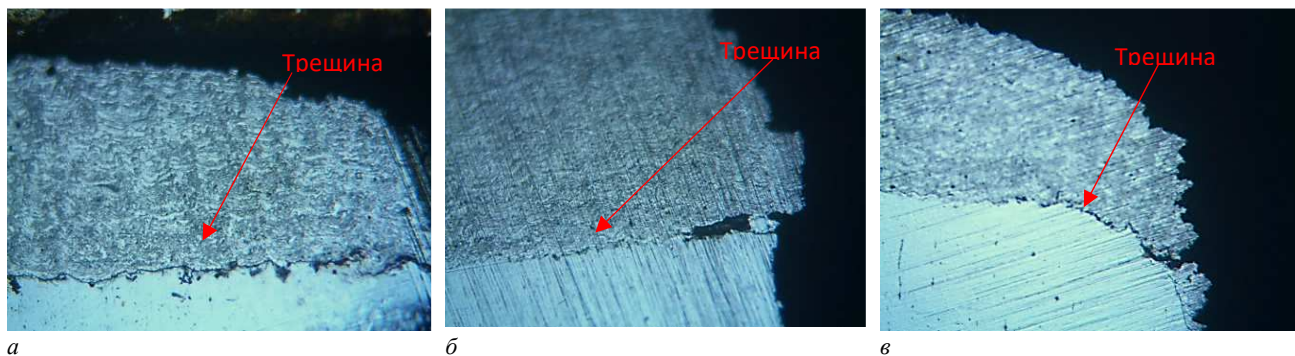


a – 117-130А; *б* – 130-140А; *в* – 160-170А

Рисунок 3. – Микроструктура образцов, увеличение $\times 100$

С целью изучения границы покрытие–основа образцов, напыленных с применением проволоки $\varnothing 1,2$ мм, были проведены металлографические исследования образцов №№ 1ш–4ш. Металлографические исследования выполняли с применением микроскопа «Альтами МЕТ П». Для анализа изображений применялось программное обеспечение Altami Studio. Травление образцов не выполнялось.

По результатам металлографических исследований границы покрытие–основа в образце № 1ш, в периферийной его части, было обнаружено отслоение покрытия на длине до 2,6 мм, что составляет не более 10% всей длины границы покрытие–основа (рисунок 4, *a*). Тем не менее, по результатам испытаний прочность сцепления образца № 1ш оказалась максимальной. В образце № 2ш (рисунок 4, *б*) и образце № 3ш (рисунок 4, *в*), в периферийной их части, было обнаружено отслоение покрытия на длине до 1 мм, что составляет не более 5% всей длины границы покрытие–основа.

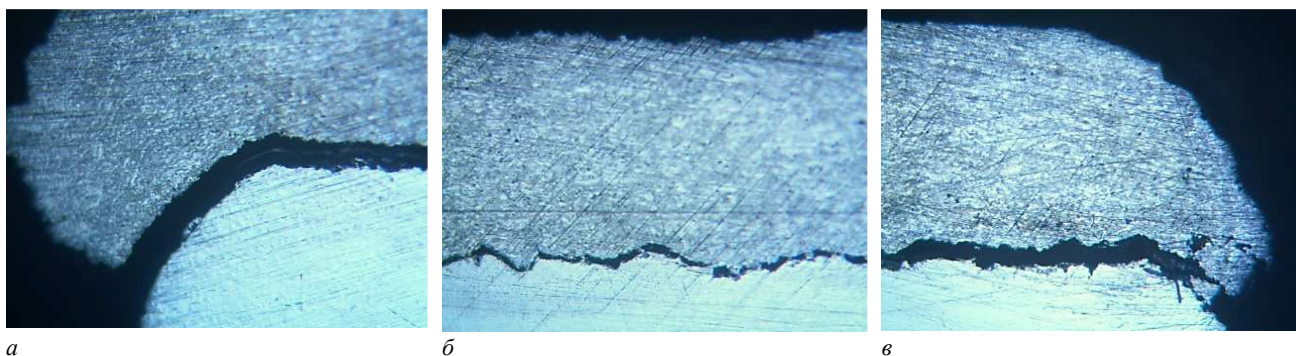


a – образец № 1ш; *б* – образец № 2ш; *в* – образец № 3ш

Рисунок 4. – Отрыв покрытия в образцах

В образце № 4ш было обнаружено отслоение покрытия практически по всей длине границы покрытие–основа (рисунок 5). Кроме того, на поверхности двух образцов из пяти напыленных на силе тока 160–170 А было визуально обнаружено отслоение покрытия по периферийной области.

Ширина раскрытия всех обнаруженных трещин (отслоений) между покрытием и основой уменьшается к центру, что свидетельствует об образовании трещин за счет краевого эффекта при образовании чрезмерных остаточных напряжений [6].



а, в – краевые участки образца; *б* – участок ближе к центру образца

Рисунок 5. – Отрыв покрытия в образце № 4ш

Измерение шероховатости. Для определения влияния режимов ГМ на шероховатость покрытий напыление выполнялось на параметрах режима, указанных в таблице 2. После напыления было произведено измерение шероховатости покрытий с применением профилометра MarSurf PS10, погрешность измерения 5%. Измерения выполняли в пяти направлениях относительно центральной оси образца. Значения шероховатости покрытий из проволоки диаметром 1,2 мм представлены на рисунке 6.

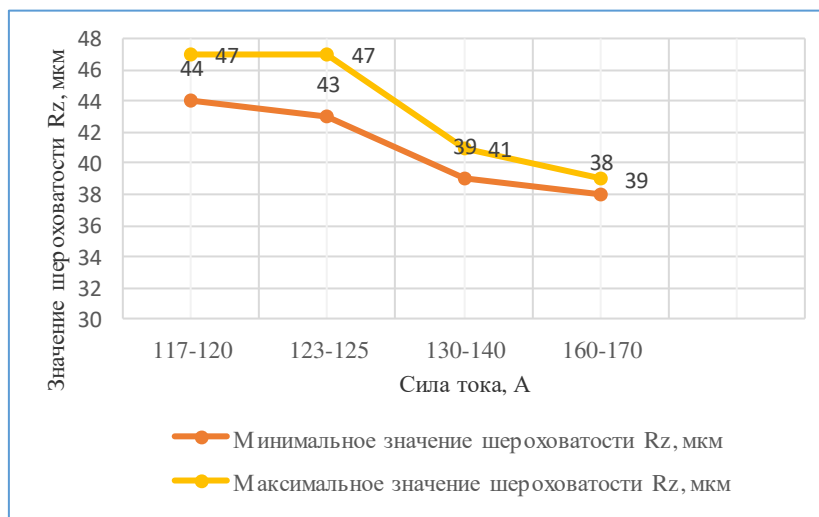


Рисунок 6. – Шероховатость покрытий из проволоки Ø1,2 мм

По результатам измерения шероховатости покрытий было определено, что с увеличением силы тока при применении проволоки Ø1,2 мм шероховатость покрытий уменьшается. Значение шероховатости покрытия, нанесенного с применением проволоки Ø1,6 мм, составило Rz 39–42 мкм.

Механические испытания. Испытание прочности сцепления покрытий выполнялось на разрывной машине KASON WDW-50 (максимальная разрывная нагрузка 50 кН, погрешность измерений ±0,5%). Испытаниям подвергали серию из пяти образцов для каждого случая. За результат принимали среднеарифметическое значение. После напыления минимальная толщина покрытий на образцах составляла 0,4 мм, что является достаточным для оценки прочности сцепления покрытия с основой, используя штифтовой метод [7]. Для обеспечения соосности при приложении нагрузки применялось центрирующее шарнирное приспособление. Результаты прочности сцепления покрытий представлены в таблице 3.

Таблица 3. – Характеристики покрытий

№ образца	Диаметр проволоки, мм	Сила сварочного тока, А	Толщина покрытия, мм	Количество слоев (толщина слоя, мм)	Прочность сцепления, МПа	Шероховатость Rz, мкм	Общая пористость, %				
1ш	1,2	117–120 (1-й слой)	0,7–0,8	3 (0,2+0,3+0,2)	27,34	44–47	0,59				
2ш		130 (2–3-й слой)					0,6				
3ш		123–125					0,7–0,8	2 (0,3+0,4)	24,33	43–47	1,05
4ш		130–140					0,6–0,8	2 (0,3+0,4)	22,17	39–41	1,0
5ш	1,6	160–170	0,4–0,6	2 (0,4+0,2)	20,64	38–39	1,25				
		123–125		2 (0,2+0,2)	24,20	39–42					

По результатам испытаний прочности сцепления покрытий из проволоки Ø1,2 мм, нанесенных на разных режимах, была обнаружена зависимость уменьшения прочности сцепления покрытий при увеличении силы тока (рисунок 7).

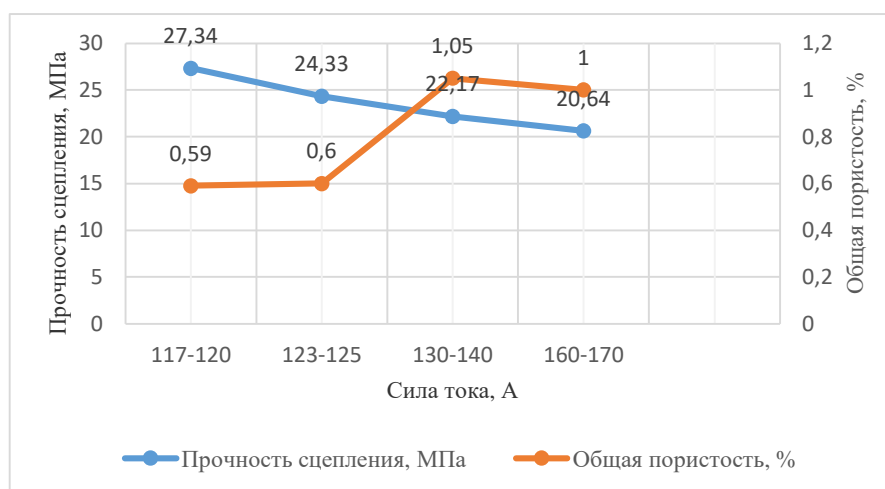


Рисунок 7. – Прочность сцепления покрытий

Как правило, повышение пористости покрытия снижает его когезионную прочность, поскольку поры – это участки с практически нулевой прочностью. Учитывая то, что в случае разрушения исследуемых образцов с покрытиями отрыв покрытия в основном происходил по границе покрытия с основой, т.е. преобладало адгезионное разрушение, поры не оказали существенного влияния на прочность сцепления покрытия с основой. Подтверждением этому является практически одинаковая прочность сцепления и различное значение пористости покрытий из проволок Ø1,2 мм и Ø1,6, нанесенных на одинаковой силе тока (123–125 А).

Известно, что увеличение силы тока приводит к увеличению тепловложения в расплавленные капли, которые в свою очередь попадая на основу, увеличивают температуру на границе покрытие–основа. При этом увеличивается скорость физико-химического взаимодействия, что приводит к повышению прочности сцепления. Однако расчеты согласно [8] показали, что подогрев основы приводит к увеличению остаточных напряжений в покрытии, которые могут понизить прочность сцепления. В полученных при испытаниях результатах уменьшение прочности сцепления при увеличении силы тока вероятнее всего объясняется увеличением остаточных напряжений, связанных с усадкой слоев покрытия. При этом увеличение толщины каждого слоя приводит к увеличению остаточных напряжений в покрытии. Таким образом, с целью предотвращения образования остаточных напряжений в покрытии целесообразно выполнять напыление слоями, не превышающими 0,2 мм, на оптимальных режимах процесса.

Заключение. По результатам проведенных исследований установлено, что подбор оптимальных режимов напыления покрытий является немаловажным фактором, влияющим на прочность сцепления, пористость и шероховатость покрытий. При замене трансформаторного источника питания на инверторный использование проволок различных диаметров и марок, а также при других изменениях в технологии ГМ требуется корректировка режимов процесса. При использовании высоколегированной проволоки марки ER316LSi Ø1,2 мм рекомендуется применять силу тока в диапазоне 117–130 А. При этом по мере увеличения силы тока в указанном диапазоне наблюдается некоторое снижение прочности сцепления покрытий с 27,34 до 22,17 МПа, шероховатости – с 44–47 до 41–39 мкм, повышение пористости – с 0,59 до 1,05%. Учитывая то, что при увеличении толщины каждого слоя, получаемого за один проход, происходит увеличение остаточных напряжений в покрытии, целесообразно выполнять напыление слоями, не превышающими 0,2 мм, с охлаждением предыдущего слоя до оптимальной температуры. Помимо этого, для плоских деталей, в зависимости от габаритов изделия и тол-

щины покрытия, необходимо останавливать процесс напыления при достижении температуры напыляемой поверхности 60–100 °С. При напылении цилиндрических деталей допустимую температуру нагрева покрытия можно определять исходя из расчетов, представленных в работе [9]. С целью недопущения образования отслоений покрытия на плоских изделиях за счет краевого эффекта необходимо выполнять фаску на кромке изделия или дополнительную канавку на краю изделия. Установлено, что нанесение покрытий из проволоки ER316LSi Ø1,2 мм на силе тока, выше оптимальной, уменьшает прочность сцепления покрытий за счет возникновения чрезмерных остаточных напряжений, увеличивает пористость и уменьшает шероховатость покрытий. При использовании высоколегированной проволоки марки ER316LSi Ø1,6 мм необходимо учитывать тот факт, что покрытие из нее будет иметь большую пористость и большее содержание оксидов.

ЛИТЕРАТУРА

1. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты) : МПК7 В05В7/20 / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко ; дата публ.: 30.03.02.
2. Сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, нанесенных способами электродуговой и гиперзвуковой металлизации / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. – 2019. – № 4 (49). – С. 48–54.
3. Исследование коррозионной стойкости покрытий, полученных методом гиперзвуковой металлизации из высоколегированных проволочных материалов, в контакте с агрессивными средами, используемыми при производстве калийных удобрений / Ф.И. Пантелеенко [и др.] // Гор. механика и машиностроение. – 2020. – № 3. – С. 76–85.
4. Способ гиперзвуковой металлизации и устройство для его осуществления : МПК В05В7/18, В05В7/22 / М.А. Белоцерковский, А.А. Дюжев, А.С. Прядко, А.Е. Черепко, В.А. Скворцов, А.В. Сосновский ; дата публ.: 31.10.2016.
5. Компания ESAB [Электронный ресурс] // Продукция и решения. – 2019. – Режим доступа: <https://www.esab.ru/ru/products/filler-metals/mig-mag-wires-gmaw/stainless-steel-wires/ok-autrod-316lsi.cfm>. – Дата доступа: 29.09.2019.
6. Коробов, Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий : в 2 ч. / Ю.С. Коробов. – Екатеринбург : Изд-во Урал. ун-та, 2016. – Ч. 2 : Оценка параметров покрытий. – 92 с.
7. Методы исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский [и др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.
8. Куприянов, И.Л. Газотермические покрытия с повышенной прочностью сцепления / И.Л. Куприянов, М.А. Геллер. – Минск : Навука і тэхніка, 1990. – 176 с.
9. Оценка допустимых температур нагрева цилиндрических деталей при напылении металлических покрытий методом гиперзвуковой металлизации с использованием газа МАФ / М.А. Белоцерковский [и др.] // Вестн. Полоц. ун-та. Сер. В, Промышленность. Прикладные науки. – 2016. – № 3. – С. 130–135.

Поступила 18.03.2021

INFLUENCE OF HYPERSONIC METALLIZATION MODES ON THE ADHESION STRENGTH OF METAL COATINGS

F. PANTELEENKO, M. KARPETS, M. BELOTSEKOVSKY, A. SOSNOVSKY

The influence of the parameters of the hypersonic metallization mode (wire diameter, current strength and wire feed speed) on the adhesion strength, porosity and roughness of metal corrosion-resistant coatings has been investigated. It was found that the spraying of coatings made of ER316LSi Ø 1.2 mm wire at a current strength higher than the optimal one reduces the adhesion strength of the coatings due to the occurrence of excessive residual stresses, increases the porosity and reduces the roughness of the coatings. When using this type of wire Ø 1.6 mm, the porosity and oxide content increases in the coating.

Keywords: hypersonic metallization, metal coatings, coating adhesion, coating testing.