



# ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ МЕХАНИКА

УДК 621.793

**Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО**, чл.-корр. НАН Беларуси, д-р техн. наук, проф.  
заведующий кафедрой «Порошковая металлургия, сварка и технология материалов»<sup>1</sup>  
E-mail: panteleyenkofi@tut.by

**М.А. БЕЛОЦЕРКОВСКИЙ**, д-р техн. наук, доц.  
заведующий лабораторией газотермических методов упрочнения деталей машин<sup>2</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

**М.Н. КАРПЕЦ**  
аспирант<sup>1</sup>  
E-mail: mail-maxiolis@mail.ru

**А.В. СОСНОВСКИЙ**, канд. техн. наук  
ведущий научный сотрудник<sup>2</sup>  
E-mail: sosnovskij@inbox.ru

<sup>1</sup>Белорусский национальный технический университет, г. Минск, Республика Беларусь

<sup>2</sup>Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси, г. Минск, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 31.07.2019.

## СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, НАНЕСЕННЫХ СПОСОБАМИ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ И ГИПЕРЗВУКОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ

*Проведен сравнительный анализ физико-механических свойств покрытий, полученных методом электродуговой и гиперзвуковой металлизации. Сравнения проводились при нанесении покрытий из проволоки Св-08Г2С. Показано, что покрытия, полученные методом гиперзвуковой металлизации, имеют в 2–5 раз выше плотность по сравнению с покрытиями, полученными методом электродуговой металлизации, а также превосходят по прочности сцепления в 1,5–2 раза, микротвердости — в 1,2–1,5 раза, стойкости к окислению — в 1,5–1,7 раза. Установлено, что применение гиперзвуковой металлизации для восстановления и упрочнения деталей машин с применением проволоки Св-08Г2С является более предпочтительным, чем применение электродуговой металлизации.*

**Ключевые слова:** гиперзвуковая металлизация, электродуговая металлизация (ЭДМ), металлические покрытия, физико-механические свойства

**Введение.** На сегодняшний день наиболее экономически предпочтительными способами нанесения металлических покрытий являются способы электродугового напыления: электродуговая металлизация (ЭДМ) и гиперзвуковая металлизация (ГМ) [1, 2]. Улучшение физико-механических характеристик покрытий данных способов напыления за счет изменения технологических параметров процессов значительно расширяет их области применения.

При ЭДМ постоянный ток с разными полюсами подводится на две проволоки, благодаря чему

зажигается дуга, происходит расплавление проволоки-электродов, при этом поток сжатого воздуха распыляет расплавленный металл, который переносится в виде мелких частиц на напыляемую поверхность (рисунок 1). Скорость полета частиц металла под действием сжатого воздуха на расстоянии 30 мм от сопла составляет 60...250 м/с [3]. К преимуществам ЭДМ следует отнести сравнительную простоту применяемого оборудования, а также небольшие эксплуатационные затраты. Недостатками ЭДМ являются повышенное окис-

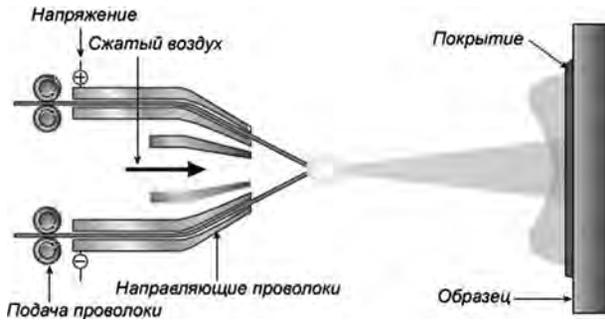


Рисунок 1 — Принципиальная схема процесса ЭДМ  
Figure 1 — Schematic diagram of the process of electric arc spraying

ление распыляемого металла, значительное выгорание легирующих элементов и его пониженная плотность, что в совокупности значительно ухудшает физико-механические свойства получаемых покрытий [4–6].

Более перспективным способом нанесения металлических покрытий является технология гиперзвуковой металлизации (ГМ) (рисунок 2). В процессе ГМ распыление жидкого металла, образующегося в результате теплового воздействия электрической дуги на торцы двух проволочных 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 [7].

Очевидно, что за счет увеличенной скорости распыляющей струи покрытия, полученные методом ГМ, имеют более высокую плотность и прочность сцепления с основой, а также меньшее окисление распыляемого металла. Однако сравнительных исследований покрытий, нанесенных данными способами, не проводили. Целью

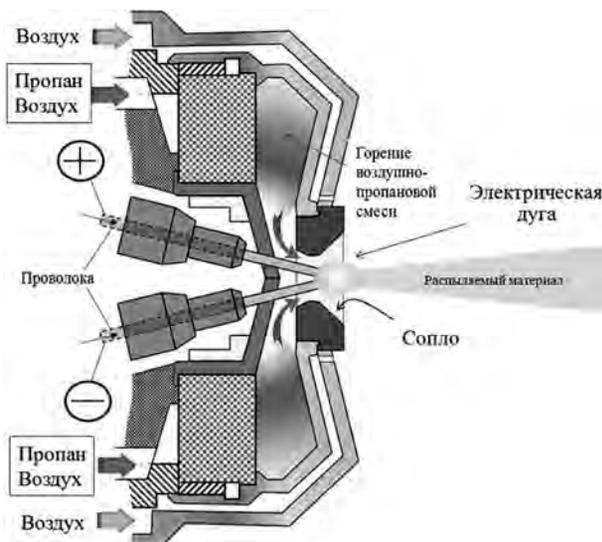


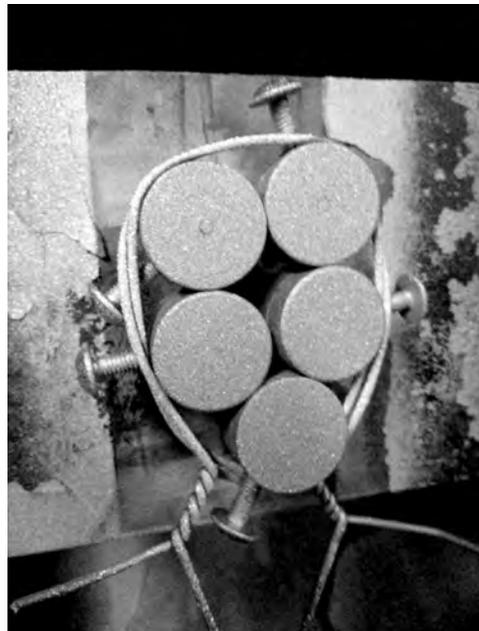
Рисунок 2 — Принципиальная схема процесса гиперзвуковой металлизации  
Figure 2 — Schematic diagram of the process of hypersonic metallization

данной работы является экспериментальное сравнение механических характеристик и исследование микроструктуры металлических покрытий из стальной проволоки, нанесенных с применением ЭДМ и ГМ с помощью оборудования АДМ-10.

**Описание эксперимента.** Для проведения исследований покрытия наносили на две пластины (образец № 1п, образец № 2п) из низкоуглеродистой стали марки Ст3, размерами 100 × 50 × 4 мм и образцы-штифты (образец № 1ш-10ш) из низкоуглеродистой стали марки Ст3 (рисунок 3).



a



b

Рисунок 3 — Образцы-штифты (связаны проволокой для удобства обработки и напыления): a — до дробеструйной обработки; b — после дробеструйной обработки  
Figure 3 — Samples of pins (wired for easy handling and spraying): a — before shot peening; b — after shot peening

Таблица 1 — Химический состав проволоки Св-08Г2С (ГОСТ 2246-70)  
Table 1 — Chemical composition of the wire Sv-08G2S (GOST 2246-70)

C, %	Si, %	Mn, %	Cr, %	Ni, %	S, %	P, %
0,05–0,11	0,70–0,95	1,8–2,1	<0,2	<0,25	<0,025	<0,030

Для активации рабочая поверхность пластин и образцов-штифтов перед нанесением покрытий подвергалась абразивно-струйной обработке смесью, состоящей из электрокорунда 14А F12 (~50 %) и колотой дроби ДЧК — 1,4 (~50 %), при рабочем давлении сжатого воздуха 0,6 МПа. Шероховатость поверхности после дробеструйной обработки  $Rz = 60–64$  мкм.

В качестве материала для нанесения покрытий применялась сварочная проволока без медного покрытия марки Св-08Г2С по ГОСТ 2246-70 диаметром 1,6 мм (таблица 1)

Нанесение покрытий на пластины выполнялось на следующих режимах.

*Образец № 1п(ЭДМ):* сила сварочного тока — 200 А; напряжение дуги — 32 В; скорость подачи проволоки — 3,5 м/мин; давление сжатого воздуха — 0,5 МПа; дистанция напыления — 100–150 мм; толщина нанесенного слоя — 0,7–0,8 мм.

*Образец № 2п(ГМ):* сила сварочного тока — 200 А; напряжение дуги — 32 В; скорость подачи проволоки — 3,5 м/мин; давление сжатого воздуха — 0,35 МПа; давление пропан-бутановой смеси — 0,33 МПа; дистанция напыления — 100–150 мм; толщина нанесенного слоя — 0,6–0,7 мм. Оба образца не нагревались выше 140 °С.

Нанесение покрытий на штифтовые образцы выполнялось на следующих режимах:

*Образцы-штифты № 1ш-5ш:* сила сварочного тока — 200 А; напряжение дуги — 32 В; скорость подачи проволоки — 3,5 м/мин; давление сжатого воздуха — 0,5 МПа; дистанция напыления — 100–150 мм; толщина нанесенного слоя — 0,6–0,9 мм. Режим ЭДМ.

*Образцы-штифты № 6ш-10ш:* сила сварочного тока: первый слой — 250 А, второй слой — 200 А; напряжение дуги — 32 В; скорость подачи проволоки: первый слой — 5 м/мин, второй слой — 3,5 м/мин; давление сжатого воздуха — 0,35 МПа; давление пропан-бутановой смеси — 0,33 МПа; дистанция напыления — 100–150 мм; толщина нанесенного слоя — 0,3–0,9 мм. Режим ГМ (рисунок 4).

Шероховатость покрытий на пластинах составила: электродуговая металлизация —  $Rz 83–88$  мкм; гиперзвуковая металлизация —  $Rz 65–70$  мкм.

Шероховатость покрытий на штифтовых образцах составила: электродуговая металлизация —  $Rz 60–66$  мкм; гиперзвуковая металлизация —  $Rz 46–56$  мкм.

Измерение шероховатости выполнялось с применением профилометра Mar Surf PS1, погрешность измерения 5 %. По результатам анализа ше-



Рисунок 4 — Процесс гиперзвуковой металлизации образцов  
Figure 4 — Process of hypersonic metallization of samples

роховатости покрытий выявлено, что покрытия, выполненные ГМ, обладают меньшей шероховатостью на 15–20 %.

**Металлографические исследования образцов.** Исследования образцов выполнялись с применением микроскопа МИ-1. Для получения и анализа изображений применялось программное обеспечение SIAMS 800.

Для «травления» образцов применялся реактив: 4 % азотной кислоты + 96 % этилового спирта.

Металлографическими исследованиями выявлено, что частицы в покрытии обоих образцов имеют сильно деформированную форму. В покрытии образца № 1п в большем количестве по сравнению с образцом № 2п встречаются недеформированные сферические частицы (рисунок 5). Покрытие образца № 2п выглядит более плотным, что свидетельствует об образовании в процессе напыления более мелких капель расплавленной проволоки за счет более высокой скорости и температуры транспортирующей струи (рисунок 6).

Анализ пористости выполнялся металлографическим методом [8] с применением секущих нанесенных на фотографию микроструктур. По

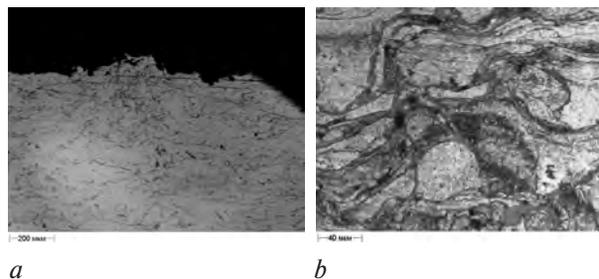


Рисунок 5 — Микроструктура образца № 1п:  
a — без травления,  $\times 100$ ; b — после травления,  $\times 500$   
Figure 5 — Microstructure of the sample no. 1п:  
a — without etching,  $\times 100$ ; b — after etching,  $\times 500$

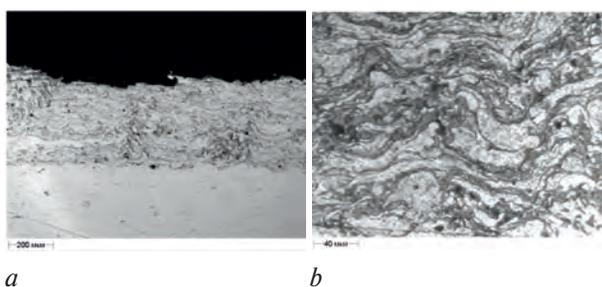


Рисунок 6 — Микроструктура образца № 2п:  
 а — без травления,  $\times 100$ ; б — после травления,  $\times 500$   
 Figure 6 — Microstructure of the sample no. 2п:  
 а — without etching,  $\times 100$ ; б — after etching,  $\times 500$

результатам исследования в покрытии образца № 1п пористость составляет от 3,3 до 13,7 %, образца № 2п — от 1,63 до 2,0 %.

**Оценка прочности сцепления покрытий с основой.** Испытания прочности сцепления покрытий выполнялось по штифтовому методу [9]. Сущность метода заключается в определении величины разрушающей нагрузки при воздействии на границу покрытие—подложка растягивающей нагрузки  $P$ , приложенной перпендикулярно к торцевой плоскости штифта, на которую нанесено покрытие (рисунок 7). Основой служит шайба 1, в отверстие которой устанавливается штифт 2 таким образом, что его торцевая поверхность расположена заподлицо с наружной плоскостью шайбы. На общую поверхность торца штифта и шайбы после подготовки наносят покрытие 3. Для исключения выпадения при напылении штифт фиксируется винтом 4. Отношение максимального усилия, при котором происходит отрыв покрытия к площади торца штифта, принимают за характеристику прочности сцепления покрытия. Для испытаний применяют конический штифт, поскольку при использовании цилиндрического штифта результат искажается вследствие влияния силы трения между сопрягаемыми поверхностями штифта и шайбы.

Существуют рекомендации, что для проведения исследований следует применять штифт и шайбу диаметрами 2 и 20 мм соответственно [8].

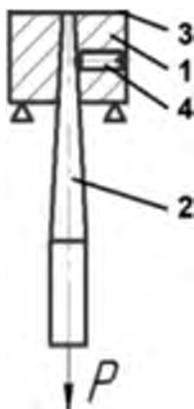


Рисунок 7 — Схема испытаний на прочность сцепления покрытия с основой по штифтовой методике  
 Figure 7 — Scheme of adhesion tests of the coating with base due to the pin method

Поэтому для проведения испытаний были изготовлены образцы именно с такими размерами.

После напыления минимальная толщина покрытий образцов-штифтов составляла 0,4 мм, что является достаточным для оценки прочности сцепления покрытия с основой, используя штифтовой метод [10]. Измерение толщины покрытия выполнялось штангенциркулем ШЦ-125 с погрешностью измерений 0,01 мм.

Испытаниям подвергали по пять образцов-штифтов с покрытиями для каждого из способов напыления.

Испытания выполнялись на разрывной машине GALDABINI QUASAR 50 (максимальная разрывная нагрузка 50 кН) с применением программного обеспечения GRAPHWORK 6.

Для обеспечения соосности при приложении нагрузки были изготовлены и применены центрирующие шарнирные приспособления и специальная оправка, в которую устанавливалась шайба (рисунок 8). Применение центрирующих приспособлений позволило исключить возможные напряжения сдвига и изгиба. Результаты измерений представлены в таблицах 2 и 3.

Более наглядно результаты испытаний представлены на рисунке 9.

Измерение толщины покрытия выполнялось штангенциркулем ШЦ-125 с погрешностью измерений 0,01 мм. На основании полученных результатов минимальная толщина покрытия образцов-штифтов составляет 0,4 мм, что является достаточным для оценки прочности сцепления покрытия с основой, используя штифтовой метод [6]. Анализ влияния толщины покрытия на его прочность сцепления с основой в образцах № 1ш-5ш не позволил выявить определенных за-

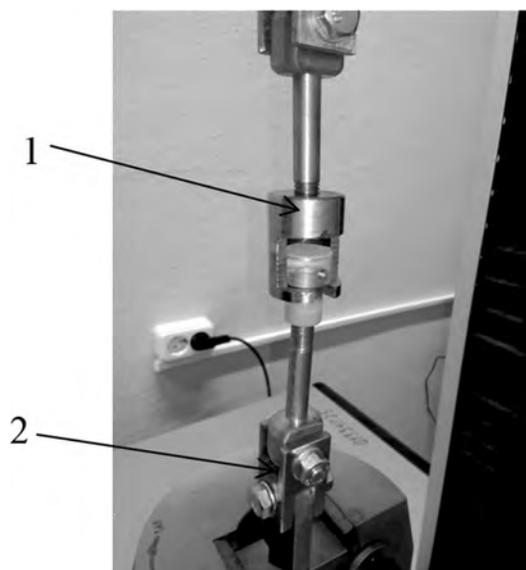


Рисунок 8 — Приспособление для испытаний на прочность сцепления покрытия с основой: 1 — центрирующее приспособление; 2 — специальная оправка для шайбы  
 Figure 8 — Device for adhesion tests of coating with base: 1 — alignment mechanism; 2 — special mandrel for washer

Таблица 2 — Результаты испытаний прочности сцепления покрытий, нанесенных с применением ЭДМ  
Table 2 — Adhesion test results of the coatings applied using electric arc spraying

№ образца	Толщина слоя, мкм	Значение разрывного усилия, кН	Прочность сцепления покрытия, МПа
1ш	0,6–0,7	0,161	51,35
2ш	0,7–0,8	0,032	10,20
3ш	0,7–0,8	0,097	30,84
4ш	0,7–0,9	0,181	57,66
5ш	0,6–0,7	0,108	34,23
Среднее значение	0,6–0,8	0,116	36,86

Таблица 3 — Результаты испытаний прочности сцепления покрытий, нанесенных с применением ГМ  
Table 3 — Adhesion test results of the coatings applied using hypersonic metallization

№ образца	Толщина слоя, мкм	Значение разрывного усилия, кН	Прочность сцепления покрытия, МПа
6ш	0,6–0,7	0,259	82,45
7ш	0,4–0,5	0,189	60,30
8ш	0,4–0,5	0,170	54,25
9ш	0,5–0,6	0,202	64,19
10ш	0,4–0,5	0,111	35,34
Среднее значение	0,5–0,6	0,186	59,31

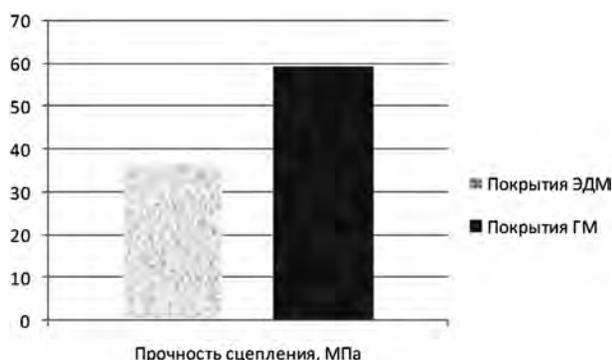


Рисунок 9 — Значения прочности сцепления покрытий  
Figure 9 — Values of adhesion strength of coatings

кономерностей, в образцах № 6ш–10ш выявлено увеличение прочности сцепления с основой при увеличении толщины покрытия. По результатам испытания было выявлено, что предел прочности сцепления покрытий с основой образцов № 1ш–5ш в среднем составляет 36,86 МПа, образцов № 6ш–10ш — 59,31 МПа. Предел прочности сцепления с основой покрытий образцов № 6ш–10ш превышает значения образцов № 1ш–5ш на 61 %.

**Исследование микротвердости покрытий.** Исследование микротвердости покрытий выполня-

Таблица 4 — Результаты измерений микротвердости покрытий  
Table 4 — Results of measurements of microhardness of coatings

№ образца	№ измерения	Место измерения	HV
№ 1п	1	Основа	161
	2	Покрытие	221
	3	Покрытие	264
	4	Покрытие	232
	5	Покрытие	238
	6	Покрытие	257
	Среднее значение	Покрытие	242
№ 2п	1	Основа	168
	2	Покрытие	318
	3	Покрытие	321
	4	Покрытие	303
	5	Покрытие	330
	6	Покрытие	321
	Среднее значение	Покрытие	319



Рисунок 10 — Микротвердость покрытий  
Figure 10 — Microhardness of coatings

лось методом вдавливания алмазного наконечника в соответствии с ГОСТ 9450-76 с применением микротвердомера ПМТ-3М и программного обеспечения LOMO-Microsystems MCview. Результаты измерений приведены в таблице 4.

По результатам исследования микротвердости было выявлено, что твердость покрытия образца № 1п в среднем составляет 242 HV, образца № 2п — 319 HV. Твердость образца № 2п превышает твердость образца № 1п на 32 % (рисунок 10).

**Анализ фазового и химического состава.** Анализ фазового состава выполнялся методом рентгеноструктурного анализа с применением рентгеновского дифрактометра ДРОН-3 в кобальтовом монохроматизированном излучении, анализ рентгенограмм для нахождения присутствующих фаз выполнялся с помощью электронной базы PDF-2. Погрешность измерений  $\pm 1,5$  %. По результатам анализа в образце № 1п было выявлено наличие оксидов железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) в количестве 3,8 %, в образце № 2п выявлено наличие оксидов железа ( $\text{FeO}$ ,  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) в количестве 2,5 %.

Таблица 5 — Результаты измерений химического состава покрытий  
Table 5 — Results of measurements of chemical composition of coatings

№ образца	№ измерения	Массовая доля элементов, %			
		Fe	Mn	Si	Cr
№ 1п	1	96,621 ± 0,685	1,306 ± 0,082	0,618 ± 0,140	0,043 ± 0,020
	2	97,557 ± 0,838	1,292 ± 0,082	0,690 ± 0,118	0,062 ± 0,021
№ 2п	1	97,492 ± 0,870	1,325 ± 0,082	0,803 ± 0,119	0,040 ± 0,020
	2	97,628 ± 0,524	1,277 ± 0,082	0,738 ± 0,119	0,038 ± 0,020
Элементы в проволоке Св-08Г2С	—	основа	1,8–2,1	0,70–0,95	<0,2

Исследование химического состава выполнялось с применением рентгено-флуоресцентного спектрометра NITONXL2. Погрешность измерений: в диапазоне массовых долей от 0,10 % до 0,50 % — ±30 %; в диапазоне массовых долей от 0,50 % до 1,00 % — ±20 %; в диапазоне массовых долей свыше 1,00 % — ±15 %. Результаты измерений приведены в таблице 5.

По результатам измерения химического состава было выявлено, что количество легирующих элементов уменьшилось практически одинаково для обоих образцов, просматривается лишь немного большее содержание кремния в образце № 2п, чем в образце № 1п.

**Заключение.** По результатам проведенных испытаний можно установить, что покрытия, нанесенные методом ГМ, обладают меньшей шероховатостью, являются более плотными, менее пористыми, содержащими меньшее количество оксидов, чем покрытия, нанесенные методом ЭДМ. Пористость ГМ покрытий не превышает 2 %, пористость ЭДМ покрытий составляет от 3,3 до 13,7 %. Предел прочности сцепления покрытий с основой, выполненных с применением ГМ, на 61 % превышает показатели покрытий, выполненных ЭДМ. Предел прочности сцепления покрытий с основой, выполненных с применением ГМ, составляет в среднем 59,31 МПа, в то время как для ЭДМ покрытий данный показатель составляет в среднем 36,86 МПа.

Микротвердость покрытия, выполненного с применением ГМ, превышает микротвердость покрытия, выполненного с применением ЭДМ, на 32 %. При этом для ГМ данный показатель составляет в среднем 242 НV, а для ЭДМ — 319 НV. В покрытии, выполненном ЭДМ, было выявлено на 1,3 % больше оксидов железа, чем в покрытии, выполненном ГМ. Количество легирующих элементов в покрытии уменьшилось практически одинаково для обоих способов нанесения покрытий с небольшим преимуществом ГМ.

Отличие анализируемых механических свойств и микроструктуры покрытий, нанесенных с при-

менением ГМ и ЭДМ, можно объяснить формированием в процессе ГМ напыления более мелких капель расплавленной проволоки и их большей скорости полета под воздействием высокоскоростного потока продуктов сгорания пропано-воздушной смеси с более высокими динамическими параметрами вместо воздушной струи, применяемой при ЭДМ. Также пониженное содержание кислорода в расплавленном потоке ГМ способствует снижению содержания и пористости в напыляемом покрытии. Исходя из полученных результатов исследований, применение ГМ для восстановления и упрочнения деталей машин с применением проволоки Св-08Г2С является более предпочтительным, чем применение ЭДМ.

#### Список литературы

1. Устройство для высокоскоростного напыления покрытий (варианты): пат. ВУ № 4365, МПК7 В 05 В 7/20 / М.А. Белоцерковский, А.С. Прядко, А.Е. Черепко // заявитель ИНДМАШНАН Беларуси; № а19990698. — Выдан 30.03.2002. — Заявл. 12.07.1999.
2. Способ гиперзвуковой металлизации поверхности детали и устройство для его осуществления: Евразийский пат. № 024778 / М.А. Белоцерковский, А.А. Дюжев, А.С. Прядко, А.Е. Черепко, В.А. Скворцов, А.В. Сосновский // Заявитель ОИМ НАН Беларуси; № 201301243. — Выдан 31.10.2016. — Заявл. 30.09.2013.
3. Воловик, Е.Л. Справочник по восстановлению деталей / Е.Л. Воловик. — М: Колос, 1981. — 351 с.
4. Ремонт автомобилей: учеб. / С.И. Румянцев [и др.]; под ред. С.И. Румянцева. — М.: Транспорт, 1981. — 462 с.
5. Катц, Н.В. Металлизация распылением / Н.В. Катц. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
6. Хасуи, А. Наплавка и напыление / А. Хасуи, О. Моригаки; пер. с япон. В.Н. Попова; под ред. В.С. Степина, Н.Г. Шестеркина. — М., 1985.
7. Выбор технологических параметров процесса нанесения стальных покрытий методом гиперзвуковой металлизации / М.А. Белоцерковский [и др.] // Механика машин, механизмов и материалов. — 2015. — № 3(32). — С. 52–58.
8. Методы исследования материалов. Структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский. — М.: Мир, 2004. — 384 с.
9. Ибатуллин, И.Д. Приборы и методы оценки качества покрытий / И.Д. Ибатуллин, М.Д. Карлова, Д.Р. Загидулина // Изв. Самарского науч. центра РАН. — 2016. — Т. 18, № 4(2). — С. 291–296.
10. Коробов, Ю.С. Анализ свойств газотермических покрытий. Часть 2. Оценка параметров покрытий / Ю.С. Коробов. — Екатеринбург: Изд-во Уральского ун-та, 2016. — 92 с.

PANTELEENKO Fedor I., Corresponding Member of the NAS of Belarus,  
D. Sc. in Eng., Prof.

Head of the Department "Powder metallurgy, Welding and Materials Technology"<sup>1</sup>  
E-mail: panteleyenkofi@tut.by

BELOTSEKOVSKY Marat A., D. Sc. in Eng., Assoc. Prof.

Head of the Laboratory of Gas-Thermal Methods of Machine Components Hardening<sup>2</sup>  
E-mail: mbelotser@gmail.com

KARPETS Maksim N.

Ph. D. Student<sup>1</sup>  
E-mail: mail-maxiolis@mail.ru

SOSNOVSKY Aleksey V., Ph. D. in Eng.

Leading Researcher<sup>2</sup>  
E-mail: sosnovskij@inbox.ru

<sup>1</sup>Belarusian national technical university, Minsk, Republic of Belarus

<sup>2</sup>Joint Institute of Mechanical Engineering of the NAS of Belarus, Minsk, Republic of Belarus

Received 31 July 2019.

## COMPARATIVE ANALYSIS OF PHYSICAL AND MECHANICAL PROPERTIES OF COATINGS APPLIED USING ELECTRIC ARC SPRAYING AND HYPERSONIC METALLIZATION METHODS

*A comparative analysis of the physical and mechanical properties of coatings obtained using electric arc spraying and hypersonic metallization methods is made. Comparisons were carried out when applying the coatings of wire Sv-08G2S. It is shown that the coatings obtained by hypersonic metallization have 2–5 times higher density compared to coatings obtained by electric arc spraying, as well as superior adhesion strength by 1.5–2 times, microhardness by 1.2–1.5 times, oxidation resistance by 1.5–1.7 times. It is established that the use of hypersonic metallization for the recovery and hardening of machine parts with the use of wire Sv-08G2S is more preferable than the use of electric arc spraying.*

**Keywords:** hypersonic metallization, electric arc spraying, metal coatings, physical and mechanical properties

### References

1. Belotserkovsky M.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E. *Ustroystvo dlya vysokoskorostnogo napyleniya pokrytiy (varianty)* [Device for high-speed coating spraying (options)]. Patent RB, no. 4365, 2002.
2. Belotserkovsky M.A., Dyuzhev A.A., Pryadko A.S., Cherepko A.E., Skvortsov V.A., Sosnovsky A.V. *Sposob giperzvukovoy metallizatsii poverkhnosti detali i ustroystvo dlya ego osushchestvleniya* [A method of hypersonic metallization of the surface of the part and a device for its implementation]. Patent EU, no. 024778, 2016.
3. Volovik E.L. *Spravochnik po vosstanovleniyu detaley* [Parts recovery guide]. Moscow, Kolos Publ., 1981. 351 p.
4. Rumyantsev S.I., Borshchov V.F., Bodnev A.G., Boyko N.G., Kolyasinskiy Z.C., Kryukov V.P., Sinelnikov A.F. *Remont avtomobiley* [Automobile repair]. Moscow, Transport Publ., 1981. 462 p.
5. Katts N.V. *Metallizatsiya raspyleniem* [Metal spraying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1966. 200 p.
6. Hasui A., Morigaki O. *Naplavka i napylenie* [Surfacing and spraying]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1985. 240 p.
7. Belotserkovsky M.A., Sosnovsky A.V., Pryadko A.S., Yalovik A.P., Trusov D.I. *Vybor tekhnologicheskikh parametrov protsessa naneseniya stalnykh pokrytiy metodom giperzvukovoy metallizatsii* [Selecting the technological parameters of steel coatings formation by hypersonic metallization]. *Mekhanika mashin, mekhanizmov i materialov* [Mechanics of machines, mechanisms and materials], 2015, no. 3(32), pp. 52–58.
8. Tushinskiy L.I., Plokhov A.V., Tokarev A.O., Sindeev V.I. *Metody issledovaniya materialov. Struktura, svoystva i protsessy naneseniya neorganicheskikh pokrytiy* [Methods of materials study. Structure, properties and processes of deposition of inorganic coatings]. Moscow, Mir Publ., 2004. 384 p.
9. Ibatullin I.D., Karlova M.D., Zagidullina D.R. *Pribory i metody otsenki kachestva pokrytiy* [Devices and methods of the estimation of quality of coverings]. *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra RAN* [News of Samara Scientific Center of the Russian Academy of Sciences], 2016, vol. 18, no. 4(2), pp. 291–296.
10. Korobov Yu.S. *Analiz svoystv gazotermicheskikh pokrytiy. Chast 2. Otsenka parametrov pokrytiy* [Analysis of properties of gas-thermal coatings. Part 2. Assessment of coating parameters]. Ekaterinburg, Uralskiy universitet Publ., 2016. 92 p.