



МРНТИ 55.22.01

Научная статья

<https://doi.org/10.32523/2616-6836-2025-152-3-26-40>

Сравнительный анализ покрытий на основе литой и порошковой проволоки при электродуговой металлизации

Б.К. Рахадилов¹, Н.М. Магазов², А. Апсежанова², М.Б. Баяндина^{3,4*}

¹ТОО «PlasmaScience», 070018, Казахстан, г. Усть-Каменогорск

²Научный центр защитных и функциональных покрытий, Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаева, 070010, Казахстан, г. Усть-Каменогорск

³ТОО «Институт композиционных материалов» 070010, Казахстан, г. Усть-Каменогорск

⁴Восточно-Казахстанский университет имени Сарсена Аманжолова, 070002, Казахстан, г. Усть-Каменогорск

(E-mail: shohmanovamb@gmail.ru)

Аннотация. В статье представлен комплексный сравнительный анализ покрытий, полученных методом электродуговой металлизации с использованием литой и порошковой проволоки на подложках из стали 65Г. Основное внимание уделено влиянию технологических параметров процесса – скорости подачи проволоки, давления рабочего газа, дистанции распыления и температуры предварительного нагрева подложки – на формирование структуры, толщину, пористость и микротвёрдость покрытий. Установлено, что использование порошковой проволоки обеспечивает формирование более плотных и равномерных слоёв с минимальной пористостью (до 4,3 %) и повышенной микротвёрдостью (до 245 HV), в то время как литая проволока демонстрирует менее стабильные результаты. Экспериментально доказано, что повышение давления газа до 7–9 МПа способствует уплотнению покрытия за счёт увеличения кинетической энергии частиц, а чрезмерный предварительный нагрев подложки вызывает рост пористости и снижение толщины. Оптимальные режимы позволили достичь толщины покрытия до 712 мкм при сохранении низкой шероховатости. Полученные результаты подтверждают целесообразность применения порошковой проволоки и оптимизированных параметров электродуговой металлизации для создания износо- и коррозионностойких покрытий, востребованных в машиностроении, энергетике и смежных отраслях промышленности. Работа демонстрирует практическую значимость выбранного подхода и вносит вклад в развитие технологий поверхностного упрочнения.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, порошковая проволока, литая проволока, сталь 65Г, покрытие, пористость, микротвёрдость, шероховатость.

Поступила 10.04.2025. После доработки 17.07.2025. Принята к печати 29.08.2025. Доступна онлайн 30.09.2025.

*автор для корреспонденции

Введение

В условиях современных требований к надёжности и долговечности изделий особое значение приобретает совершенствование методов упрочнения и защиты поверхностей. Одним из таких эффективных и широко применяемых методов является электродуговая металлизация, позволяющая формировать покрытия с высокими эксплуатационными характеристиками.

Электродуговая металлизация позволяет получить покрытия с высокими физико-механическими характеристиками. Однако для достижения оптимального качества покрытия необходимо учитывать множество факторов, влияющих на его характеристики. Ключевыми параметрами являются микроструктура, усталостная прочность, скорость износа, коррозионная стойкость, пористость покрытия, твердость, прочность, эффективность осаждения, адгезионная прочность, шероховатость поверхности и содержание оксидов [1,2]. На итоговые свойства покрытия существенно влияют различные пары по результатом исследования толщины и пористости покрытий в зависимости от изменения параметров метры технологии термического электродугового напыления. Среди них можно выделить напряжение, ток, скорость подачи проволоки, расстояние распыления (SoD), геометрию сопла, среду покрытия (инертная, окружающая или вакуумная камера), давление распыляемого газа, исходный материал, тип распыляемого газа (воздух или азот), предварительный нагрев поверхности подложки или последующую термообработку ламелей покрытия [3–9]. Также важны методы подготовки поверхности, такие, как дробеструйная обработка, пескоструйная обработка и грубая резьба.

Многочисленные исследования подтвердили важность оптимизации параметров термического напыления для достижения требуемых характеристик металлических покрытий. Например, Ариф и др. [2] изучили влияние расстояния напыления (SoD) на характеристики латунных покрытий, наносящихся на низкоуглеродистую сталь, установив, что увеличение напряжения и SoD приводит к росту шероховатости поверхности, при этом эффективность осаждения (DE) значительно снижается. В работе [10] исследованы характеристики стальных покрытий при изменении давления газа-носителя, SoD и мощности факела, выявив, что плотность покрытия увеличивается при повышении давления газа-носителя и сокращении SoD. Джонсон и др. [11] продемонстрировали, что параметры напыления влияют на пористость и твердость цинковых покрытий. Кумар и др. [12] оптимизировали параметры для двухпроводного дугового напыления алюминиевого покрытия. Работа Кумара и Пандей [13] показала, как параметры плазменного напыления влияют на толщину покрытия и шероховатость поверхности. Тем не менее, неправильный выбор режимов ЭДМ может привести к высокой пористости, высокому содержанию оксидов, низкой эффективности напыления и высокой шероховатости поверхности [7, 14]. Это подчеркивает необходимость оптимизации параметров ЭДМ для получения эффективных покрытий для конкретных применений [15].

Актуальность исследования заключается в том, что современные технологические процессы требуют повышения долговечности и эксплуатационной надёжности деталей машин и конструкций, работающих в условиях значительных нагрузок и агрессивных сред. Электродуговая металлизация является одним из перспективных методов упрочнения и восстановления изношенных поверхностей, позволяя значительно продлить срок службы изделий. В связи с этим актуальной задачей является выбор оптимального материала проволоки, обеспечивающего наилучшие свойства покрытий с точки зрения адгезии, износостойкости.

Целью настоящего исследования являлось определение оптимального режима электродуговой металлизации и технологических параметров напыления, обеспечивающих формирование покрытий с минимальной пористостью. Кроме того, на основе выбранного оптимального режима проведено сравнительное исследование с применением литой и порошковой проволоки с целью оценки их влияния на микротвёрдость полученных покрытий.

Для достижение поставленной цели выполнялись следующие задачи: – изучить влияние основных технологических параметров электродуговой металлизации (скорости подачи проволоки, давления газа, дистанции напыления, температуры предварительного нагрева подложки) на толщину и пористость формируемых покрытий; - определить оптимальный режим напыления, обеспечивающий получение покрытий с минимальной пористостью и равномерной структурой; – провести сравнительный анализ микротвёрдости покрытий, сформированных с применением литой и порошковой проволоки, при одинаковых оптимальных условиях напыления.

Материалы и методы исследований

Материалы и методы получения металлизации

В напылении применялась установка электродуговой металлизации, включающая распылительный пистолет, источник питания и поршневой компрессор. Для напыления использовался сверхзвуковой дуговой металлизатор SX-600 (Гуанчжоу, Китай), включающий источник питания, дуговой распылитель, систему управления и подачу сжатого воздуха (рис. 1). Принцип работы основан на расплавлении проволочных электродов электрической дугой и распылении расплава струёй воздуха. Расплавленные частицы осаждаются на поверхность, образуя сплошное покрытие, толщина которого регулируется числом проходов и скоростью движения распылителя. Проволока подаётся через направляющие, дуга возникает между их концами, а сжатый воздух (более 100 м/с) переносит расплав на поверхность, формируя покрытие с высокой адгезией и низкой пористостью

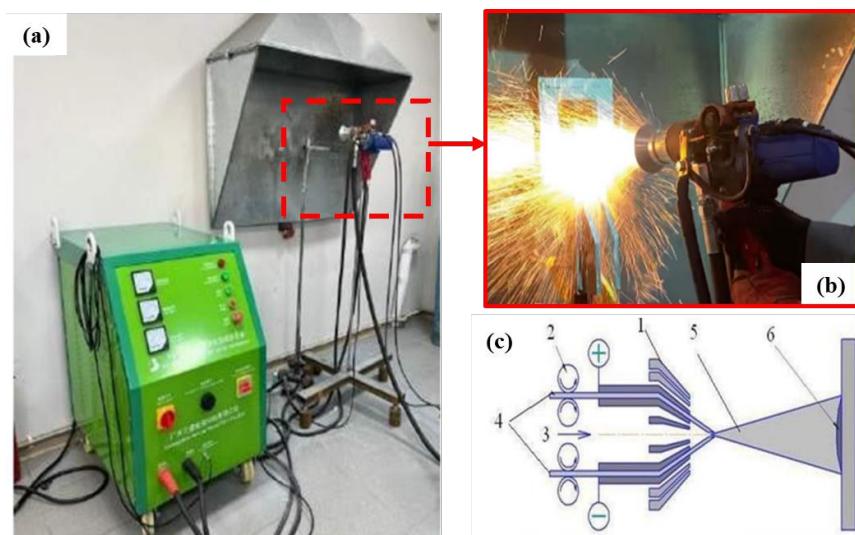


Рисунок 1. Общий вид комплекса для высокоскоростной электродуговой металлизации SX-600 (а); внешний вид распылительного пистолета (б); технологическая схема (с): 1 – корпус металлизатора, 2 – механизм подачи проволоки, 3 – канал для подачи сжатого воздуха, 4 – электродные проволоки, 5 – зона электрической дуги с распыленными частицами проволоки, 6 – сформированное напыленное покрытие [8]

В качестве подложки была использована сталь 65Г. Подложки были вырезаны из листового материала. Каждый образец имеет высоту 4 мм, длину 25 мм и ширину 10 мм. Для получения однородной и ровной поверхности образцы шлифовались на наждачной бумаге с зернистостью от 100 до 360.

С целью определения оптимальных условий напыления были проведены эксперименты по режимам, приведённым в таблице 1, при изменении давления газа (P), скорости подачи проволоки (V) и расстояния от сопла распылительного пистолета до поверхности образца (SoD). Напряжение составляло 42 ± 3 В, распыляющим газом служил воздух. Образцы напылялись равномерно в течение 10 секунд при комнатной температуре. Обозначения образцов соответствуют варьируемым параметрам: V – скорость подачи, D – дистанция, P – давление, T – предварительный нагрев.

Таблица 1. Режимы напыления при изменении режимов электродуговой металлизации

Образец	P , Па	V , см/с	D , мм	Образец	P , Па	V , см/с	D , мм
V1	9	2	200	P1	6	12	200
V2	9	4	200	P2	7	12	200
V3	9	8	200	P3	8	12	200
V4	9	12	200	P4	9	12	200
D1	9	12	100	T1	9	12	200
D2	9	12	150	T2	9	12	200
D3	9	12	200	T3	9	12	200
D4	9	12	250	T4	9	12	200

Пористость определяли с помощью оптического микроскопа Альтами MET 5C с программным обеспечением для количественного анализа изображения. Подготовленные образцы не имели следов шлифования, полирования или выкрошивания структурных составляющих. Программное обеспечение «Altami», которым оснащен микроскоп, программа позволяет производить различные измерения выделенных графических объектов, в том числе измерять их площади [95]. Для всех преобразований использовался графический редактор Маркер. На СЭМ-изображении появляются поры, в покрытии выделяются красным цветом, поэтому, используя инструмент «Волшебная палочка» и задав интервал цвета, можно выделить поры. После этого Результат измерения отображался в табличном виде.

Пористость TiN покрытия в процентах вычислялась по формуле

$$\Pi = \frac{\text{BA}}{\text{TA}} \times 100\% \quad (1)$$

где Π – содержание пор, %,

ТА (TotalArea) – общая площадь покрытия,

ВА (BlackArea) – общая площадь черных областей.

Подставляя эти значения в формулу (1), определяли объемную пористость покрытия.

Толщина покрытий определялась с использованием СЭМ. Для анализа образцы покрытий были подготовлены путём поперечного скальвания, обеспечивающего чистую зону разлома. Перед исследованием срезы закреплялись на держателе под углом, обеспечивающим чёткий обзор поперечного сечения. СЭМ-изображения поперечного сечения получали при ускоряющем напряжении 15-20 кВ в режиме высоковакуумного сканирования. Толщина покрытия измерялась с помощью встроенного программного обеспечения микроскопа по калиброванной шкале, при этом учитывались средние значения, полученные по нескольким сечениям (не менее 5 точек измерения на каждом образце). Полученные значения усреднялись для повышения точности оценки. Измерения проводились на приборе Tescan Vega (Чехия).

По полученным результатом варьирования режимов были выбраны следующие условия (таблица 2) сверхзвуковой дуговой металлизации для проведения сравнительного анализа покрытий, сформированных с использованием литой и порошковой проволоки при электродуговой металлизации. В качестве материала для напыления использовались два типа проволоки – порошковая и литая, изготовленные из сталей марок Ст70 и Ст45. Все проволоки имели одинаковый диаметр 1,6 мм. Такой размер выбран ввиду его универсальности и совместимости с применяемыми распылительными системами электродуговой металлизации. Проволоки диаметром 1,6 мм обеспечивают оптимальное соотношение между стабильной подачей и эффективностью распыления, что способствует формированию равномерного покрытия [26]. Кроме того, использование стандартного диаметра упрощает настройку оборудования, поддерживает постоянные условия экспериментов и позволяет минимизировать влияние параметров подачи на характеристики наносимого слоя. Основные технологические характеристики используемых проволок приведены в таблице 2.

Таблица 2 – Режимы напыления при сверхзвуковой дуговой металлизации

Параметр	Значение
Напряжение U, В	40
Ток I, А	250
Скорость подачи проволоки, см/с	12
Давление рабочего газа, МПа	0,7
Температура нагрева подложки, °С	250
Дистанция от распылителя до поверхности подложки, мм	150

Таблица 3 – Параметры напыляемых проволок

№	Маркировка образца	Название проволоки	Тип проволоки	Размер проволоки, мм
1	Л1	Ст70	литьевая	1,6
2	П1		порошковая	1,6
3	Л2	Ст45	литьевая	1,6
4	П2			1,6

Методы исследований

Микротвердость образцов определяли на приборе Metolab 502 ($\pm 3\%$) по методу Виккерса [16]. Параметры измерения: нагрузка 0,025 г, время выдержки 10 с. Число Виккерса (HV) рассчитывается по формуле:

$$HV = 1.854 \frac{P}{d^2} \quad (2)$$

где P – приложенная нагрузка, d – средняя диагональ вмятины.

Результаты и обсуждения

Толщина и пористость покрытий являются одними из основных свойств, характеризующих покрытия [17]. Полученные результаты демонстрируют зависимость этих параметров от условий напыления. Скорость подачи проволоки оказывает существенное влияние на формирование покрытий: с её увеличением возрастает их толщина (рис. 2). При подаче проволоки со скоростью 8 и 12 см/с пористость снижалась до 8,38% и 4,33% соответственно. Это связано с тем, что при более высокой скорости увеличивается объём напыляемого материала, благодаря чему покрытие формируется более равномерным и плотным. Дополнительно при интенсивной подаче возрастает количество частиц, осаждающихся на поверхность, что усиливает их ударное воздействие на ранее нанесённые слои. В результате покрытие уплотняется, а количество пор и пустот уменьшается.

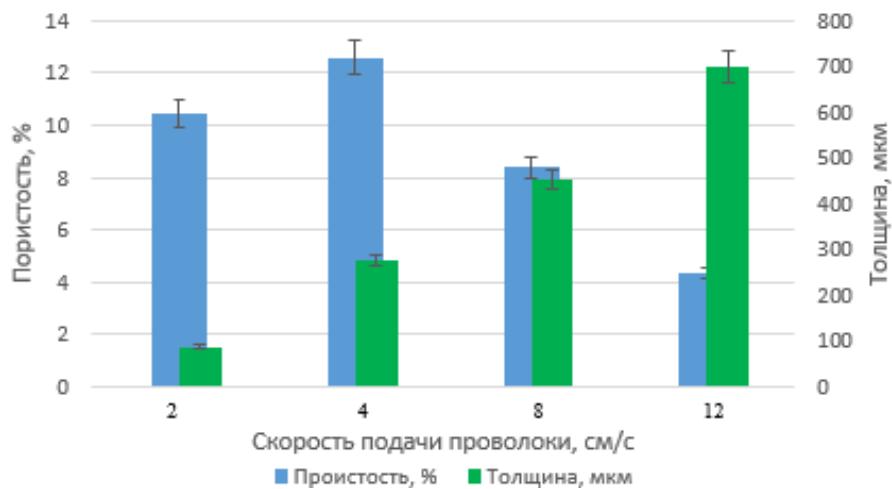


Рисунок 4. Влияние скорости подачи проволоки на толщину и пористость покрытия

Как показано на рисунке 3, максимальная толщина образцов (712 и 699 мкм) наблюдается при давлениях рабочего газа 7 и 9 МПа соответственно. Минимальные значения пористости также были зафиксированы для этих режимов. Эти давления можно считать наиболее оптимальными для формирования толстых и плотных покрытий. Повышение давления газа в установке электродуговой металлизации приводит к увеличению скорости транспортировки расплавленных частиц к поверхности подложки. При давлении 7-9 МПа частицы приобретают более высокую кинетическую энергию, что способствует их эффективному уплотнению и плотному прилеганию к ранее нанесенным слоям. В результате происходит более качественное формирование связей между распыленными частицами, снижается количество макро- и микропустот, что отражается в уменьшении пористости.

Кроме того, высокая кинетическая энергия частиц обеспечивает частичное размягчение поверхностного слоя покрытия и способствует лучшему смачиванию подложки. Это также повышает адгезию и способствует росту толщины за счёт более эффективного накопления материала. Наряду с этим следует отметить, что избыточное увеличение давления газа (свыше 9 МПа) может приводить к появлению турбулентных потоков и интенсивному остыванию расплавленных частиц, что теоретически может снижать качество напыления и вызывать дефекты.

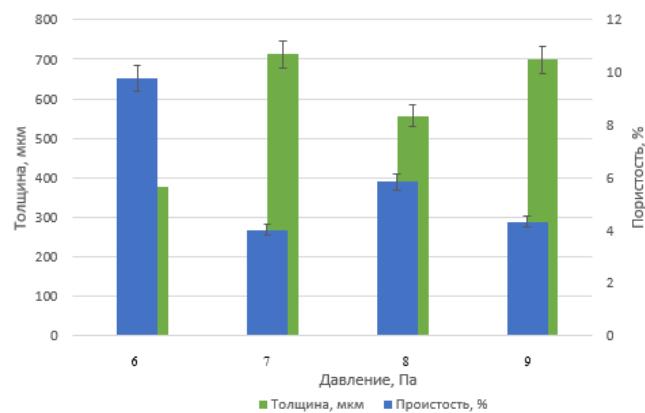


Рисунок 5. Влияние давления на толщину и пористость покрытия

Исследование влияния температуры предварительного нагрева подложки (рис. 4) показывает, что максимальная толщина покрытия в 423 мкм была достигнута при комнатной температуре, при этом пористость покрытия составила всего 4,33%. Однако с повышением температуры до 150 °C толщина покрытия снизилась до 285,2 мкм, при этом наблюдалось увеличение пористости до 19,48%. При дальнейшем увеличении температуры до 200 °C толщина покрытия уменьшилась еще больше, составив 120,6 мкм, а пористость достигла своего максимального значения – 27,13%. При нагреве подложки до 250 °C толщина покрытия увеличилась до 202,1 мкм, в то время как пористость снизилась до 8,31%.

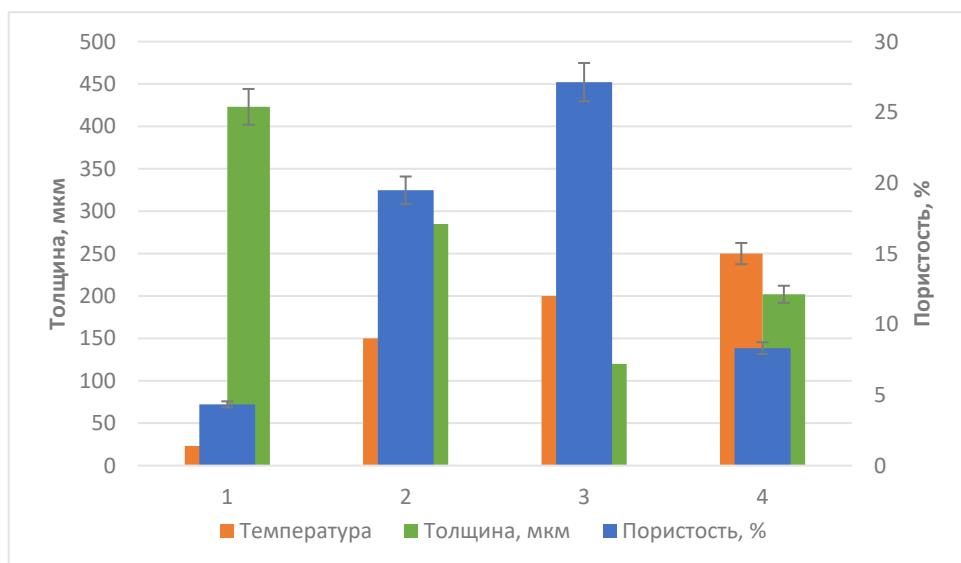


Рисунок 6. Влияние предварительного нагрева подложки на толщину и пористость покрытия

На рисунке 3 видно, что при нагреве подложки до 150 °C толщина покрытия снижается с 423 до 285,2 мкм, а пористость увеличивается до 19,48%. Это связано с изменением условий затвердевания распылённых частиц. При этой температуре снижается тепловой градиент между частицей и подложкой, что замедляет кристаллизацию и ослабляет сцепление капель с поверхностью. В результате возможны стекание или отскок частиц, образование микропустот и, как следствие, рост пористости и уменьшение толщины.

При дальнейшем нагреве до 250 °C наблюдается частичное восстановление толщины (до 202,1 мкм) и снижение пористости до 8,31%. Это, вероятно, связано с повышенной пластичностью подложки и лучшим «вплавлением» частиц, а также с термической стабилизацией нанесённого слоя. На качество покрытия наибольшее влияние оказывают давление газа и температура подложки, поскольку они определяют кинетику осаждения и тепломеханические условия формирования слоя.

Более близкие дистанции напыления обеспечивают большую толщину покрытия (рис. 5). При дистанции 150 мм получено самое толстое покрытие. Однако с увеличением расстояния толщина уменьшается. Таким образом, дистанция 150 мм является оптимальной для получения толстого слоя, что снижает эксплуатационные затраты. При этом пористость при 100-150 мм остается повышенной. Напыление с расстояния

200 мм даёт более плотные покрытия, а дальнейшее увеличение до 250 мм приводит к снижению толщины вдвое и резкому росту пористости. Поэтому дальнейшее увеличение дистанции оказалось нецелесообразным.

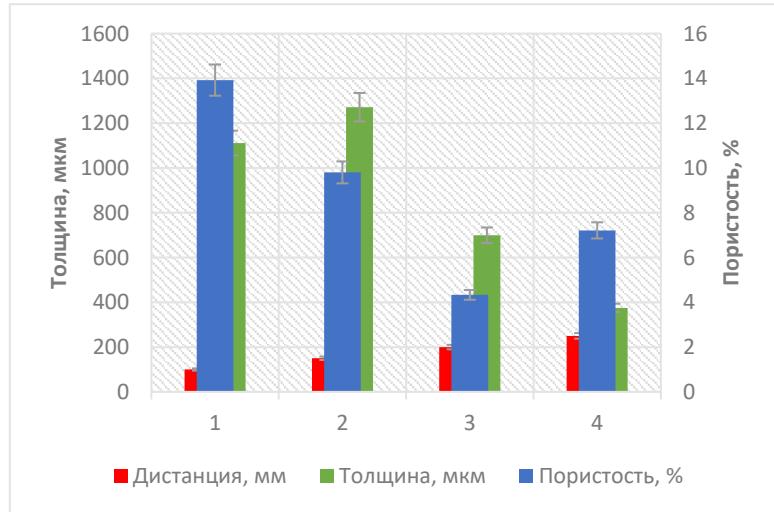


Рисунок 7. Зависимость толщины покрытий и пористости от дистанции

Микротвёрдость покрытия как один из ключевых параметров была измерена после нанесения. На рисунке 6 приведены значения твёрдости в зависимости от состава и типа используемой проволоки.

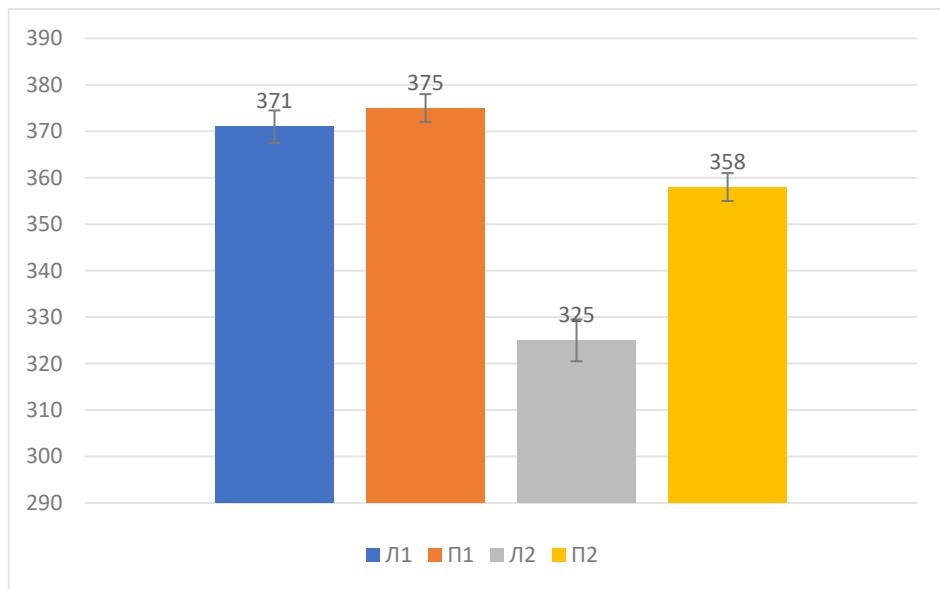


Рисунок 8. Микротвердость покрытий при изменении химического состава и типа стальных проволок

Покрытия из порошковой проволоки в обоих случаях (Ст70 и Ст45) демонстрируют более высокую микротвердость, вероятно, за счёт более равномерной структуры,

дисперсных включений или особенностей фазового состава. Микротвердость покрытий на основе стали Ст70 выше, чем у Ст45, что соответствует исходным характеристикам сталей.

Для оценки значимости полученных результатов проведено сравнение с данными других авторов. В работе Johnson и соавторов [11] при электродуговом нанесении цинковых покрытий достигнута толщина 650 мкм при пористости около 6–7%, тогда как в настоящем исследовании при использовании порошковой проволоки достигнута толщина до 712 мкм и снижена пористость до 4,3%. Аналогично, в работе Qadir и др. [15] снижение шероховатости до уровня 17–18 мкм наблюдалось при давлении газа 6–8 МПа, в то время как в данном исследовании при тех же параметрах удалось достичь шероховатости до 15,95 мкм, что указывает на формирование более однородной структуры. Результаты исследования Hui и др. [13] также подтверждают зависимость пористости от предварительного нагрева подложки. При температуре 200 °C авторы отмечают рост пористости до 20%. В настоящей работе эта тенденция также выявлена, причём при температуре 200 °C пористость достигла 27,13%, но при дальнейшем нагреве до 250 °C наблюдалось её резкое снижение до 8,31%. Согласно Liao и др. [17], микротвёрдость сталей при напылении может достигать 150–220 HV. В данной работе покрытия из порошковой проволоки демонстрируют значения 238–245 HV, что свидетельствует о высокой плотности структуры и повышенной прочности.

Таким образом, сравнительный анализ подтверждает конкурентоспособность полученных покрытий и обосновывает научную новизну представленного подхода.

Заключение

В ходе исследования установлено, что тип применяемой проволоки оказывает существенное влияние на физико-механические и структурные характеристики покрытий, полученных методом электродуговой металлизации.

Покрытия, сформированные с использованием порошковых проволок, обладают меньшей пористостью, более однородной структурой и высокой микротвёрдостью, что делает их более предпочтительными для получения защитных и упрочняющих покрытий.

Оптимизация технологических параметров напыления (давления газа, расстояния до подложки и предварительного нагрева) позволяет значительно улучшить характеристики покрытий.

Установлено, что чрезмерный предварительный нагрев подложки приводит к снижению толщины и увеличению пористости покрытий, а увеличение дистанции напыления свыше 200 мм негативно влияет на их плотность.

Полученные результаты могут быть использованы при разработке и совершенствовании технологий нанесения защитных покрытий в машиностроении, энергетике, авиастроении и других отраслях промышленности, где требуется высокая износостойкость и коррозионная стойкость рабочих поверхностей.

Благодарность, конфликт интересов

Данное исследование финансируется Комитетом по науке Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан (грант № BR21882370).

Вклад авторов

Рахадилов Б.К. – руководство, концептуализация;
Магазов Н.М. – администрирование проекта, получение финансирования, методология;
Апсеканова А. – исследование;
Баяндина М.Б. – формальный анализ, написание, рецензирование и редактирование.
Все авторы прочитали и согласились с опубликованной версией рукописи.

Список литературы

1. Tabieva E.E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2, Key Engineering Materials 839, c. 57-62(2020), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.839.57>
2. Popova N.A., Zhurerova L.G., Nikonenko E.L., Skakov M.K. Effect of plasma electrolytic nitrocarburizing on phase composition of 0.3 C-1Mn-1Si-Fe steel, Inorganic Materials: Applied Research 8, c. 130-135(2017), <https://doi.org/10.1134/S2075113317010300>
3. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov B.K., Tyurin Y.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂-NiCr coatings. Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 5, c. 45-51(2021) <https://DOI:10.32523/ejpm.2021050106>
4. Ramezani M., Mohd Ripin Z., Pasang T., Jiang C.P. Surface engineering of metals: Techniques, characterizations and applications. Metals 13, c. 1299(2023) <https://doi.org/10.3390/met13071299>
5. Kengesbekov A., Rakhadilov B., Sagdoldina Z., Buitkenov D., Dosymov Y., Kylyshkanov M. Improving the efficiency of air plasma spraying of titanium nitride powder. Coatings 12, c. 1644(2022) <https://doi.org/10.3390/coatings12111644>
6. Bauyrzhan R., Alexander P., Zhuldyz S., Dastan B., Vyacheslav B., Mukhamedova A. Effect of bilayer thickness and bias potential on the structure and properties of (TiZr/Nb)N multilayer coatings as a result of Arc-PVD deposition. Materials 15, c. 7696(2022) <https://doi.org/10.3390/ma15217696>
7. Rakhadilov B., Zhurerova L., Sagdoldina Z., Kenesbekov A., Bayatanova L. Morphological changes in the dislocation structure of structural steel 20GL after electrolytic-plasma hardening of the surface. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques 15, c. 408-413(2021)
8. Rakhadilov B.K., Baizhan D.R., Sagdoldina Z.B., Buitkenov D.B., Maulet M. Phase composition and structure of composite Ti/HA coatings synthesized by detonation spraying. AIP Conference Proceedings 2297, c. 010001(2020) <https://doi.org/10.1063/5.0029754>
9. Rakhadilov B.K., Kenesbekov A.B., Kowalevski P., Ocheredko Y.A., Sagdoldina Z.B. Development of air-plasma technology for hardening cutting tools by applying wear-resistant coatings. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan 3, c. 54-62(2020) <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.54>
10. Yu H.L., Zhang W., Wang H.M., Ji X.C., Song Z.Y., Li X.Y., Xu B.S. In-situ synthesis of TiC/Ti composite coating by high-frequency induction cladding. Journal of Alloys and Compounds 701, c. 244-255(2017) <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.084>
11. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. Welding International 30, c. 808-812(2016)

12. Sun R., Shi Y., Pei Z., Li Q., Wang R. Heat transfer and temperature distribution during high-frequency induction cladding of 45 steel plate, *Applied Thermal Engineering* 139, c. 1-10(2018)
13. Hui R., Wang Z., Kesler O., Rose L., Jankovic J., Yick S., Ghosh D. Thermal plasma spraying for SOFCs: Applications, potential advantages, and challenges, *Journal of Power Sources* 170, c. 308-323(2007) <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.075>
14. Chahal H.K., Matthews S., Jones M.I. Fabrication of calcium phosphate coatings by the inflight reaction of precursor feedstocks using plasma spraying, *Journal of Thermal Spray Technology* 32, c. 1465-1481(2023)
15. Qadir D., Sharif R., Nasir R., Awad A., Mannan H.A. A review on coatings through thermal spraying, *Chemical Papers* 78, p.71-91(2024)
16. Lopez J. Microhardness testing of plastics: Literature review, *Polymer Testing* 12, c. 437-458(1993) [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(93\)90016-I](https://doi.org/10.1016/0142-9418(93)90016-I)
17. Liao X.J., Zhang L., Sun Y.Q., Luo X.T., Li C.X., Yang G.J., Li C.J. Effect of inter-splat bonding quality on the dependence of wear behavior of plasma-sprayed stainless steel coating on applied load, *Journal of Thermal Spray Technology* 33, c. 1-11(2024)
18. Abdivakhidov K., Sharipov K. Corrosion-resistant protective coatings for metals: A review of metallic and non-metallic coatings, *AIP Conference Proceedings* 3045, c. 060011(2024) <https://doi.org/10.1063/5.0197373>

Б.К. Рахадилов¹, Н.М. Магазов², А. Эпсежанова², М.Б. Баяндина^{3,4*}

¹"PlasmaScience" ЖШС, Қазақстан, Өскемен қ.

²Қорғай және функционалдық жабындар ғылыми орталығы,

Дәүлет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, Қазақстан, Өскемен қ.

³"Композициялық материалдар институты" ЖШС Қазақстан, Өскемен қ.

⁴Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Қазақстан, Өскемен қ.

(E-mail: shohmanovamb@gmail.ru)

Электр доғасын металдандыру кезінде құйма және ұнтақ сүйреу негізінде жабындарды салыстырмалы талдау

Анната. Мақалада 65Г болаттан жасалған үлгілерде құйма және ұнтақ сымдарын қолданып электр доғалық металдандыру әдісімен алынған жабындарға кешенді салыстырмалы талдау ұсынылған. Негізгі назар технологиялық параметрлердің – сым беру жылдамдығының, жұмысшы газ қысымының, бүркү қашықтығы мен субстратты алдын ала қыздыру температурасының – жабындардың құрылымына, қалыңдығына, кеуектілігіне және микроқаттылық әсеріне аударылған. Ұнтақ сымын пайдалану минималды кеуектілікпен (4,3 %-ға дейін) және жоғары микроқаттылықпен (245 HV-ге дейін) тығыз әрі біркелкі қабаттарды түзуге мүмкіндік беретіні анықтады, ал құйма сым тұрақсыздау нәтижелер көрсетті. Эксперименттік жолмен газ қысымын 7-9 МПа-ға дейін арттыру бөлшектердің кинетикалық энергиясын жоғарылатып, жабынды нығайтатыны, ал субстратты шамадан тыс алдын ала қыздыру кеуектіліктің өсуіне және қалыңдықтың төмендеуіне әкелетіні дәлелденді. Оңтайлы режимдер жабын қалыңдығын 712 мкм-

ге дейін жеткізіп, төмен кедір-бұдырлықты сақтауға мүмкіндік берді. Алынған нәтижелер ұнтақ сымын және электр доғалық металдандырудың оңтайландырылған параметрлерін қолданудың машинажасау, энергетика және өнеркәсіптің басқа салаларында тозуға және коррозияға тәзімді жабындар алу үшін орынды екенін растиды. Жұмыс таңдалған тәсілдің практикалық маңызын көрсетіп, беткі беріктендіру технологияларын дамытуға үлес қосады.

Түйін сөздер: электр доғалы металдандыру, ұнтақ сым, құйылған сым, 65Г Болат, жабын, кеуектілік, микроқаттылық, кедір-бұдыр.

B.K. Rakhadilov¹, N.M. Magazov², A. Apsezhanova², M.B. Bayandinova^{3,4*}

¹«PlasmaScience» LLP, 070018, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

²Scientific Centre of protective and functional coatings, East-Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, 070010, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

³«Institute of Composite Materials» LLP, 070010, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk

⁴East-Kazakhstan University named after Sarsen Amanzholov, 070010, Kazakhstan, Ust-Kamenogorsk
(E-mail: shohmanovamb@gmail.ru)

Comparative analysis of coatings based on cast and cored wire at electric arc metallisation

Abstract: The article presents a comprehensive comparative analysis of coatings obtained by electric arc metallisation using cast and powder wire on 65G steel substrates. The main focus is on the influence of process parameters – wire feed rate, working gas pressure, spraying distance, and substrate preheating temperature – on the formation of the structure, thickness, porosity, and microhardness of the coatings. It has been established that the use of powder wire ensures the formation of denser and more uniform layers with minimal porosity (up to 4.3%) and increased microhardness (up to 245 HV), while cast wire demonstrates less stable results. It has been experimentally proven that increasing the gas pressure to 7–9 MPa contributes to the compaction of the coating by increasing the kinetic energy of the particles, while excessive preheating of the substrate causes an increase in porosity and a decrease in thickness. Optimal conditions allowed a coating thickness of up to 712 µm to be achieved while maintaining low roughness. The results confirm the feasibility of using powder wire and optimised parameters of electric arc metallisation to create wear- and corrosion-resistant coatings that are in demand in mechanical engineering, energy, and related industries. The work demonstrates the practical significance of the chosen approach and contributes to the development of surface hardening technologies.

Key words: electric arc metallisation, flux cored wire, cast wire, 65G steel, coating, porosity, microhardness, roughness.

References

1. Tabieva E.E., Zhurerova L.G., Baizhan D. Influence of electrolyte-plasma hardening technological parameters on the structure and properties of banding steel 2, Key Engineering Materials 839, p. 57-62(2020), <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.839.57>
2. Popova N.A., Zhurerova L.G., Nikonenko E.L., Skakov M.K. Effect of plasma electrolytic nitrocarburizing on phase composition of 0.3 C-1Mn-1Si-Fe steel, Inorganic Materials: Applied Research 8, p. 130-135(2017), <https://doi.org/10.1134/S2075113317010300>

3. Kakimzhanov D.N., Rakhadilov B.K., Tyurin Y.N., Kolisnichenko O.V., Zhurerova L.G., Dautbekov M.K. Influence of pulsed plasma treatment on phase composition and hardness of Cr₃C₂-NiCr coatings. Eurasian Journal of Physics and Functional Materials 5, p.45-51(2021) <https://DOI:10.32523/ejpfm.2021050106>
4. Ramezani M., Mohd Ripin Z., Pasang T., Jiang C.P. Surface engineering of metals: Techniques, characterizations and applications. Metals 13, p.1299(2023) <https://doi.org/10.3390/met13071299>
5. Kengesbekov A., Rakhadilov B., Sagdoldina Z., Buitkenov D., Dosymov Y., Kylyshkanov M. Improving the efficiency of air plasma spraying of titanium nitride powder. Coatings 12, p.1644(2022) <https://doi.org/10.3390/coatings12111644>
6. Bauyrzhan R., Alexander P., Zhuldyz S., Dastan B., Vyacheslav B., Mukhamedova A. Effect of bilayer thickness and bias potential on the structure and properties of (TiZr/Nb)N multilayer coatings as a result of Arc-PVD deposition. Materials 15, p.7696(2022) <https://doi.org/10.3390/ma15217696>
7. Rakhadilov B., Zhurerova L., Sagdoldina Z., Kenesbekov A., Bayatanova L. Morphological changes in the dislocation structure of structural steel 20GL after electrolytic-plasma hardening of the surface. Journal of Surface Investigation: X-Ray, Synchrotron and Neutron Techniques 15, pp. 408-413(2021)
8. Rakhadilov B.K., Baizhan D.R., Sagdoldina Z.B., Buitkenov D.B., Maulet M. Phase composition and structure of composite Ti/HA coatings synthesized by detonation spraying. AIP Conference Proceedings 2297, p.010001(2020) <https://doi.org/10.1063/5.0029754>
9. Rakhadilov B.K., Kenesbekov A.B., Kowalevski P., Ocheredko Y.A., Sagdoldina Z.B. Development of air-plasma technology for hardening cutting tools by applying wear-resistant coatings. News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan 3, p.54-62(2020) <https://doi.org/10.32014/2020.2518-170X.54>
10. Yu H.L., Zhang W., Wang H.M., Ji X.C., Song Z.Y., Li X.Y., Xu B.S. In-situ synthesis of TiC/Ti composite coating by high-frequency induction cladding. Journal of Alloys and Compounds 701, p.244-255(2017) <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2017.01.084>
11. Sidorov S.A., Mironov D.A., Khoroshenkov V.K., Khlusova E.I. Surfacing methods for increasing the service life of rapidly wearing working tools of agricultural machines. Welding International 30, p.808-812(2016)
12. Sun R., Shi Y., Pei Z., Li Q., Wang R. Heat transfer and temperature distribution during high-frequency induction cladding of 45 steel plate, Applied Thermal Engineering 139, p.1-10(2018)
13. Hui R., Wang Z., Kesler O., Rose L., Jankovic J., Yick S., Ghosh D. Thermal plasma spraying for SOFCs: Applications, potential advantages, and challenges, Journal of Power Sources 170, p.308-323(2007) <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2007.03.075>
14. Chahal H.K., Matthews S., Jones M.I. Fabrication of calcium phosphate coatings by the inflight reaction of precursor feedstocks using plasma spraying, Journal of Thermal Spray Technology 32, p.1465-1481(2023)
15. Qadir D., Sharif R., Nasir R., Awad A., Mannan H.A. A review on coatings through thermal spraying, Chemical Papers 78, p.71-91(2024)
16. Lopez J. Microhardness testing of plastics: Literature review, Polymer Testing 12, p.437-458(1993) [https://doi.org/10.1016/0142-9418\(93\)90016-I](https://doi.org/10.1016/0142-9418(93)90016-I)
17. Liao X.J., Zhang L., Sun Y.Q., Luo X.T., Li C.X., Yang G.J., Li C.J. Effect of inter-splat bonding quality on the dependence of wear behavior of plasma-sprayed stainless steel coating on applied load, Journal of Thermal Spray Technology 33, p.1-11(2024)

18. Abdivakhidov K., Sharipov K. Corrosion-resistant protective coatings for metals: A review of metallic and non-metallic coatings, AIP Conference Proceedings 3045, p.060011(2024) <https://doi.org/10.1063/5.0197373>

Сведения об авторах:

Рахадилов Б.К. – PhD, профессор, "PlasmaScience" ЖШС Бас директоры, 070018, Өскемен қ., Қазақстан

Магазов Н.М. – "Қорғау және функционалдық жабындар" ФО басшысы, Дәүлет Серікбаев атындағы Шығыс Қазақстан техникалық университеті, 070010, Өскемен қ., Қазақстан

Апсежанова А. – ғылыми қызметкер, "Қорғау және функционалдық жабындар" ФО, 070010, Өскемен қ., Қазақстан

Баяндина М.Б. – "Композициялық материалдар институты" ЖШС аға ғылыми қызметкері, С. Аманжолов атындағы ШҚУ, физика кафедрасының сениор лекторы, 070002, Өскемен қ., Қазақстан

Рахадилов Б.К. – PhD, профессор, генеральный директор ТОО «PlasmaScience», 070018, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Магазов Н.М. – руководитель НЦ "Защитные и функциональные покрытия", Восточно-Казахстанский технический университет имени Даулета Серикбаяева, 070010, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Апсежанова А. – научный сотрудник, НЦ "Защитные и функциональные покрытия", 070010, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Баяндина М.Б. – старший научный сотрудник ТОО «Институт композиционных материалов», сениор-лектор ВКУ им. С. Аманжолова, 070002, г. Усть-Каменогорск, Казахстан

Rakhadilov B.K. – PhD, Professor, h-index-14, General Director of "PlasmaScience" LLP, 070018, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Magazov N.M. – Head of SC "Protective and functional coatings", East Kazakhstan Technical University named after Daulet Serikbayev, 070010, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Apsezhanova A. – Research Associate, NTs "Protective and functional coatings", 070010, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan

Bayandinova M.B. – Senior Researcher, "Institute of Composite Materials" LLP, Senior Lecturer, East Kazakhstan Technical University named after S. Amanzholov, 070002, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan



Copyright: © 2025 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).