

<https://doi.org/10.52676/1729-7885-2024-2-43-49>

УДК 621.793.72

ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ НА СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА

Б. К. Рахадиллов^{1,2}, А. Б. Шынарбек³, Д. Н. Какимжанов^{1,3*}, О. А. Степанова³

¹ ТОО «PlasmaScience», Усть-Каменогорск, Казахстан

² Восточно-Казахстанский университет им. Сарсена Аманжолова, Усть-Каменогорск, Казахстан

³ Университет Шакарима города Семей, Казахстан

*E-mail для контактов: dauir_97@mail.ru

В исследовании рассматриваются характеристики пористости, анализ коррозии, микроструктура покрытий на основе железа, напыленных высокоскоростной дуговой металлизацией, с целью понимания закономерности влияния параметров в зависимости от скорости подачи проволоки. Работоспособность покрытий на основе железа зависит от целостности структуры покрытия. Оптимизация параметров дугового напыления позволяет минимизировать дефекты (поры, границы зерен, нерасплавленные частицы, оксиды и микротрещины), ухудшающие свойства покрытия. При высоком уровне тока микроструктура покрытий становится более плотной и размер частиц уменьшается, также средний размер пор уменьшается. При увеличении скорости подачи проволоки значение силы тока увеличивается, что приводит к выделению большей тепловой энергии на электрической дуге для плавления проволоки и соответственно способствует образованию плотных покрытий с низкой пористостью.

Ключевые слова: электродуговая металлизация, покрытие, сталь, структура, коррозия, проволока стальная наплавочная.

ВВЕДЕНИЕ

В последние годы термическое напыление как процесс модификации поверхности позволяет получать пленки и покрытия, улучшающие свойства металлических поверхностей. Быстрый и устойчивый экономический рост в разных странах предоставил возможность для роста индустрии термического напыления во всех аспектах, таких как производство исходного материала, систем распыления и контракты на нанесение покрытий и восстановление деталей [1]. Среди различных методов термического напыления проволочное дуговое напыление, также называемое дуговым напылением (AC), находит широкое применение при ремонте и восстановлении деталей конструкций в машиностроении, горнодобывающей и энергетической промышленности [2–5]. По сравнению с другими методами термического напыления, такими как высокоскоростное кислородно-топливное напыление (HVOF) и атмосферное плазменное напыление (APS), дуговое напыление предпочтительнее из-за его относительно более низких затрат, простоты обслуживания, более высокой производительности распыления и значительных экономических преимуществ, а также распыление на большие площади.

Электродуговая металлизация имеет ряд преимуществ перед другими методами нанесения покрытий [1–2]. Это относительно дешевый и быстрый процесс, который хорошо подходит для обработки больших поверхностей. Его можно применять к различным материалам, включая металлы, керамику и пластмассы. Покрытия, полученные этим способом, обычно являются плотными, однородными и облада-

ют хорошей адгезией к основе. Они также обладают устойчивостью к износу, коррозии и высоким температурам [3–5]. Эти покрытия могут быть применены для улучшения свойств поверхности материала для различных целей, таких как в аэрокосмической, автомобильной и промышленной отраслях [6–8].

Одним из способов применения электродуговой металлизации (ЭДМ) является восстановление изношенных коленчатых валов, которые считаются одними из наиболее критически важных деталей в двигателях внутреннего сгорания и механизмах вращения. Эти валы играют ключевую роль в обеспечении безопасности и эффективности транспортных средств и машин. Исследование влияния различных режимов проведения ЭДМ на восстановление поверхностей стальных коленчатых валов стандарта 45 представляет значительную актуальность. Полученные результаты могут быть использованы для оптимизации параметров процесса ЭДМ и улучшения эффективности и долговечности восстановленных коленчатых валов, а также для повышения их механических свойств. Эти выводы имеют важное применение в автомобильной и промышленной сферах, где коленчатые валы играют ключевую роль в работе различных механизмов и оборудования. Множество исследований было посвящено изучению влияния различных параметров осаждения на характеристики металлических покрытий, полученных с использованием дуги. Например, в работе [9] обсуждалось влияние параметров осаждения на характеристики цинковых покрытий, нанесенных дугой. Исследование показало, что свойства получаемого покрытия, такие как микроструктура, пористость и твердость, тесно свя-

заны с параметрами процесса осаждения. В другом исследовании [10] авторы оптимизировали параметры процесса, такие как ток, напряжение, расстояние распыления и давление газа при двухпроводочной дуговой металлизации алюминиевого покрытия, чтобы достичь требуемой микроструктуры и физико-механических свойств.

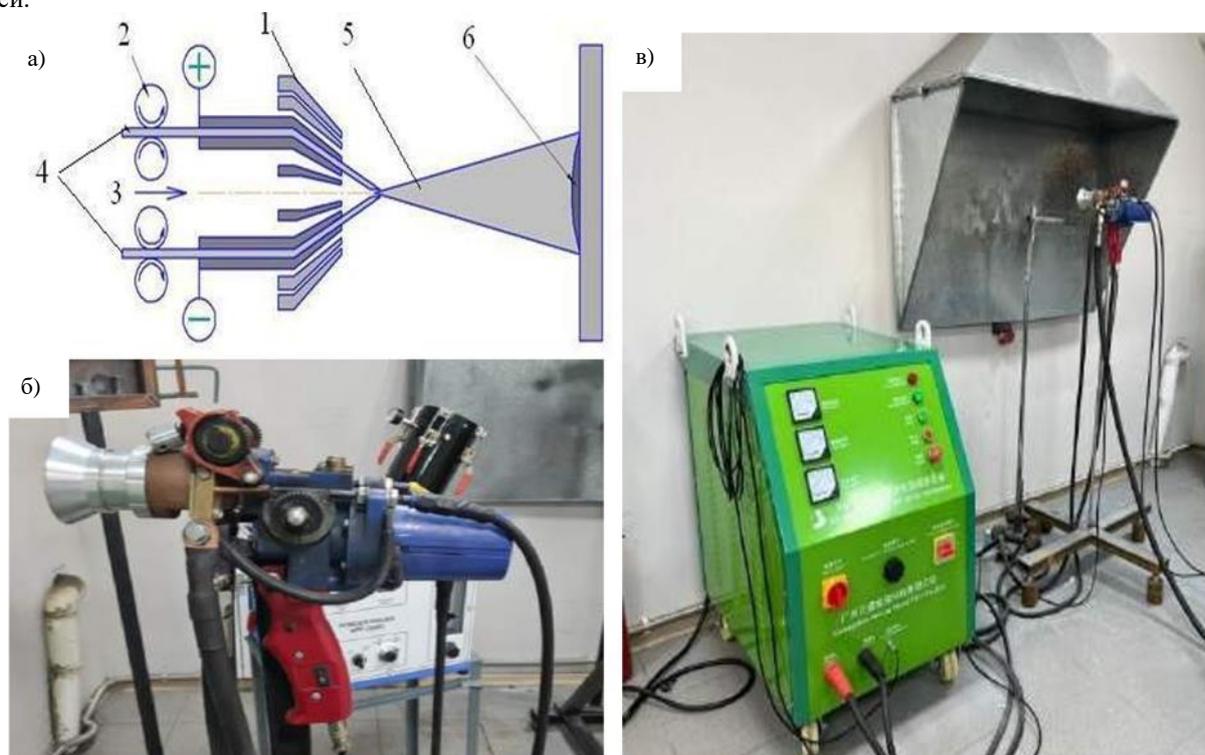
Кристаллические и аморфные покрытия на основе железа имеют большой потенциал в области антикоррозионных и противозносных применений. Они также являются подходящими кандидатами для применения при средних и высоких температурах из-за их хороших окислительных свойств. Характеристики покрытий на основе Fe зависят от структуры покрытия, содержания аморфной фазы и химического состава покрытий [10]. Параметры распыления, такие как давление сжатого воздуха и размер частиц, скорость подачи проволоки, влияют на структуру покрытия. Плотная структура покрытия с низкой пористостью и границами зерен улучшает характеристики покрытия в условиях окружающей среды и высоких температур.

Целью данной работы является исследование влияния скорости подачи проволоки на коррозионные, структурные свойства и выявление закономерности формирования покрытий из проволоки 30 ХГСА на поверхности стали 45 высокоскоростной металлизацией.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Получение покрытий проводилось с использованием высокоскоростного электродугового металлизатора SX-600 (см. рисунок 1). Комплекс включает в себя источник питания, высокоскоростной дуговой распылитель, систему управления и систему подачи сжатого воздуха. Данная установка позволяет варьировать скорость подачи проволоки в трёх режимах. Параметры электродуговой металлизации представлены в таблице 2.

Для проведения напыления использовалась сталь 30ХГСА в качестве проволоки (согласно ГОСТ 10543-98). Диаметр проволоки 1,6 мм. Химический состав стали марки 30ХГСА представлен в таблице 1. Образцы были изготовлены из прутка стали марки 45 (согласно ГОСТ 1050-2013). Выбор данного материала обусловлен его широким применением в производстве разнообразных деталей, таких как зубчатые колеса, коленчатые валы, что типично для различных отраслей машиностроения. Перед процессом электродуговой металлизации образцы были предварительно подготовлены механическими методами, включая шлифовку и пескоструйную обработку с использованием кварцевого песка. Пескоструйная обработка было проведена на устройстве Nordberg NS3.



1 – корпус металлизатора; 2 – механизм подачи проволоки; 3 – канал подачи воздуха; 4 – электродные проволоки;
5 – электрическая дуга с напыленными частицами проволоки; 6 – напыленное покрытие

Рисунок 1. Технологическая схема (а); внешний вид пистолета (б) и внешний вид комплекса (в) высокоскоростной электродуговой металлизации SX-600

**ВЛИЯНИЕ СКОРОСТИ ПОДАЧИ ПРОВОЛОКИ ПРИ ВЫСОКОСКОРОСТНОЙ ЭЛЕКТРОДУГОВОЙ МЕТАЛЛИЗАЦИИ
НА СТРУКТУРУ И КОРРОЗИОННЫЕ СВОЙСТВА ПОКРЫТИЙ ИЗ СТАЛИ 30ХГСА**

Таблица 1. Химический состав стали марки 30ХГСА, %

Элемент	Содержание, %
C (углерод)	0,25–0,35
Mn (марганец)	0,8–1,2
Si (кремний)	0,8–1,2
S (серы)	≤0,025
P (фосфор)	≤0,025
Cr (хром)	0,8–1,2
Ni (никель)	≤0,4

Таблица 2. Режимы нанесения покрытий 30ХГСА
электродуговой металлизацией

Наименование образца	№ 1	№ 2	№ 3
Напряжение, В	43	43	43
Сила тока, А	100	200	300
Скорость подачи проволоки, см/с	4	8	16
Давление сжатого воздуха, атм	8		
Дистанция напыления, мм	150		
Количество образцов	3	3	3

Коррозионную стойкость покрытий изучали в электролитической ячейке с помощью потенциостата Potentiostat cs300m. Измерения проводились в 3,5%-ном растворе NaCl по трехэлектродной схеме: рабочим электродом служило покрытие, нанесенное ЭДМ на сталь марки 45, роль электрода сравнения – хлор-серебряный электрод, а платиновый электрод служил вспомогательным электродом. Токи коррозии определялись путем экстраполяции линейных частей поляризационных кривых на потенциал коррозии. Пористость покрытий измерялась с использованием программы ImageJ на изображениях поперечных срезов покрытий, полученных с помощью растрового электронного микроскопа JSM-6390LV, JEOL (Япония). Для анализа изображения первоначально обрабатывались для улучшения контрастности и четкости, а затем с помощью инструментов программы проводилось выделение пор и расчет их общей площади в отношении к общей площади образца. Этот процесс позволял количественно оценить процент пористости в покрытии, что критически важно для определения его эксплуатационных характеристик [11], на изображениях поперечных шлифов ЭДМ-покрытий снятых на РЭМ JSM-6390, JEOL

(Япония). Шероховатость поверхности покрытий R_a оценивалась с помощью профилометра модели NY2300. Трибологические испытания на трение скольжения проводили на трибометре TRB3 (Anton Paar Srl, Peseux, Швейцария) с использованием стандартной методики «шар-диск» (международный стандарт ASTM G99), где в качестве контртела использовали шарик диаметром 6,0 мм из стали с покрытием SiC, при нагрузке 5 Н и радиусом кривизны износа 5 мм, пути трения 100 м.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке 2 представлена морфология поверхности покрытий после ЭДМ. В нанесенном поверхностном слое наблюдаются в жидком металле застывшие конвективные потоки металла, микросваренные мелкие металлические капли. Из полученных снимков также видно, что при увеличении подачи проволоки (и, соответственно, тока) размер частиц уменьшается, а плотность покрытий улучшается. У образца № 1 частицы более выраженные (рисунок 2а), так как скорость подачи проволоки у него в 4 раза меньше, чем у образца № 3. Увеличение подачи проволоки вызывает увеличение силы тока, что приводит к уменьшению размера частиц и, как следствие, к увеличению плотности покрытий. [12–14].

В таблице 3 представлены результаты измерения шероховатости поверхности материала покрытий, согласно которым установлено, что поверхность имеет неоднородную структуру с наличием пор. В качестве основного параметра оценки шероховатости поверхности покрытия была выбрана величина R_a , которая представляет собой среднее арифметическое отклонение профиля. Снижение показателя шероховатости обусловлено увеличением скорости подачи проволоки и возрастанием силы тока, что приводит к уменьшению размера частиц и шероховатости покрытия.

Таблица 3. Результаты измерения шероховатости покрытий

Наименование образца	№ 1	№ 2	№ 3
Шероховатость, R_a , мкм	17,81±0,41	14,18±0,38	8,15±0,36

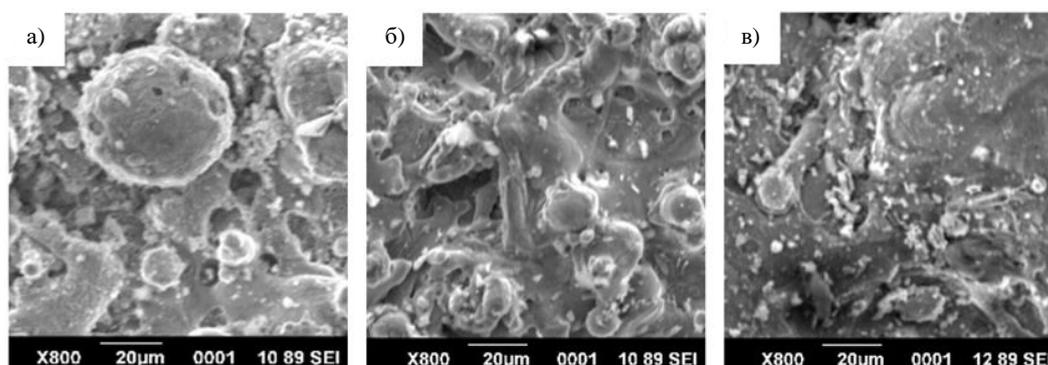


Рисунок 2. Морфология поверхности покрытий, полученных с РЭМ после эксперимента для образцов: № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)

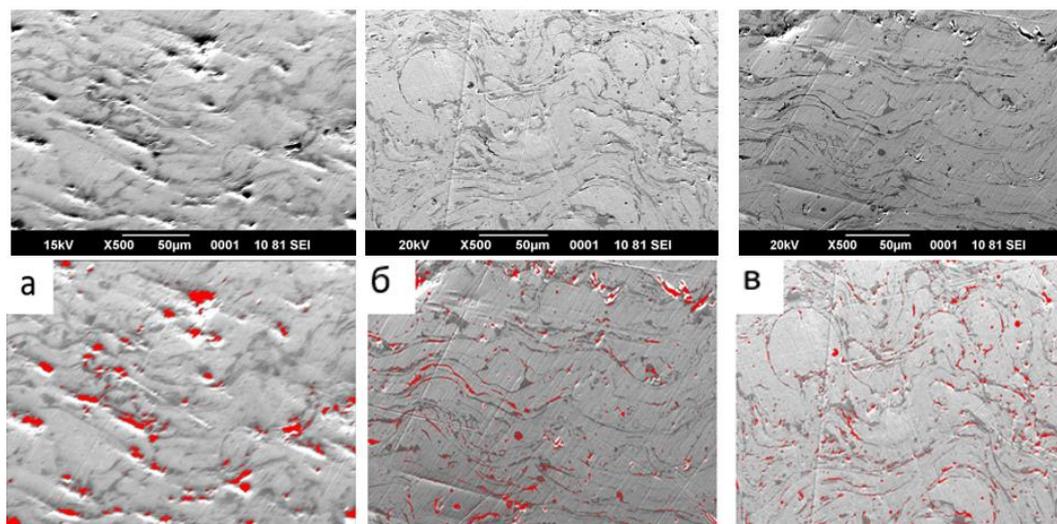


Рисунок 3. Изображения поперечного сечения полученных покрытий и снимки микропор, полученные с помощью программного комплекса ImageJ для образцов: № 1 (а); № 2 (б); № 3 (в)

Результаты измерения пористости покрытий показаны на рисунке 3. Дефекты покрытия, такие как поры и трещины, оказывают неблагоприятное воздействие на коррозионные свойства. Они действуют как проходы для агрессивных сред, и их количество в микроструктуре покрытия должно быть сведено к минимуму. Образец № 1 отличается наибольшей пористостью по сравнению с другими образцами. Как уже упоминалось, с увеличением подачи проволоки размер пор уменьшается. Определение оптимальной скорости подачи проволоки способствует формированию равномерного и плотного покрытия.

Таблица 4. Значения пористости полученных покрытий

Наименование образца	№ 1	№ 2	№ 3
Средний размер пор, мкм	45,474±0,13	18,028±0,12	12,694±0,10
Процент пористости, %	5,536±0,31	3,476±0,34	2,123±0,33

Коррозия является одной из основных причин деградации материалов, особенно оборудования и конструкций. Результаты теста на коррозию показаны на рисунке 4. Эти результаты демонстрируют улучшение коррозионной стойкости образцов после процесса электродуговой металлизации. С увеличением скорости подачи проволоки потенциалы коррозии (E_{corr}) уменьшались, а плотности тока (I_{corr}) увеличивались (рисунок 4). Также показано, что образец № 3 имеет наименьшую скорость коррозии (рисунок 4).

Плотная и однородная структура покрытия у образца № 3 помогает предотвратить проникновение влаги и агрессивных сред внутрь покрытия, что увеличивает коррозионную стойкость. Образец № 1 имеет меньшую коррозионную стойкость из-за менее плотной структуры и наличия дефектов. Такие поры и трещины могут стать точками входа для влаги и коррозионных агентов, ухудшая коррозионные свойства покрытия. Числовые результаты теста на коррозию покрытий представлены в таблице 5.

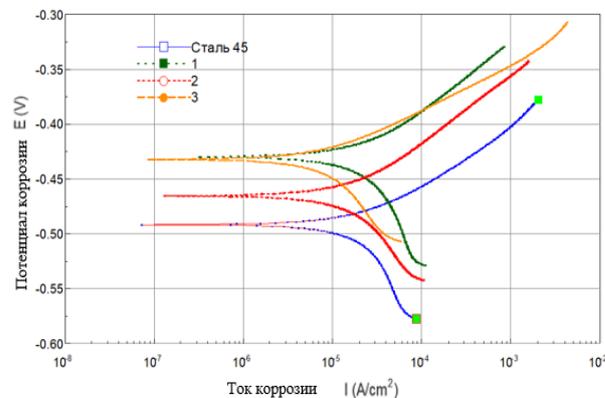


Рисунок 4. Поляризационные кривые, полученные в результате проведения электрохимических коррозионных испытаний образцов

Таблица 5. Результаты расчета параметров коррозии образцов

Образец	Сталь 45	№ 1	№ 2	№ 3
Ток коррозии I_k , А/см ²	3,3807·10 ⁻⁵	3,4841·10 ⁻⁵	2,1462·10 ⁻⁵	1,0961·10 ⁻⁵
Потенциал свободной коррозии E_k , В	-0,49212	-0,43016	-0,46569	-0,43251
Скорость коррозии, мм/год	0,39661±0,021	0,40872±0,023	0,25178±0,021	0,12859±0,022

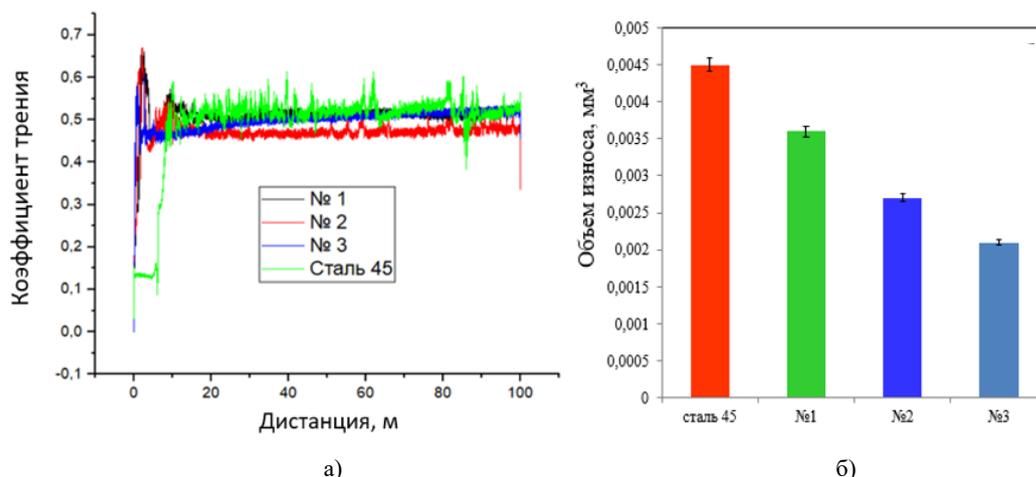


Рисунок 5. Результаты трибологических испытаний покрытий: коэффициент трения (а); объем износа (б)

Результаты трибологических испытаний покрытий показаны на рисунке 5. Результаты испытаний износостойкости покрытий 30ХГСА по стандартной схеме «шар-диск» показали, что коэффициент трения стали 45 увеличивается по сравнению с полученными покрытиями. Для образца из стали 45 среднее значение коэффициента трения составляет 0,53 (рисунок 5а). После нанесения покрытия среднее значение коэффициента трения варьировалось от 0,46 до 0,53 в зависимости от параметров дуговой металлизации. Результаты анализа объема износа представлены на рисунке 5б. Образец № 3 имеет меньший объем износа по сравнению с остальными образцами. Фактором высоких трибологических свойств покрытия является его более высокий индекс пластичности. В работе [16] показан механизм образования покрытий при электродуговой металлизации и установлено, что крупные частицы металла достигают поверхности преимущественно в жидком состоянии, а более мелкие – в пластичном состоянии. Как показано в исследовании морфологии покрытий, образец № 3 имеет более мелкие части по сравнению с другими образцами и соответственно, имеет высокий индекс пластичности.

Выводы

Анализ РЭМ-изображений поперечных срезов покрытий показал, что изменение параметров электродуговой металлизации существенно влияет на размер частиц и плотность покрытий. Управление током и подачей проволоки может быть эффективным методом для достижения оптимальных характеристик металлических покрытий. Исследование пористости образцов подтверждает, что регулировка подачи проволоки влияет не только на размер пор, но и на их количество. Образцы с разной пористостью имеют различные свойства, из-за различных параметров процесса. Результаты исследований показали, что оптимальным режимом электродуговой металлизации являются параметры образца № 3 – скорость подачи проволоки 16 см/с. Снижение показателя шероховато-

сти обусловлено увеличением скорости подачи проволоки и возрастанием силы тока, что приводит к уменьшению размера частиц и шероховатости покрытия. Минимизация дефектов, таких как поры и трещины, имеет критическое значение для улучшения коррозионной стойкости. Образец № 3 с плотной и однородной структурой покрытия, а также с меньшим размером пор, демонстрирует более высокую устойчивость к коррозии по сравнению с образцами с дефектами в микроструктуре. Это подчеркивает важность тщательного контроля и оптимизации параметров электродугового процесса для достижения наилучших результатов в области защитных металлических покрытий для восстановления изношенных деталей.

Финансирование

Работа выполнена при финансовой поддержке Комитета науки Министерства науки и высшего образования Республики Казахстан АР14871373 «Разработка технологии сверхзвуковой дуговой металлизации для восстановления изношенных поверхностей коленчатых валов двигателей внутреннего сгорания».

ЛИТЕРАТУРА / REFERENCES

1. Fukumoto M. The current status of thermal spraying in Asia. – 2008.
2. Davis J. R. (ed.). Handbook of thermal spray technology. – ASM international, 2004.
3. Shi P. J. et al. Advanced Rapid Forming Technology for Remanufacturing Engineering // Applied Mechanics and Materials. – 2013. – Vol. 271. – P. 386–389.
4. Szymański K. et al. Thermally sprayed coatings resistant to erosion and corrosion for power plant boilers: A review // Surface and Coatings Technology. – 2015. – Vol. 268. – P. 153–164.
5. Steffens H. D., Babiak Z., Wewel M. Recent developments in arc spraying // IEEE Transactions on Plasma Science. – 1990. – Vol. 18. – No. 6. – P. 974–979.
6. Матюшкин, Б. А. Технологические особенности электродуговой металлизации в отрасли АПК /

- Б. А. Матюшкин, В. И. Денисов, А. А. Толкачев // Сварочное производство. – 2016. – № 12. – С. 46–50. [Matyushkin, B. A. Tekhnologicheskie osobennosti elektrodugovoy metallizatsii v otrasli APK / B. A. Matyushkin, V. I. Denisov, A. A. Tolkachev // Svarochnoe proizvodstvo. – 2016. – No. 12. – P. 46–50. (In Russ.)] – EDN: YQYVEF.
7. Логачев, В. Н. Электродуговая металлизация: пути совершенствования оборудования и технологии / В. Н. Логачев, Н. Н. Литовченко // Труды ГОСНИТИ. – 2014. – Т. 117. – С. 228–234. [Logachev, V. N. Elektrodugovaya metallizatsiya: puti sovershenstvovaniya oborudovaniya i tekhnologii / V. N. Logachev, N. N. Litovchenko // Trudy GOSNITI. – 2014. – Vol. 117. – P. 228–234. (In Russ.)] – EDN: TFDLXD.
 8. Huang B. et al. Wear and corrosion resistant performance of thermal-sprayed Fe-based amorphous coatings: A review // Surface and Coatings Technology. – 2019. – Vol. 377. – P. 124896.
 9. Wielage B. et al. Iron-based coatings arc-sprayed with cored wires for applications at elevated temperatures // Surface and Coatings Technology. – 2013. – Vol. 220. – P. 27–35.
 10. Degnan C. C., Shipway P. H. A comparison of the reciprocating sliding wear behaviour of steel based metal matrix composites processed from self-propagating high-temperature synthesised Fe–TiC and Fe–TiB₂ masteralloys // Wear. – 2002. – Vol. 252. – No. 9–10. – P. 832–841.
 11. ImageJ – open source software for processing and analyzing scientific images. URL: <https://imagej.net/>
 12. Newbery A. P., Grant P. S. Arc Sprayed Steel: Microstructure in severe substrate features // Journal of Thermal Spray Technology. – 2009. – Vol. 18. – P. 256–271.
 13. Ageev M. et al. Study influence factors of the spraying process on the properties of electric arc spraying coatings // Problems of Tribology. – 2021. – Vol. 26. – No. 1/99. – P. 74–83.
 14. Lin J. et al. Microstructure and corrosion resistance of Fe-based coatings prepared by twin wires arc spraying process // Journal of Thermal Spray Technology. – 2014. – Vol. 23. – P. 333–339.
 15. Pokhmursky V. I. et al. Influence of electric arc metallizing modes and compositions of applied flux-cored wires on structure and abrasive wear resistance of coatings // Paton welding journal C/C of avtomaticheskaya svarka. – 2006. – Vol. 2006. – No. 7. – P. 26.
 16. Kolomeichenko A.V., Logachev V.N., Deev V.B., Dudareva N.Yu. Properties of coatings obtained by supersonic electric arc metallization with aerosol fluxing // Izvestiya. Ferrous Metallurgy. – 2022. Vol. 65. – No. 9. – P. 637–643. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2022-9-637-643>

30ХГС БОЛАТ ЖАБЫНДАРЫНЫҢ ҚҰРЫЛЫМЫ МЕН КОРРОЗИЯЛЫҚ ҚАСИЕТТЕРІНЕ ЖОҒАРЫ ЖЫЛДАМДЫҚТЫ ЭЛЕКТР ДОҒАЛЫ МЕТАЛДАНДЫРУ СЫМЫНЫҢ БЕРІЛУ ЖЫЛДАМДЫҒЫНЫҢ ӘСЕРІ

Б. К. Рахадиллов^{1,2}, А. Б. Шынарбек³, Д. Н. Кәкімжанов^{1,2*}, О. А. Степанова³

¹ «PlasmaScience» ЖШС, Өскемен, Қазақстан

² Сәрсен Аманжолов атындағы Шығыс Қазақстан университеті, Өскемен, Қазақстан

³ Семей қаласының Шәкәрім атындағы университеті, Қазақстан

*Байланыс үшін E-mail: dauir_97@mail.ru

Зерттеу сымның берілу жылдамдығына тәуелділік параметрлерінің әсерін түсіну мақсатында кеуектілік сипаттамаларын, коррозиялық талдауды, дыбыстан жоғары доғалық металдандырумен тоздандырылған темір негізіндегі жабындардың микроқұрылымын қарастырады. Темір негізіндегі жабындардың өнімділігі жабын құрылымының тұтастығына байланысты. Доғалық бүрку параметрлерін оңтайландыру жабынның қасиеттерін нашарлататын ақауларды (кеуектер, дән шекаралары, балқытылмаған бөлшектер, оксидтер және микро жарықтар) азайтуға мүмкіндік береді. Жоғары ток деңгейінде жабындардың микроқұрылымы тығызырақ болады және бөлшектердің мөлшері азаяды, сонымен қатар кеуектердің орташа мөлшері азаяды. Сымның берілу жылдамдығы жоғарылаған сайын ток күші жоғарылайды, бұл сымды балқыту үшін электр доғасында үлкен жылу энергиясының бөлінуіне әкеледі және сәйкесінше кеуектілігі төмен тығыз жабындардың пайда болуына ықпал етеді.

Түйін сөздер: Электр доғасын металдандыру, сым, жабын, болат, құрылым, коррозия, болат қаптау сымы.

**INFLUENCE OF WIRE FEED RATE OF HIGH-SPEED ELECTRIC ARC METALLISATION
ON STRUCTURE AND CORROSION PROPERTIES OF 30HGSA STEEL COATINGS**

B. K. Rakhadilov^{1,2}, A. B. Shynarbek³, D. N. Kakimzhanov^{1,3*}, O. A. Stepanova³

¹ *“PlasmaScience”, LLP, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

² *Sarsen Amanzholov East Kazakhstan University, Ust-Kamenogorsk, Kazakhstan*

³ *Shakarim University of Semey, Kazakhstan*

**E-mail for contacts: dauir_97@mail.ru*

The study examines the porosity characteristics, corrosion analysis, and microstructure of iron-based coatings sprayed by supersonic arc metallisation in order to understand the regularity of the influence of the parameters by wire feed rate dependence. The performance of iron-based coatings depends on the integrity of the coating structure. Optimisation of arc spraying parameters allows minimising defects (pores, grain boundaries, unmelted particles, oxides and microcracks) that deteriorate coating properties. At high current levels, the microstructure of the coatings becomes more dense and the particle size decreases, also the average pore size decreases. As the wire feed rate increases, the value of current increases, which leads to the release of more heat energy at the arc to melt the wire and consequently favours the formation of dense coatings with low porosity.

Keywords: *Electric arc metallisation, wire, coating, steel, structure, corrosion, steel cladding wire.*