

УДК 621.793.74

*Коржик В. Н.^{1,2}, Лютик Н. П.², Чайка А. А.², Ткачук В. И.^{2,3}, Гос И. Д.², Петров С. В.²,
Ермаков А. С.³, Никитюк Ю. А.⁴*

¹ Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский Институт сварки им. Е. О. Патона).
КНР, г. Гуанчжоу

² Институт электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины. Украина, г. Киев

³ ООО «Научно-производственный центр «Плазер». Украина, г. Киев

⁴ ООО «Научно-производственная фирма «ВИСП». Украина, г. Киев

ОПТИМИЗАЦИЯ ТЕХНОЛОГИИ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ ДЛЯ ВОССТАНОВЛЕНИЯ И РЕНОВАЦИИ ОТВЕТСТВЕННЫХ УЗЛОВ И ДЕТАЛЕЙ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Повышение качества износостойких покрытий для ответственных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта достигнуто за счет применения разработанной технологии сверхзвукового электродугового напыления, реализующей гибридный процесс в котором сочетается электродуговое напыление со сверхзвуковым газопламенным напылением с формированием единого сверхзвукового высокотемпературного потока газа и расплавленных частиц напыляемого материала.

Покрытия, полученные по разработанной технологии с применением порошковой проволоки на основе системы Fe-Cr-C имеют структуру с содержанием аустенита до 80 % мас. Упрочнение покрытий обеспечивается формированием пересыщенного твердого раствора железа с повышенным содержанием хрома до 20,5 мас.% и алюминия до 6,2 мас.%. Микротвердость покрытия превышает на 30–50% микротвердость электродуговых покрытий из этой же проволоки, полученных по традиционной дозвуковой технологии, в 2–3 раза уменьшается окисление напыляемого материала, пористость снижается в 3–5 раза. Прочность сцепления стальных покрытий из стальной основой по сравнению с серийными металлизаторами увеличивается с 25–30 МПа до 80 МПа, пористость покрытий снижается с 15–20% до 0,5–3%, окисляемость

материала покрытия снижается в 2 раза. Также технология сверхзвукового электродугового напыления, по сравнению с традиционными методами ЭДМ, позволяет повысить износостойкость покрытий более чем в 2,5 раза.

Ключевые слова: электродуговая металлизация; сверхзвуковой метод; покрытие; микроструктура; фазовый состав; микротвердость.

Введение

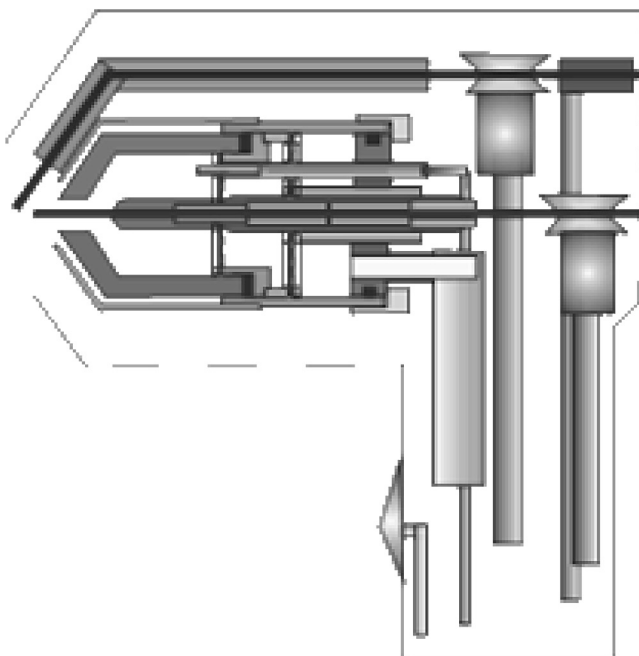
В связи с необходимостью повышения эффективности использования железнодорожного транспорта, возрастает потребность в новых технологиях и материалах для повышения его ресурса, в первую очередь ответственных деталей подвижного состава. Этим объясняется заинтересованность эксплуатационных служб в повышении надежности и продлении сроков безотказной работы железнодорожной техники, что, в свою очередь, способствует безопасности движения поездов. Более высокий уровень долговечности подвижного состава возможен за счет передовых технологий (в частности газотермических защитных покрытий) в пользу резкого снижения эксплуатационных расходов с одновременным повышением надежности наиболее ответственных узлов [1-6].

В этом аспекте одной из наиболее перспективных технологий является сверхзвуковое электродуговое напыление или сверхзвуковая воздушно-газовая электродуговая металлизация (ЭДМ) [7-9]. Здесь преодолены основные недостатки тради-

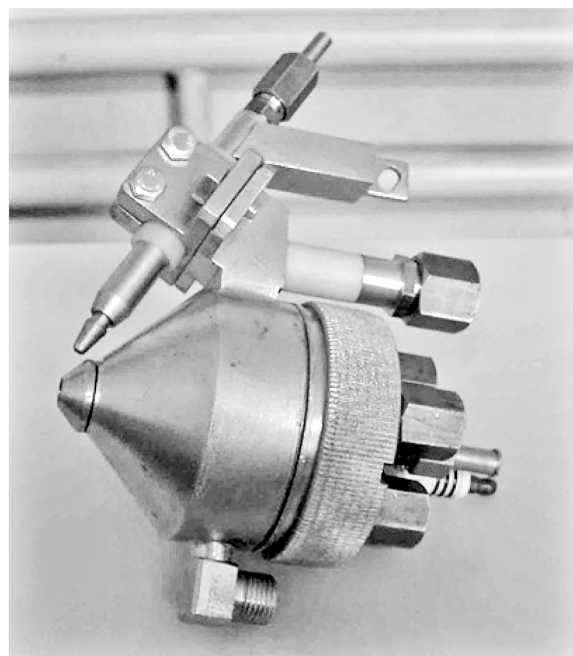
ционного электродугового напыления, связанные с низким качеством покрытий — повышенное выгорание легирующих элементов распыляемого металла проволок под действием струи воздуха, низкая адгезионная прочность покрытия и низкая прочность сцепления с материалом основы.

Особенности технологии сверхзвукового электродугового напыления

Для реализации такой технологии разработан усовершенствованный сверхзвуковой электродуговой металлизатор PLAZER15-SA-EM установки PLAZER15-SA [10], содержащий горелку с камерой сгорания, работающую под избыточным давлением (рис. 1). В основу такого сверхзвукового металлизатора заложен процесс, в котором обдув стабилизированной электрической дуги осуществляется горячими продуктами сгорания природного газа со сверхзвуковой скоростью. Т.е., данная технология является гибридной, в которой сочетается электродуговое напыление со сверхзвуковым газопламенным напылением с формированием единого сверх-



а



б

Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) сверхзвукового электродугового металлизатора

звукового высокотемпературного потока газа и расплавленных частиц напыляемого материала проволоки. Электрическая дуга ориентирована вдоль высокотемпературного газового потока, скорость которого составляет 1,5 Маха и горит между двумя плавящимися проволоками. Такая система обеспечивает высокий уровень стабильности горения дуги, вследствие ее ориентации вдоль газового потока и, таким образом, процесса передачи тепла в электроды: интенсивный разгон и измельчения частиц расплавленного металла, их защиту от окисления в полете, снижение количества испаряемого материала (благодаря формированию двухфазового потока высокоскоростной струей продуктов сгорания).

Для распыления проволок, которые плавятся электрической дугой, в указанном сверхзвуковом электродуговом металлизаторе используется слабонедорозширенная сверхзвуковая струя горячих продуктов сгорания углеводородного газа с воздухом, вытекающая из звукового сопла. Основное возмущение в поток вносит боковая проволока. За ней ниже по струе образуется область аэродинамической тени. На рисунке (рис. 2, а, б) приведены радиальные изменения динамических напоров в поперечном сечении струи на расстоянии 2, 7, 12, 22 мм ниже точки встречи боковой и центральной проволок. Сравнение рис. 2, а и 2, б показывают, что в сверхзвуковом потоке с препятствием в виде проволоки картина течения меняется в зависимости от режима работы горелки электродугового металлизатора. При работе на обогащенной смеси, когда коэффициент избытка воздуха $a = 0,9$ (рис. 2, б) в отличие от обедненной смеси $a \sim 1,2$ (рис. 2, а) поток за боковой проволокой сходится. Рассеяния

дисперсных частиц в высокоскоростном потоке определяется направлением вектора усредненной скорости вдоль траектории частиц и параметрами турбулентности. Направление вектора усредненной скорости (рис. 2, б) способствует сжатию металлопотока, а при околосвуковой скорости уровень турбулентных пульсаций снижается, происходит ламинаризация потока.

Эти два обстоятельства являются решающими при снижении рассеивания дисперсной фазы, уменьшении угла раскрытия металлопотока и разбрасывании скоростей частиц. Кроме того, сформирована за боковым электродом металлизатора (рис. 1) газодинамическая ситуация (рис. 2) определяет характер сноса, дробления расплава проволок и рассеивания дисперсной фазы. В теневой зоне бокового электрода, равной 2,5–3 калибра от среза сопла, имеет место струйное течение металла. Далее ниже по потоку происходит аэродинамическое дробление расплава и разгон дисперсных частиц. Это особенно важно при использовании порошковых проволок, когда получение легированных частиц происходит при взаимодействии оболочки из малоуглеродистой стали с компонентами порошкового стержня. Легирования здесь происходит во время расплавления проволок и струйного течения расплава.

Наличие составляющей скорости обдувающего потока за боковым электродом, направленной к оси струи (рис. 2, б), обеспечивает обжатия металлопотока, способствует снижению рассеивания дисперсной фазы. Угол раскрытия составляет 7–10°.

Как известно, одним из существенных недостатков покрытий, получаемых электродуговой металлизацией, является высокая степень их окисления. Этот факт чаще всего расценивается как отрица-

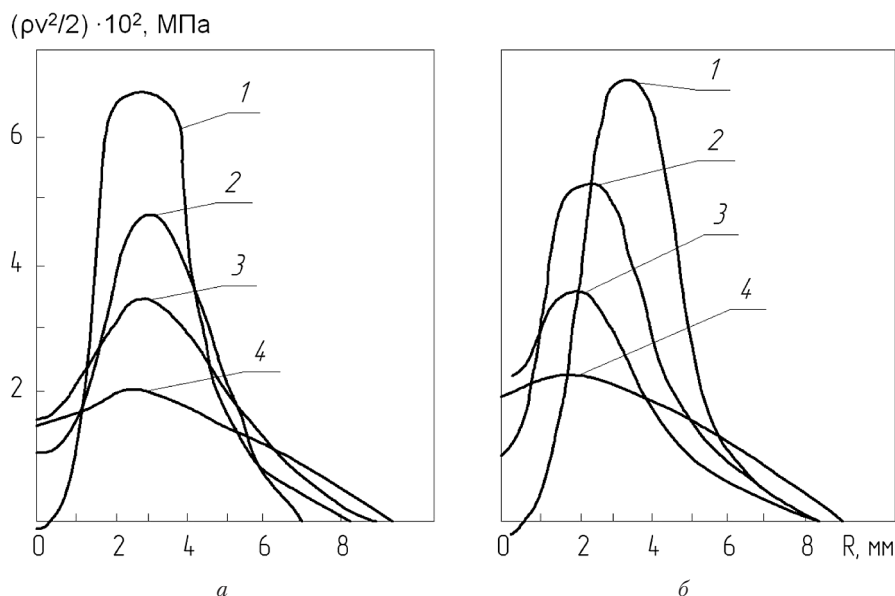


Рис. 2. Профили динамического нажатия сверхзвукового металлизатора на расстоянии от среза сопла: а – 1,2; б – 0,9; 1 – 2 мм; 2 – 7 мм; 3 – 12 мм; 4 – 22 мм

тельный. Покрyтия, которые формируются окисленными частицами, характеризуются также высокой пористостью и низкой прочностью сцепления покpытия с основой. Основной причиной окисления материала является его взаимодействие с кислородом в зоне электрической дуги, горящей между электродными проволоками.

Способом уменьшения влияния кислорода на расплавленный металл служит «связывания» его углеродными газами (чаще всего метаном). Для этого в распыляемый воздух подмешивают горючие газы. Перспективность применения таких газоздушных смесей в качестве распыляющего газа можно оценить, проанализировав окисляемость материала в зоне его диспергирования. В этой зоне из-за высоких температур (6000–10000 К) происходит наиболее активное взаимодействие металла с газами. Качественный анализ окисленности частиц можно получить по результатам термодинамического равновесного расчета систем «материал – газовая среда». Эксперименты показывают, что при распылении газоздушной смеси, в которой соотношение «природный газ: воздух» = 1/8, окисляемость частиц отсутствует. Дальнейшее увеличение использования доли метана в распыляемом потоке нецелесообразно с экономической точки зрения. В реальных условиях достичь полной защиты металла от окисления практически не удастся, поскольку материал покpытия окисляется уже при охлаждении частиц с температуры плавления до температуры окружающей среды. Экспериментально полученные данные по содержанию оксидов железа в исследуемой системе в зависимости от концентрации природного газа в газоздушной смеси для металлургического аппарата подтверждают вышесказанное.

Вторым обстоятельством, которая способствует снижению окисленности напыляемого материала в сверхзвуковом потоке, является уменьшение времени контакта расплавленных частиц с атмосферой за счет их более высокой скорости.

Центральный и боковой электроды в металлургическом аппарате (рис. 1) работают в разных условиях. Центральный электрод расплавляется под действием тепла прикатодного (прианодного) участка дуги с подогревом проволоки на длине вылета за направляемым мундштуком горячими продуктами сгорания. Боковой электрод расплавляется под действием тепла от дуговой плазмы и прианодного (прикатодного) падения потенциала. Очевидно, что боковая проволока получает больше тепла и скорость ее плавления всегда больше центральной. Уровень тока (при питании от источника с жесткой внешней характеристикой) задается скоростью подачи центральной проволоки. Скорость подачи боковой проволоки выбирают таким образом, чтобы ее конец расплавлялся на линии продолжения верхней поверхности центральной проволоки. В этом случае обеспечивается минимальный уровень пульсаций тока и напряжения дуги, равномерное и стабильное плавление проволок, наиболее узкий диапазон диспергирования расплава, наименьший угол раскрытия металопотока. Такой режим работы сверхзвукового металлургического аппарата на продуктах сгорания является оптимальным.

Сравнительные исследования процесса сверхзвукового напыления с процессами электродугового напыления при дозвуковых режимах истечения высокотемпературной струи (табл. 1 и 2) подтвердили существенное повышение скорости и умень-

Таблица 1

Режимы напыления покpытий из порошковых проволок с применением различных типов электродуговых металлургических аппаратов

Тип электродугового оборудования	Напряжение, В	Сила тока, А	Расход воздуха, м ³ /час	Расход пропана, м ³ /час	Давление воздуха, МПа	Дистанция напыления, мм
Серийный металлургический аппарат ЭМ-14, Барнаульский аппаратно-механический завод, РФ (рис. 3, а)	32–34	200–250	120–130	–	0,6–0,7	150–180
Модернизированный ЭМ-14М с двумя профилированными соплами (рис. 3, б)	32–34	200–250	120–130	–	0,6–0,7	150–180
Сверхзвуковой металлургический аппарат PLAZER15-SA-EM, установка PLAZER15-SA (рис. 1, 7)	34–36	160–180	90	4,0	0,6	70–130

Примечание:

1. Диаметр порошковых проволок 1,8 мм.
2. Для напыления применяли порошковые проволоки систем на основе Fe-B (с порошковым наполнителем на основе ферробора) и Fe-Cr-C (с порошковым наполнителем на основе феррохрома углеродистого).

Влияние типов электродуговых металлизаторов на характеристики процесса напыления покрытий из порошковой проволоки системы Fe-B и Fe-Cr-C

Тип электродугового оборудования	Скорость напыляемых частиц, W_p , м/с на дистанции 50 мм	Средний размер напыляемой частицы d_p , мкм	Размер пятна напыления B_1 , мм на дистанции 65 мм	Массовое содержание кислорода в покрытии, %
Серийный металллизатор ЭМ-14М, Барнаульский аппаратурно-механический завод, РФ (рис. 3, а).	30–80	150–180	45–55	1,8–2,5
Модернизированный металллизатор ЭМ-14М с двумя профилированными соплами (рис. 3, б).	100–160	80–120	30–40	0,73–1,0
Сверхзвуковой металллизатор, установка PLAZER15-SA (рис. 1, 7).	370–400	40–90	20–30	0,50–0,65

шение размера частиц напыляемого материала порошковых проволок, уменьшения размера пятна напыления, а также значительное понижение окисления напыляемого материала. Для сравнительных испытаний применяли серийный металллизатор ЭМ-14 (рис. 3, а), а также этот металллизатор после модернизации (рис. 3, б), оборудованный специальными соплами для формирования воздушного потока, который обеспечивает сжатие распыляемой струи, повышение ее скорости и уменьшение окисления материала.

Такое улучшение практически всех технологических параметров сверхзвукового электродугового напыления объясняется уменьшением (в случае применения такой технологии), массы жидкого металла, образуемого на торце порошковой проволоки, и, соответственно, уменьшения размеров

частиц напыляемого материала. Повышение дисперсности частиц напыляемого материала приводит к увеличению их скорости и интенсификации динамического взаимодействия с основой, уменьшению пористости покрытия, уменьшению размеров напыленных ламелей и, соответственно, увеличению скорости охлаждения расплавленных частиц на основе и увеличению количества быстроохлажденных метастабильных структур в покрытии.

Анализ выражения (1) [11] показывает, что при одинаковом значении сварочного тока, плотности материала и геометрических параметров распыляемой порошковой проволоки, ввиду наличия двух источников нагрева при сверхзвуковом электродуговом напылении (электрической дуги и высокотемпературного потока продуктов сгорания углеводородного газа), а также более эффективной кон-

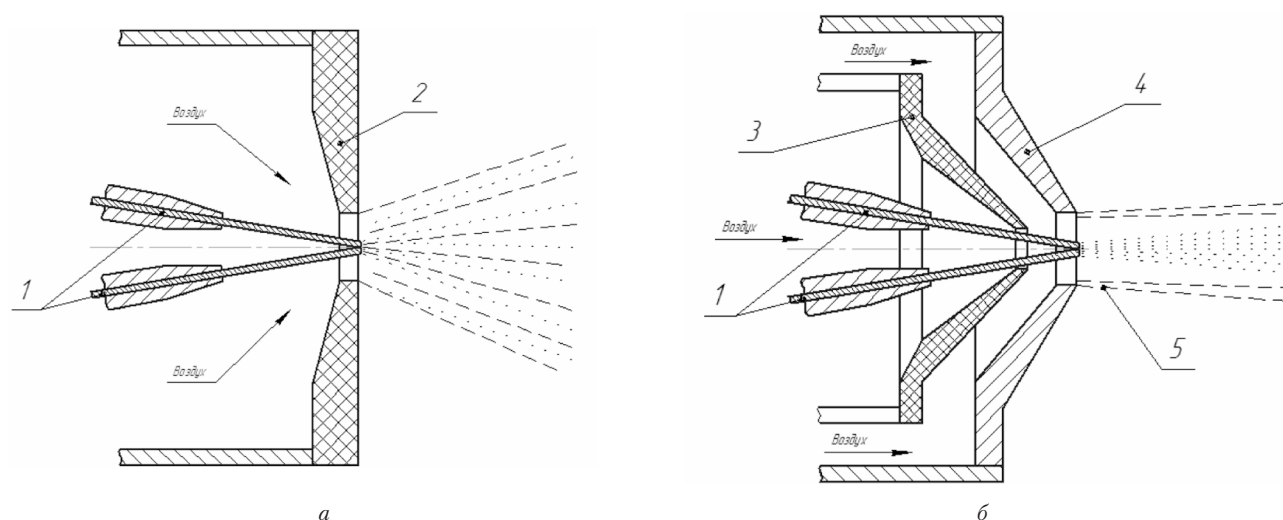


Рис. 3. Принципиальные схемы серийного ЭМ-14 (а) и модернизированного ЭМ-14 (б) электродуговых металллизаторов, применяемых для сравнительных исследований процесса напыления и характеристик покрытий:

1 – порошковая проволока; 2 – стандартное сопло, 3 – профилированное керамическое сопло; 4 – дополнительное сопло для формирования спутного воздушного потока; 5 – спутный воздушный поток

струкции металлатора, с точки зрения плавления порошковых проволок, обеспечивается более высокая скорость плавления электродов, частота сбросов жидкого металла и уменьшения массы расплавленного металла на торце проволоки.

$$m_{ж.м.}^{zm} = \frac{AI_d^2 \gamma V_3^2 \left(1 + 2,3 \lg \frac{r_3}{4\delta \sin \frac{\omega}{2}} \right) \left(\frac{M}{\gamma} \right)^{2/3}}{12,6 f^2 (1,5T_{кип} - T_{ж.м.}) \sin^2 \left(\arctg \frac{2V_3 \sin \omega}{fd_3} \right)} \quad (1)$$

где I_d — ток дуги, γ — плотность металла электрода, V_3 — скорость плавления (подачи) электрода, ω — угол между электродами, M — молекулярный вес материала электрода, f — частота сбросов жидкого металла, $T_{кип}$ — температура кипения металла электрода, $T_{ж.м.}$ — температура жидкого металла электрода, d_3 , r_3 — диаметр и радиус распыленных электродов, δ — толщина оболочки порошкового электрода, A — коэффициент, равный $0,005 \text{ Н/А}^2$.

Экспериментальные данные (табл. 2) подтверждают результаты теоретического анализа.

Разработка экономнолегированных порошковых проволок для сверхзвукового электродугового напыления износостойких покрытий

В качестве материала для напыления использовали экономнолегированную порошковую проволоку на основе системы Fe-Cr-C, в которой основным компонентом порошкового сердечника является феррохром углеродистый. При выборе состава данной порошковой проволоки основывались на дальнейшем развитии подходов к легированию порошковых проволок для металлизации [6, 11], которые предусматривают такой выбор компонентов порошкового наполнителя, обеспечивающего формирования напыленного покрытия по составу, близкого к хромистым сталям с содержанием 1–2% С и 4–10% Cr, обладающих склонностью к закаливанию из жидкого состояния и, в результате, повышенной износостойкостью. Так как покрытия узлов трения деталей подвижного состава железнодорожного транспорта работают при повышенных динамических нагрузках, к ним предъявляются повышенные требования к прочности сцепления. Поэтому, при разработке состава порошковых проволок для нанесения покрытий на указанные типы деталей, с учетом особенностей технологии сверхзвукового электродугового напыления, применяли следующие приемы для повышения прочности сцепления таких покрытий с основой:

- повышение температуры распыляемых частиц за счет алюмотермических реакций, которые обеспечиваются путем введения добавок смеси гемати-

та и алюминия ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe} + \text{Q}$). В результате такой реакции повышается температура напыляемых частиц, а в покрытии образуются упрочняющая фаза оксида алюминия;

- восстановление окислов железа, образующихся в процессе расплавления и диспергации оболочки и шихты порошковой проволоки, путем введения в шихту алюмосодержащих добавок и лигатур с мисметаллами, с протеканием экзотермических реакций;

- повышение температуры дуги и уменьшение размера столба дуги за счет введения оптимальных количеств добавок галогенидов щелочных металлов.

Повышение температуры распыляемых частиц и увеличение их дисперсности очень важно именно при применении напыления при сверхзвуковых скоростях истечения струи, так как в этом случае существенно снижается время пребывания расплавленной капли на торце проволок в высокотемпературной зоне электродугового участка, по сравнению с традиционными технологиями напыления с применением низкоскоростных (дозвуковых струй). Также при этом достигается создание прочных металлургических связей между напыляемыми частицами и металлической основой за счет активизации химического взаимодействия между ними и основой и получением твердых и прочных окислов.

Так как в зависимости от типов деталей подвижного состава железнодорожного транспорта требуются различные показатели твердости, разработана линейка составов порошковых проволок ПП-АН202-S для обеспечения различной твердости и триботехнических характеристик. Обязательным условием являлось получение в результате сверхзвукового электродугового напыления такой порошковой проволоки сплава, обладающего склонностью к закаливанию из жидкого состояния, и получения покрытия по составу, близкого к хромистым сталям с содержанием 1–2% С и 4–10% Cr, содержащим метастабильные закалочные структуры на основе пересыщенных растворов.

Расчет соотношения концентраций элементов в напыленном слое и концентраций компонентов порошковой шихты выполняли на основе решения системы уравнений [11]:

$$A_a = \frac{\eta_a}{100} (x_1 k_1^{(a)} + x_2 k_2^{(a)} + \dots + x_n k_n^{(a)}) k_3$$

$$A_i = \frac{\eta_i}{100} (x_1 k_1^{(i)} + x_2 k_2^{(i)} + \dots + x_n k_n^{(i)}) k_3$$

где a, \dots, i — легирующие элементы, η_a, η_i — коэффициенты перехода этих элементов, x, \dots, x_n — долевое участие материалов (ферромарганца, феррохрома, алюминия металлического и др.), $k_1^{(a)} \dots k_n^{(a)}, k_1^{(i)} \dots k_n^{(i)}$ — концентрация элементов в соответствующих материалах, вводимых в шихту порошкового стержня, k_3 — коэффициент заполнения ($k_3 = 0, 15, \dots, 0,45$).

Исследовали химический состав и микроструктуру исходной порошковой проволоки (ПП) системы Fe-Cr-C и покрытий, полученных методом электродугового напыления с использованием дозвуковых и сверхзвуковой струй. Для изготовления оболочки данной ПП применяли стальную ленту 08кп. Основными наполнителями порошковой шихты являлись феррохром высокоуглеродистый ФХ900 и железный порошок с добавками ферромарганца. В качестве экзотермических добавок применяли ПЖР5.315.28 гематит МРТУ 14-14р-84, порошок алюминиевый ПА-3с размером частиц до 150 мкм. Микроструктура и состав данной ПП и порошкового наполнителя представлена на рис. 4.

Анализ результатов металлографических исследований покрытий показал, что микроструктура при дозвуковых скоростях истечения воздуха неоднородная, крупнозернистая, с большим количеством пор и оксидных включений. Материал покрытия перегрет и окислен, оксидные прослойки содержат 29,0%–32,0% кислорода, массовая доля

кислорода в ламелях достигает 2,5%. Также наблюдаются частицы сферической формы, которые из-за низкой скорости полета, успели остыть до их столкновения с напыляемой поверхностью (рис. 5, а). Покрытие, полученное при использовании модернизированной базовой установки с применением дополнительного воздушного потока и регулируемым углом раскрытия потока частиц, менее окислено. В ламелях и оксидных прослойках массовая доля кислорода составляет соответственно 1,6%–1,8% и 29,0%–30,0%. Толщина ламелей (δ_p) для этих покрытий такая же, как и при обычных дозвуковых режимах и равняется 10...30 мкм (рис. 5, б), пористость покрытий составляет 2–3%. При переходе к сверхзвуковому воздушно-газовому методу ЭДМ, с увеличением скорости струи воздуха возрастает скорость полета частиц, и микроструктура полученного покрытия претерпевает значительные изменения. Сочетание малого размера напыляемых частиц и их высоких скоростей в момент удара о поверхность основы приводит к высоким скоро-

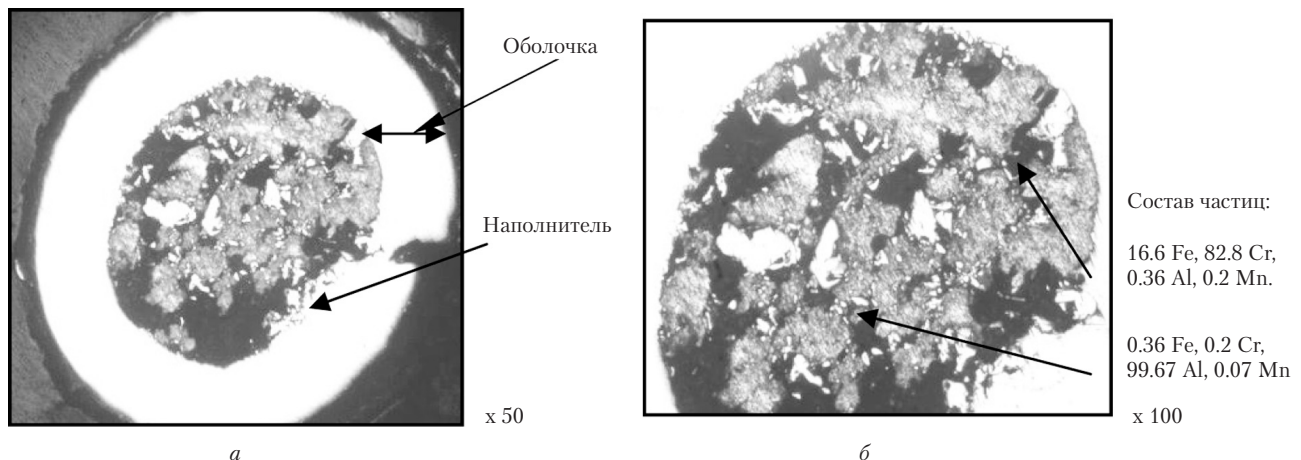


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения проволоки ПП-АН202-S

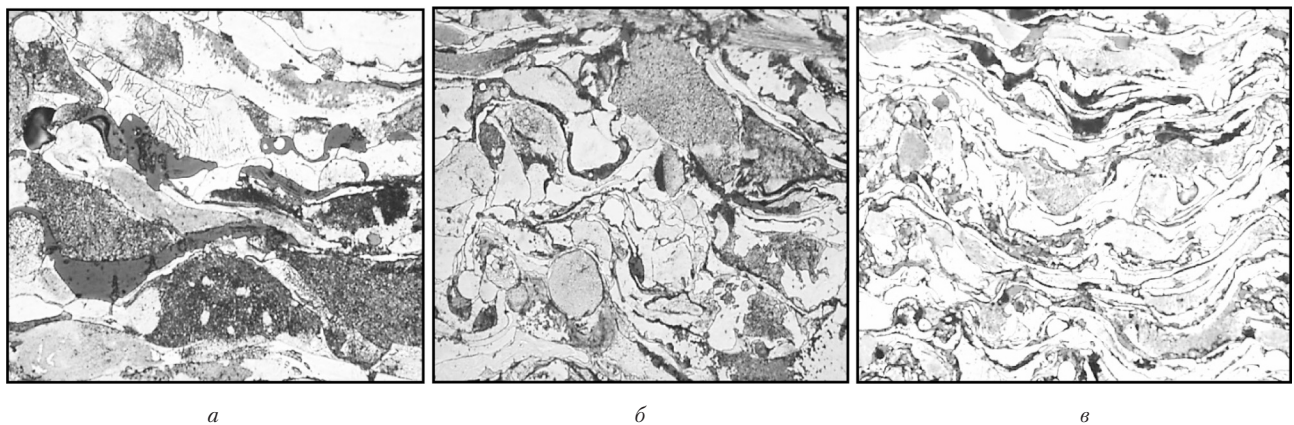


Рис. 5. Микроструктура покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al, полученных различными методами электродуговой металлизации:

а – обычное напыление с помощью электродугового металлизатора ЭМ-14М; б – модернизированное напыление ЭМ-14М; в – сверхзвуковое напыление PLAZER15-SA-EM, x400

стям охлаждения их материала. В основном, частицы имеют ламелеобразную форму и подвергаются значительной деформации. Включения глобулярных частиц не наблюдаются. Отмечаются тонкие оксидные прослойки. По всей толщине покрытия имеют однородную тонколамельную структуру, что говорит о стабильности процесса. В покрытиях, нанесенных при сверхзвуковом воздушно-газовом напылении, значения δ_p находятся в интервале 5...10 мкм (рис. 5, в). Пористость структуры снижается и составляет 0,4%.

Анализ результатов рентгеноспектрального микроанализа и дифрактограмм покрытий показал, что все исследуемые покрытия, полученные методами обычной дуговой электродуговой металлизации, модернизированной и сверхзвуковой электродуговой металлизации содержат твердый раствор Al и Cr в альфа-железе (объемноцентрированная кубическая решетка с $a = 0,287$ нм), и твердые растворы Al и Cr в гамма-железе с гранцентрированной кубической решеткой и различным содержанием этих элементов. По данным рентгеноспектрального микроанализа при обычной дуговой и модернизированной металлизации в покрытиях преобладает твердый раствор хрома с алюминием в α -железе, а в случае сверхзвуковой ЭДМ в покрытии основной фазой является γ -фаза. При сверхзвуковой электродуговой металлизации модернизированной электродуговой металлизации фазовая составляющая гамма-железо с измененными параметрами существует в двух модификациях, а именно: $\gamma_1\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Al})$ с $a = 0,3677$ нм и $\gamma_2\text{Fe}(\text{Cr}, \text{Al})$ с $a = 0,3633$ нм [12].

Разница в значениях параметров решетки $\gamma_1\text{Fe}$ и $\gamma_2\text{Fe}$ свидетельствует о разном содержании легирующих элементов. Установлено, что максимальная концентрация хрома в твердом растворе на основе железа в ламелях покрытий, полученных при обычном и модернизированном напылении, составляет 16,8%–17,1% и 15,0%–15,4 мас.% соответственно, в тех же условиях содержание алюминия составляет примерно от 4% до 6,2%. Кроме этого в процессе напыления алюминий взаимодействует с кислородом, образуются включения на основе Al_2O_3 содержащие 35,0–39,0 мас.% алюминия и 29,0–32,0 мас.% кислорода [12]. При использовании сверхзвуковых струй турбулентный режим истечения струй переходит в ламинарный, в связи с чем уменьшается подмешивание воздуха, и одновременно, за счет возрастания скорости газовой струи увеличивается скорость частиц. При сверхзвуковом напылении количество хрома и алюминия, растворенных в железе возрастает, максимальная концентрация хрома в ламелях достигает 20,0–20,5 мас.%. Твердый раствор такой концентрации обладает большим сопротивлением окислению кислородом воздуха. Степень окисления напыленного покрытия значительно уменьшается. В

ламелях содержится около 1,0% кислорода. Более детальные результаты исследований структуры данных типов покрытий приведены в [12].

Сравнение значений микротвердости покрытий из порошковой проволоки, напыленных разными способами показывает, что микротвердость покрытия, полученного при обычной электродуговой металлизации, изменяется в пределах от 1930 до 4200 МПа, микротвердость покрытия, полученного на модернизированной установке, изменяется в пределах от 2540 МПа до 5100 МПа. Максимальную микротвердость имеют сверхзвуковые покрытия, где диапазон значений находится в пределах 3900..6100 МПа, что может быть связано с увеличением содержания хрома в твердом растворе на основе железа.

Для сравнительной оценки прочности сцепления покрытий с основой использовали величину разрушающего напряжения в композиции «покрытие – основа сталь 45» при нормальном отрыве, определенную по методике «конического штифта». Результаты испытаний подтверждают эффективность применения технологии сверхзвукового электродугового напыления и повышение почти в 2 раза значений прочности сцепления покрытий с основой, по сравнению с традиционной технологией (рис. 6).

Триботехнические испытания рассматриваемых покрытий проводили в условиях с ограниченной смазкой по схемам «диск с покрытием – колодка (контртело – чугун СЧ-20 и сталь 40Х, $P = 10$ МПа, $V = 1$ м/с, масло НС20, 30 капель/мин). Установлено, что технология электродугового напыления существенно влияет на интенсивность изнашива-

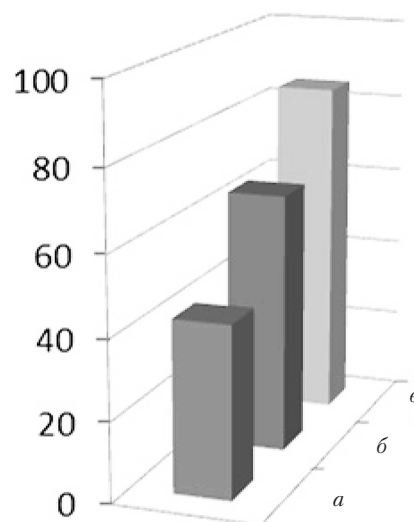


Рис. 6. Прочность сцепления с основой из стали 45 покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al марки ПП-АН202-S, полученных различными методами электродуговой металлизации:

а – обычное напыление с помощью электродугового металлизатора ЭМ-14М; б – модернизированное напыление ЭМ-14М; в – сверхзвуковое напыление PLAZER15-SA-EM

ния покрытий их порошковой проволоки на основе Fe-Cr-C марки ПП-АН202-S. Значения интенсивности изнашивания покрытий нанесенных сверхзвуковым электродуговым напылением с помощью электродугового металлатора PLAZER15-SA-EM составят 3,1 мкм/км, в то время, как этот показатель для покрытий, нанесенных с помощью модернизированного электродугового металлатора ЭМ-14 составляет 4,3 мкм/км, а для серийного металлатора ЭМ-14 составляет 7,8 мкм/км. Т.е., применение технологии сверхзвукового электродугового напыления позволяет повысить износостойкость покрытий более, чем в 2,5 раз. Вместе с тем, все исследуемые покрытия превосходят по износостойкости Ст 20, значения износа которой составляют около 10 мкм/км.

Применение

Базируясь на технологических исследованиях и опыте сверхзвуковой электродуговой металлации, разработанная технология и порошковой проволоки на основе Fe-Cr-C марки ПП-АН202-S применены для восстановления тяжело нагруженных коленвалов локомотивных дизелей 12VFE 17/24 поездов Д1 венгерского производства. С применением усовершенствованного сверхзвукового электродугового металлатора PLAZER15-SA-EM (рис. 7, а) в 2012–2013 гг. проведена модернизация технологического участка для электродугового напыления коленвалов локомотивных дизелей 12VFE 17/24 в Локомотивном депо г. Илловайск. В результате эксплуатации восстановленных локомотивных коленчатых валов данных марок установлено, какие-либо технические дефекты покрытия и валов не зафиксированы, а срок службы восстановленных шеек коленвалов больше новых в два раза. Причём, важным является то обстоятельство, что в экстремальных и аварийных ситуациях (прекраще-

ние подачи масла, наличие абразивных частиц) покрытие проявляет большую живучесть в сравнении с основным материалом коленвала.

Также на основе данной разработки в 2013 г. в Локомотивном депо г. Коростень организован технологический участок сверхзвукового электродугового напыления осей колесных пар железнодорожного транспорта. Показано, что применение разработанной технологии и оборудования сверхзвукового электродугового напыления покрытий на шейки и подступичные части осей колесных пар грузовых вагоном, одновременно с применением для напыления экономнолегированной порошковой проволоки на основе Fe-Cr-C марки ПП-АН202-S, позволяет получать большую поверхностную твердость и большую глубину упрочненного слоя, по сравнению с требованиями нормативной документации.

Выводы

1. Повышение качества износостойких покрытий для ответственных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта путем применения разработанной технологии сверхзвукового электродугового напыления достигнуто за счет следующих новых технических решений:

1.1. Применение усовершенствованной конструкции сверхзвукового электродугового металлатора PLAZER15-SA-EM, реализующий гибридный процесс, в котором сочетается электродуговое напыление со сверхзвуковым газопламенным напылением с формированием единого сверхзвукового высокотемпературного потока газа и обдува стабилизированной электрической дуги этими горячими продуктами сгорания природного газа;

1.2. Применение специальной порошковой проволоки на основе системы Fe-Cr-C марки ПП-АН202-S, разработанной для сверхзвукового электродугового напыления, с системой легирова-

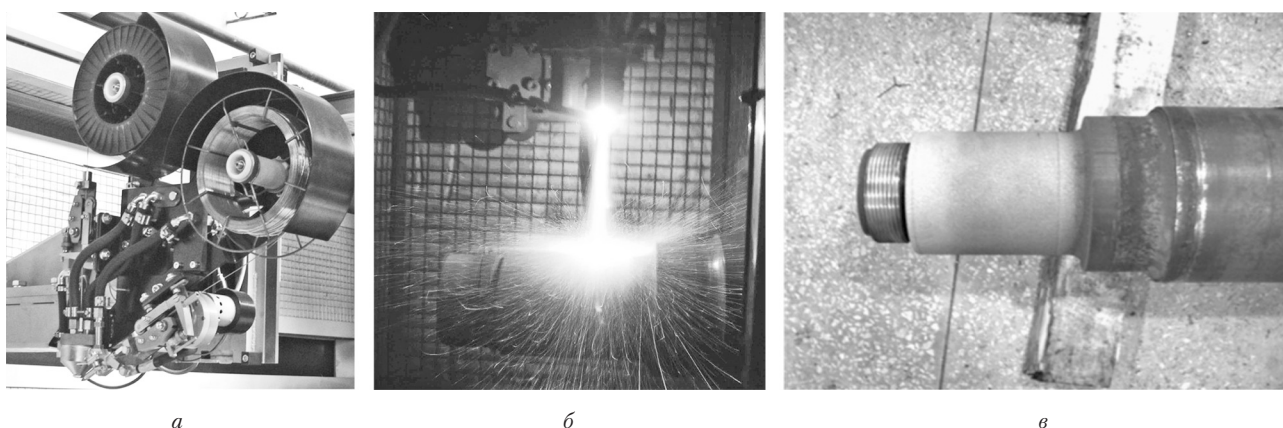


Рис. 7. Внешний вид блока машинного сверхзвукового металлатора PLAZER15-SA EM установки PLAZER15-SA (а), процесс напыления с его помощью износостойких покрытий из порошковых проволок на основе Fe-Cr-C на шейки осей колесных пар железнодорожного транспорта (б, в)

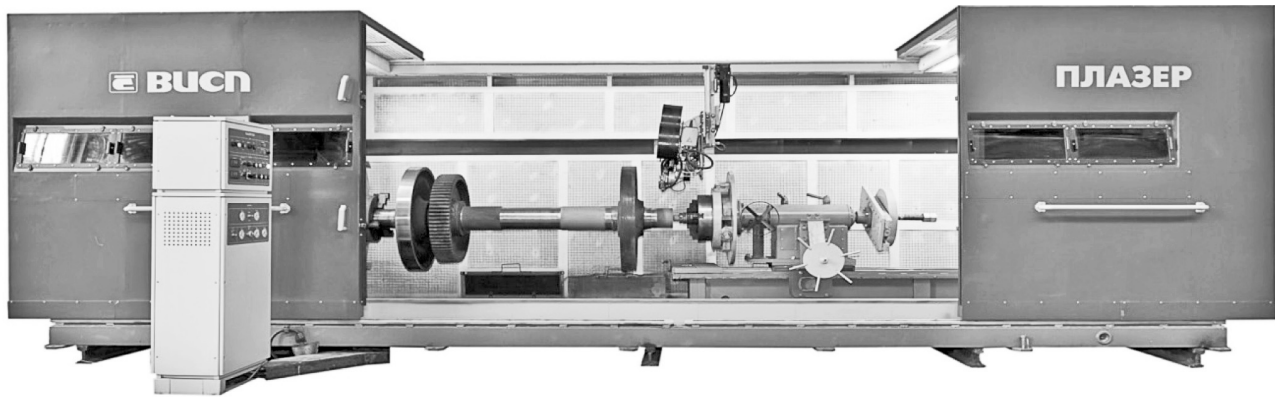


Рис. 8. Внешний вид технологического комплекса для сверхзвукового электродугового напыления износостойких покрытий на шейки осей колесных пар в Локомотивном депо Коростень (Украина)

ния, обеспечивающей формирование напыленного покрытия по составу, близкого к хромистым сталям с содержанием 1–2% С и 4–10% Cr, которые обладают склонностью к закаливанию из жидкого состояния. При этом данные порошковые проволоки включают добавки, реализующие ряд эффектов и обеспечивающие повышение прочности сцепления напыленных покрытий с основой, а именно:

- повышение температуры распыляемых частиц за счет алюмотермических реакций, которые обеспечиваются путем введения добавок смеси гематита и алюминия ($\text{Fe}_2\text{O}_3 + \text{Al} = \text{Al}_2\text{O}_3 + \text{Fe} + \text{Q}$). В результате такой реакции повышается температура напыляемых частиц, а в покрытии образуются упрочняющая фаза оксида алюминия;

- восстановление окислов железа, образующихся в процессе расплавления и диспергации оболочки и шихты порошковой проволоки, путем введения в шихту алюмосодержащих добавок и лигатур с мисметаллами, с протеканием экзотермических реакций;

- повышение температуры дуги и уменьшение размера столба дуги за счет введения оптимальных количеств добавок галогенидов щелочных металлов.

2. Покрытия, полученные по разработанной технологии сверхзвукового электродугового напыления с применением порошковой проволоки на основе системы Fe-Cr-C марки ПП-АН202-S имеют структуру с содержанием аустенита до 80% мас. Упрочнение покрытий обеспечивается формированием пересыщенного твердого раствора железа с повышенным содержанием хрома до 20,5 мас.% и алюминия до 6,2 мас.%. Микротвердость покрытия превышает, примерно, на 30–50% микротвердость электродуговых покрытий из этой же проволоки, полученных по традиционной дозвуковой технологии, в 2–3 раза уменьшается окисление напыляемого материала, пористость снижается в 3–5 раза. Прочность сцепления стальных покрытий из стальной основой по сравнению с серийными металлизаторами увеличивается с 25–30 МПа до 80 МПа, пористость покрытий снижается с 15–20% до 0,5–

3%, окисляемость материала покрытия снижается в 2 раза. Также технология сверхзвукового электродугового напыления, по сравнению с традиционными методами ЭДМ, позволяет повысить износостойкость покрытий более, чем в 2,5 раз.

3. Разработанная технология, оборудование и материалы применены для повышения качества покрытий для восстановления ответственных деталей подвижного состава железнодорожного транспорта при модернизации технологического участка электродугового напыления коленвалов локомотивных дизелей 12VFE 17/24 в Локомотивном депо г. Илловайск в 2012–2013 гг., а также при организации технологического участка сверхзвукового электродугового напыления осей колесных пар железнодорожного транспорта в Локомотивном депо г. Коростень в 2013 г.

Примечание: Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР №.WQ20124400119 (Chinese Program of Foreign Experts No.WQ20124400119), Программы инновационной группы провинции Гуандун, КНР № 201101C0104901263 (Guangdong Innovative Research Team Program No.201101C0104901263, China), проекта Гуандунской ключевой лаборатории современной технологии сварки № 2012A061400011, КНР (Project of Guangdong Provincial Key Laboratory No. 2012A061400011, China).

Литература

- [1] Восстановление шеек колесных пар металлизацией. В.П. Кузьмин и др.//Ж.д. транспорт, 2002, – 31, С. 46-49.
- [2] Кузьмин В.П. Восстановление шеек осей колесных вагонных пар электродуговой металлизацией. Вестник ВНИИЖТ. №1, 2201, – С 46.
- [3] Коржик В. Н., Кривцун И. В., Петров С. В., Харламов М. Ю. Новая технология «Плазер» реновации деталей для железных дорог // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009, № 1. – С. 20-22.
- [4] Технология и оборудование для плазменно-дугового напыления для восстановления ответственных дета-

- лей железнодорожного транспорта / Коржик В.Н., Харламов М.Ю., Петров С.В. и др. // Вестник Восточноукр. национ. ун-та им. В. Даля. 2001, №14, С 76-84.
- [5] В.И.Зеленин, П.В.Кавуненко, В.В.Тисенко и др. Пролонгация срока службы осей РУ1 и РУ1Ш колесных пар грузовых вагонов, восстановленных методом плазменно-дуговой металлизации шеек и подступных частей. Автоматическая сварка, 2019, №9, с. 39-43.
- [6] Похмурский В.И., Студент М.М., Довгуньк В.М., Сидорак И.И., Кусков Ю.М., Рябцев И.А.. Структура и триботехнические характеристики покрытий, полученных электродуговой металлизацией с использованием порошковых проволок// Автоматическая сварка. — 2003. — №8. — С.13-17.
- [7] Борисов Ю.С., Петров С.В. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления // Автоматическая сварка. 1995. №1. С.41-44.
- [8] Фролов В.А., Поклад В.А., Рябенко Б.В., Викторенков Д.В. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (обзор) // Сварочное производство. — 2006. — №11. — С. 38-47.
- [9] Петров С.В., Карп И.Н. Плазменное газозвуковое напыление.—Киев: Наук.думка, 1993. — 495 с.
- [10] Петров С.В., Коржик В.Н. Установка электродугового сверхзвукового напыления PLAZER15-SA / Сварщик, 2011, №1, с.17-21.
- [11] Роянов В.А. Теоретические основы создания и промышленное освоение экономнолегированных порошковых проволок для электродугового напыления износостойких покрытий с улучшенными эксплуатационными свойствами. Автореферат диссертации на соискание ученой степени д.т.н. Минск, БПИ, 38 стр.
- [12] Коржик В.Н., А. Л. Борисова, Г. Н. Гордань, Н. П. Лютик, А. А. Чайка, Т. В. Кайда. Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe—Cr—Al, полученных в условиях сверхзвуковой электродуговой металлизации / «Автоматическая сварка», 2014, № 2, с.33-38.

Korzhyk V. N.^{1,2}, Lutik N. P.², Chaika A. A.², Tkachuk V. I.^{2,3}, Gos I. D.², Petrov S. V.², Ermakov A. S.³, Nikituk Yu. A.⁴

¹ Guangdong Welding Institute (China-Ukraine E. O. Paton Institute of Welding). China, Guangzhou

² E. O. Paton Electric Welding Institute of National Academy of Sciences of Ukraine. Ukraine, Kiev

³ Scientific and Production Center «PLAZER», Ltd. Ukraine, Kiev

⁴ Scientific and Production Firm «VISP», Ltd. Ukraine, Kiev

OPTIMIZATION OF ELECTRIC ARC SPRAYING TECHNOLOGY FOR RESTORATION AND RENOVATION OF CRITICAL PARTS AND COMPONENTS OF RAIL TRANSPORT

Improving the quality of wear-resistant coatings for critical parts of railway vehicles achieved through the application of the developed supersonic arc spraying technology, implementing a hybrid process which combines electric arc spraying with a supersonic flame spraying to form a single supersonic high-temperature gas flow and molten particles of sprayed material.

Coatings produced by the developed technology using cored wire based on Fe-Cr-C system have structure containing austenite up to 80% by weight. Hardening of the coatings is provided by the formation of supersaturated solid solution of iron with a high chromium content up to 20.5 wt.% and aluminum up to 6.2 wt.%. The microhardness of the coating is greater on 30–50% than microhardness of electric-arc coatings of the same wire, obtained by conventional subsonic technology, in 2–3 times reduces oxidation of the sprayed material, porosity decreases in 3–5 times. The strength of adhesion of coating of steel base compared to serial metallizer increases from 25–30 MPa up to 80 MPa, coating porosity is reduced from 15–20% down to 0.5–3%, oxidation of the coating material is reduced by 2 times. In addition, supersonic arc spraying technology, compared to conventional EDM methods allows to improve wear resistance of coating by more than 2.5 times.

Keywords: electric arc spraying; supersonic method; coating; microstructure; phase composition; microhardness.

References

- [1] Recovery of the necks of wheelsets by metallization. V.P. Kuzmin and others. // Railways. Transportation, 2002, -31, P. 46-49.

- [2] Kuzmin V.P. Restoring necks axles wagon wheel pairs electric plating. Bulletin VNIIZhT. No.1, 2201 - 46.
- [3] Korzhyk V.N., Krivtsun I.V., Petpov S.V., Haplamov M. Yu. New technology «Plazer» Renovation of parts for railway / // repair, restoration, modernization. - 2009, No. 1. - P. 20-22.
- [4] Technology and Equipment for plasma-arc spraying to restore critical parts of railway transport / Korzhyk V.N., Kharlamov M.Yu., Petrov S.V. et al. // Bulletin EastUkr. National Univ. by Dal. 2001, No.14, P 76-84.
- [5] V.I.Zelenin, P.V.Kavunenko, V.V.Tisenko et al. Extension of the axes PY1 and PY1III wheelsets wagons restored by plasma-arc metallization of necks and parts. Automatic welding, 2019, No.9, p. 39-43.
- [6] Pohmursky V.I., Student M.M., Dovgunyk V.M., Sidorak I.I., Kuskov Y.M., Ryabtsev I.A. Structure and tribological characteristics of coatings produced by arc metallization using powder // Automatic welding wires. - 2003. –No.8. - P.13-17.
- [7] Borisov Y.S., Petrov S.V. The use of supersonic jets in thermal spraying technology // Automatic Welding. 1995. No.1. P.41-44.
- [8] Frolov V.A., Poklad V.A., Ryabenko B.V., Viktorenkov D,V . Technological features of the supersonic thermal spraying methods (review) // Welding production. - 2006. – No.11. - P. 38-47.
- [9] Petrov S.V., Carp I.N. Plasma-gas spraying. Kiev: Nauk.dumka, 1993. - 495 p.
- [10] Petrov S.V, Korzhyk V.N. Installation for supersonic arc spraying PLAZER15-SA / Welder 2011, No.1, p.17-21.
- [11] Royan V.A. Theoretical bases of creation and industrial development of economically cored wire for electric arc spraying of wear-resistant coatings with improved performance characteristics. Abstract of dissertation for the degree of Doctor of Science Minsk, BPI, 38 p.
- [12] Korzhyk V.N, Borisova A.L., Gordan G.N., Lutik N.P., Chaika A.A., Caida T.V. Features of the structure of the coating flux cored wire system Fe-Cr-Al, obtained under the conditions of a supersonic electric plating / «Automated welding», 2014, No 2, p.33-38.