

## СВЕРХЗВУКОВОЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОЕ НАПЫЛЕНИЕ ОТВЕТСТВЕННЫХ ДЕТАЛЕЙ ПОДВИЖНОГО СОСТАВА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА\*

В. Н. КОРЖИК<sup>1,2</sup>, Н. П. ЛЮТИК<sup>2</sup>, А. А. ЧАЙКА<sup>2</sup>, В. И. ТКАЧУК<sup>2,3</sup>, И. Д. ГОС<sup>2</sup>, Ю. А. НИКИТЮК<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Гуандунский Институт сварки (Китайско-украинский Институт сварки им. Е. О. Патона).

510650, г. Гуанчжоу, КНР. E-mail: vnkorzhyk@qq.com

<sup>2</sup>ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua,

<sup>3</sup>ТОВ «Научно-производственный центр «ПЛАЗЕР».

01042, г. Киев, ул. Филатова, 10-А. E-mail: plazer2010@meta.ua

<sup>4</sup>ТОВ «Научно-производственная фирма «ВИСП». 04655, г. Киев, просп. Московский, 23. E-mail: vizp@i.ua

Для повышения эффективности использования железнодорожного транспорта возрастает потребность в новых технологиях и материалах для повышения его ресурса, в первую очередь ответственных деталей подвижного состава. В этом аспекте одной из наиболее перспективных технологий является сверхзвуковое электродуговое напыление или сверхзвуковая воздушно-газовая электродуговая металлизация. При этом преодолеваются основные недостатки традиционного электродугового напыления, связанные с низким качеством покрытий, а именно, повышенным выгоранием легирующих элементов расплавленного металла проволок под действием струи воздуха, низкой адгезионной прочностью покрытия и низкой прочностью сцепления с материалом основы. Библиогр. 12, табл. 2, рис. 8.

*Ключевые слова:* сверхзвуковое электродуговое напыление, железнодорожный транспорт, ответственные узлы, свойства покрытий, прочность сцепления покрытий

Для реализации технологии сверхзвукового электродугового напыления разработан усовершенствованный сверхзвуковой электродуговой металлизатор PLAZER15-SA-EM установки PLAZER15-SA [1–10], 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.

Данная технология является гибридной, в которой сочетается электродуговое напыление со сверхзвуковым газопламенным напылением с формированием единого сверхзвукового высокотемпературного потока газа и расплавленных частиц напыляемого материала проволок. 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 измельчение 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 слабонедорасширенная 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 рис. 2 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  $\alpha = 0,9$  (рис. 2, б) в отличие от обедненной смеси  $\alpha \sim 1,2$  (рис. 2, а) поток за боковой проволокой сходится. Рассеяние дисперсных частиц в высокоскоростном потоке определяется направлением вектора усредненной скорости вдоль траектории частиц и параметрами турбулентности. Направление вектора усред-

\*По материалам работы, выполненной в рамках целевой комплексной программы НАН Украины «Проблеми ресурсу і безпеки експлуатації конструкцій, споруд та машин» (2013–2015 гг.).

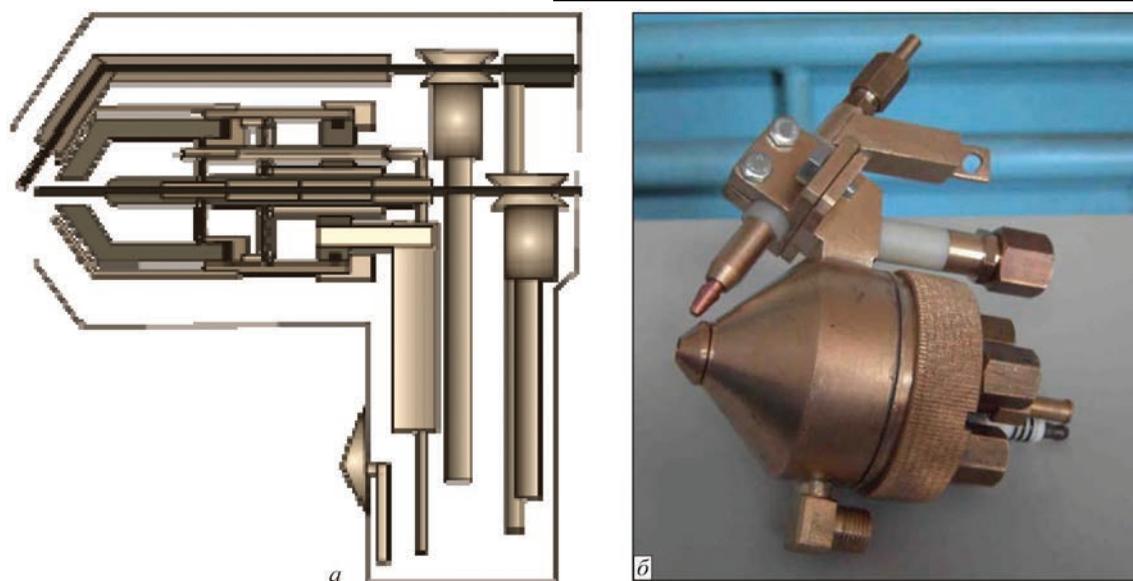


Рис. 1. Схема (а) и общий вид (б) сверхзвукового электродугового металлатора

ненной 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, сформированная за боковым электродом металлатора (см. рис. 1) газодинамическая ситуация (см. рис. 2) определяет характер сноса, дробления расплава проволок и рассеивания дисперсной фазы. В теневой зоне бокового электрода, равной 2,5...3,0 калибра от среза сопла, имеет место струйное течение металла. Далее ниже по потоку происходит аэродинамическое дробление рас-

плава и разгон дисперсных частиц. Это особенно важно при использовании порошковых проволок, когда получение легированных частиц происходит при взаимодействии оболочки из низкоуглеродистой стали с компонентами порошкового стержня. Легирование 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 обжатие металлопотока, способствует снижению рассеивания дисперсной фазы. Угол раскрытия составляет  $7...10^\circ$ .

Как известно, одним из существенных недостатков покрытий, получаемых электродуговой металлацией, является высокая степень их

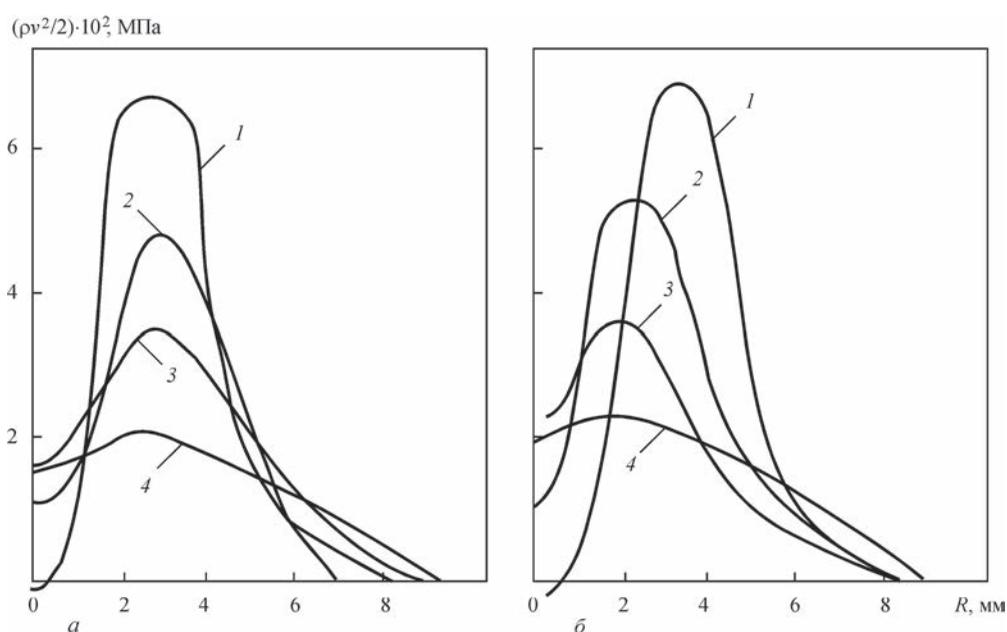


Рис. 2. Профили динамического нажатия сверхзвукового металлатора на расстоянии от среза сопла: а —  $\alpha = 1,2$ ; б —  $0,9$  (1 — 2; 2 — 7; 3 — 12; 4 — 22 мм)

Таблица 1. Режимы напыления покрытий из порошковых проволок с применением различных типов электродуговых металлизаторов

Тип электродугового оборудования	Напряжение, В	Сила тока, А	Расход воздуха, м <sup>3</sup> /ч	Расход пропана, м <sup>3</sup> /ч	Давление воздуха, МПа	Дистанция напыления, мм
Серийный металлизатор 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 металлизатор PLAZER15-SA-EM, установка PLAZER15-SA (рис. 1)	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 (на основе феррохрома углеродистого).

Таблица 2. 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 $w$ , м/с на дистанции 50 мм	Средний размер напыляемой частицы $d$ , мкм	Размер пятна напыления $B_1$ , мм на дистанции 65 мм	Содержание кислорода в покрытии, мас. %
Серийный металлизатор ЭМ-14М (Барнаульский аппаратно-механический завод, РФ (рис. 3, а))	30...80	150...180	45...55	1,8...2,5
Модернизированный металлизатор ЭМ-14М с двумя профилированными соплами (рис. 3, б)	100...160	80...120	30...40	0,73...1,0
Сверхзвуковой металлизатор, установка PLAZER15-SA (рис. 1)	370...400	40...90	20...30	0,50...0,65

окисления. Этот факт чаще всего расценивается как отрицательный. Покрытия, которые формируются окисленными частицами, характеризуются также высокой пористостью и низкой прочностью сцепления покрытия 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 «связывание» его углеводородными газами (чаще всего метаном). Для этого в распыляемый воздух подмешивают горючие газы. Перспективность применения таких газозвушных 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 газозвушной смесью, 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 удается, поскольку материал покрытия окисляется уже при охлаждении частиц с температуры плавления до температуры окружающей среды. Эксперимен-

тально полученные данные по содержанию оксидов железа в исследуемой системе в зависимости от концентрации природного газа в газозвушной смеси для металлизатора подтверждают сказанное выше.

Вторым обстоятельством, которое 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 металлизаторе (см. 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 плавления проволоки, наиболее узкий диапазон диспергирования расплава, наименьший угол раскрытия металлопотока. Такой режим работы сверхзвукового

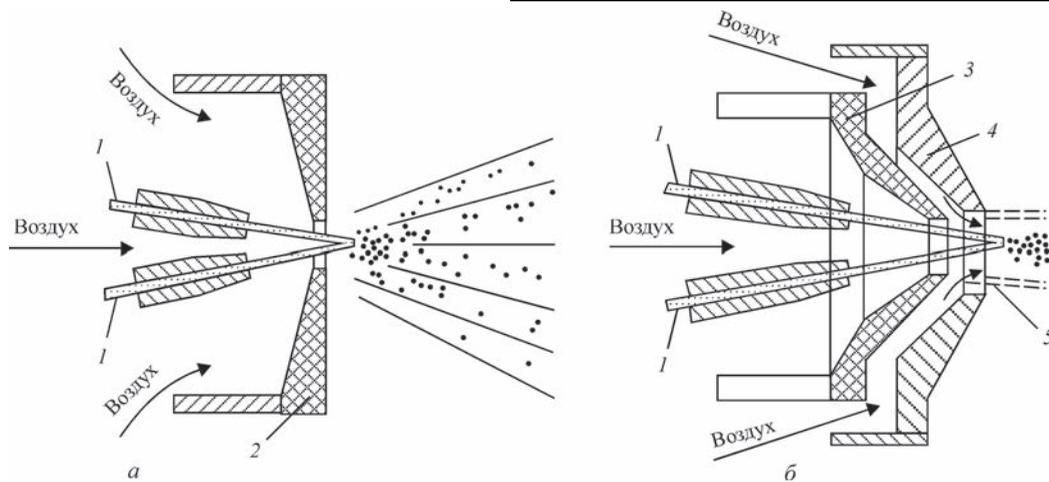


Рис. 3. Принципиальные схемы серийного ЭМ-14 (а) и модернизированного ЭМ-14 (б) электродуговых металлизаторов, применяемых для сравнительных исследований процесса напыления и характеристик покрытий: 1 — порошковая проволока; 2 — стандартное сопло; 3 — профилированное керамическое сопло; 4 — дополнительное сопло для формирования спутного воздушного потока; 5 — спутный воздушный поток

металлизатора на продуктах сгорания является оптимальным.

Сравнительные исследования процесса сверхзвукового напыления с процессами электродугового напыления при дозвуковых режимах истечения высокотемпературной струи (табл. 1, 2) подтвердили существенное повышение скорости и уменьшение размера частиц напыляемого материала порошковых проволок, уменьшение размера пятна напыления, а также значительное понижение окисления напыляемого материала. Для сравнительных испытаний применяли серийный металлизатор ЭМ-14 (рис. 3, а), а также этот металлизатор 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 быстрозакаленных 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 конструкции металлизатора, с точки зрения плавления порошковых проволок, обеспечивается более высокая скорость плавления электродов, частота сбросов жидкого металла и уменьшение массы расплавленного металла на торце проволоки.

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

где  $I_d$  — ток дуги;  $\gamma$  — плотность металла электрода;  $v_э$  — скорость плавления (подачи) электрода;  $\omega$  — угол между электродами;  $M$  — молекулярная масса материала электрода;  $f$  — частота сбросов жидкого металла;  $T_{кип}$  — температура кипения металла электрода;  $T_{ж.м}$  — температура жидкого металла электрода;  $d_э, r_э$  — диаметр и радиус расплавленных электродов;  $\delta$  — толщина оболочки порошкового электрода;  $A$  — коэффициент, равный  $0,005 \text{ Н/А}^2$ .

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

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, обеспе-

чивающего формирование напыленного покрытия по составу, близкому к хромистым сталям с содержанием 1...2 % С и 4...10 % Cr, имеющих склонность к закаливанию из жидкого состояния и, в результате, повышенную износостойкость. 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 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 образуется упрочняющая фаза оксида алюминия;

- восстановление оксидов железа, образующихся в процессе расплавления и диспергации оболочки и шихты порошковой проволоки, путем введения в шихту алюмосодержащих добавок и лигатур с мишметаллами, 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 оксидов.

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, имеющего склонность к закаливанию из жидкого состояния, и получения покрытия по составу, близкому 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]:

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

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

где  $a, \dots, i$  — легирующие элементы,  $\eta_a, \eta_i$  — 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 представлены 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 %. Толщи-



Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения проволоки ПП-АН202-S: *a* —  $\times 50$ ; *b* —  $\times 100$  (1 — состав частиц: 16,6 Fe, 82,8 Cr, 0,36 Al, 0,2 Mn; 2 — 0,36 Fe, 0,2 Cr, 99,67 Al, 0,07 Mn)

на ламелей  $\delta$  для этих покрытий такая же, как и при обычных дозвуковых режимах и составляет 10...30 мкм (рис. 5, б), пористость покрытий — 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 скоростям 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 тонколамелярную структуру, что свидетельствует о стабильности процесса. В покрытиях, нанесенных при сверхзвуковом воздушно-газовом напылении, значения  $\delta$  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 дозвуковой электродуговой металлизации, модернизированной и сверхзвуковой электродуговой металлизации содержат твердый раствор Al и Cr в  $\alpha$ -железе (объемноцентрированная кубическая решетка с  $a = 0,287$  нм), и

твердые растворы Al и Cr в  $\gamma$ -железе с гранецентрированной 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  $\alpha$ -железе, а в случае сверхзвуковой ЭДМ в покрытии основной фазой является  $\gamma$ -фаза. При сверхзвуковой электродуговой металлизации модернизированной электродуговой металлизации фазовая составляющая  $\gamma$ -железа с измененными параметрами существует в двух модификациях, а именно:  $\gamma_1$ -Fe (Cr, Al) с  $a = 0,3677$  нм и  $\gamma_2$ -Fe(Cr, Al) с  $a = 0,3633$  нм [12].

Разница в значениях параметров решетки  $\gamma_1$ -Fe и  $\gamma_2$ -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 того, 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,



Рис. 5. Микроструктура ( $\times 400$ ) покрытий из порошковой проволоки системы Fe-Cr-Al, полученных различными методами электродуговой металлизации: *a* — обычное напыление с помощью электродугового металлизатора ЭМ-14М; *b* — модернизированное напыление ЭМ-14М; *в* — сверхзвуковое напыление PLAZER 15-SA-EM

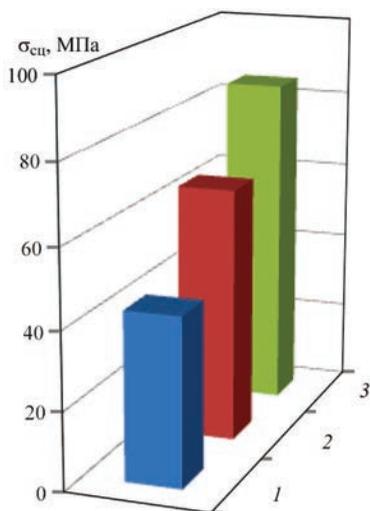


Рис. 6. Прочность сцепления с основой из стали 45 покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al марки ПП-АН202-S, полученных различными методами электродуговой металлзации: 1 — обычное напыление с помощью электродугового металлатора ЭМ-14М; 2 — модернизированное напыление ЭМ-14М; 3 — сверхзвуковое напыление PLAZER15-SA-EM

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 lamелях достигает 20,0...20,5 мас. %. Твердый раствор такой концентрации характеризуется большим сопротивлением окислению кислородом воздуха. Степень окисления напыленного покрытия значительно уменьшается. В lamелях содержится около 1,0 % кислорода. Более детальные результаты исследований структуры данных типов покрытий приведены в работе [12].

Сравнение значений микротвердости покрытий из порошковой проволоки, напыленных разными способами, показывает, что микротвердость покрытия, полученного при обычной электродуговой металлзации, изменяется в пределах от 1930

до 4200 МПа, микротвердость покрытия, полученного на модернизированной установке, изменяется в пределах от 2540 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  $\sigma_{сц}$  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–колodka (контртело–чугун СЧ-20 и сталь 40X,  $P = 10$  МПа,  $v = 1$  м/с, масло HC20, 30 капель/мин). Установлено, что технология электродугового напыления существенно влияет на интенсивность изнашивания 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, составляют 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 7,8 мкм/км. Применение технологии сверхзвукового электродугового напыления позволяет повысить износостойкость покрытий более, чем в 2,5 раза. Вместе с тем все исследуемые покрытия пре-

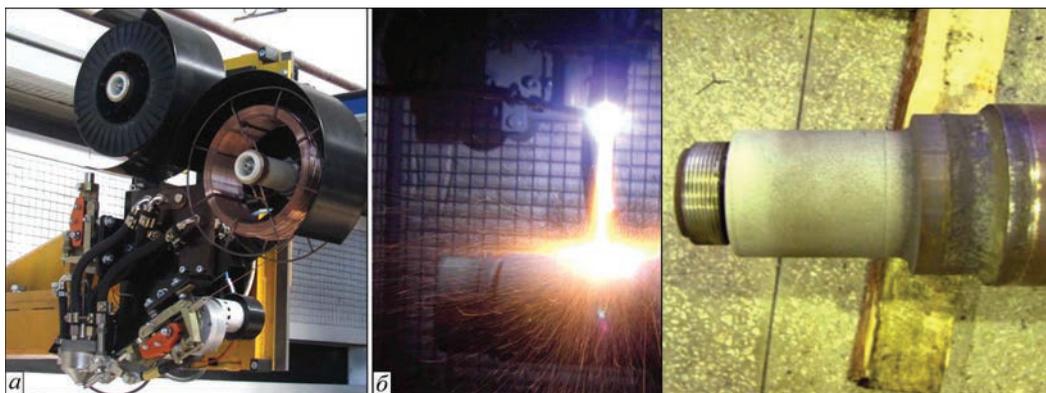


Рис. 7. Внешний вид блока машинного сверхзвукового металлатора PLAZER15-SAEM установки PLAZER15-SA (а), процесс напыления с его помощью износостойких покрытий из порошковых проволок на основе Fe–Cr–C на шейки осей колесных пар железнодорожного транспорта (б)



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

восходят по износостойкости сталь 20, значения износа которой составляют около 10 мкм/км.

Базируясь на технологических исследованиях и опыте сверхзвуковой электродуговой металлизации, разработанная технология и порошковая проволока на основе Fe–Cr–C марки ПП-АН202-S применялись для восстановления тяжело нагруженных коленвалов локомотивных дизелей 12VFE 17/24 поездов Д1 венгерского производства. С применением усовершенствованного сверхзвукового электродугового металлизатора 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, что какие-либо технические дефекты покрытия и валов не зафиксированы, а срок службы восстановленных шеек коленвалов больше новых в два раза. Важным является то обстоятельство, что в экстремальных и аварийных ситуациях (прекращение 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 Коростень организован технологический участок сверхзвукового электродугового напыления осей колесных пар железнодорожного транспорта (рис. 8). Показано, что применение разработанной технологии и оборудования сверхзвукового электродугового напыления покрытий на шейки и подступичные части осей колесных пар грузовых вагонов, 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.

В качестве резюме следует отметить:

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:

– применение усовершенствованной конструкции сверхзвукового электродугового металлизатора PLAZER15-SA-EM, реализующей 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;

– применение специальной порошковой проволоки на основе системы Fe–Cr–C марки ПП-АН202-S, разработанной для сверхзвукового электродугового напыления, с системой легирования, обеспечивающей формирование напыленного покрытия по составу, близкому к хромистым сталям с содержанием 1...2 % С и 4...10 % Cr, которые характеризуются 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 мишметаллами, с протеканием экзотермических реакций;

– повышение температуры дуги и уменьшение размера столба дуги за счет введения оптималь-

ных 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 раз. Прочность сцепления стальных покрытий из стальной основы по сравнению с серийными металлаторами увеличивается с 25...30 до 80 МПа, пористость покрытий снижается с 15...20 до 0,5...3,0 %, 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.

3. Разработанная технология, оборудование и материалы использованы 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.

*Работа выполнялась при поддержке Программы иностранных экспертов КНР № WQ20124400119 (Chinese Program of Foreign Experts № 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 № 2012A061400011, China).*

1. Восстановление шеек осей колесных пар напылением / В. П. Кузьмин, М. М. Бердин, Е. С. Кулешов [и др.] // Железнодорожный транспорт. – 2002. – № 1. – С. 46–49.
2. Кузьмин В. П. Восстановление шеек осей колесных вагонных пар электродуговой металллизацией / В. П. Кузьмин // Вестник ВНИИЖТ. – 2001. – № 1. – С. 46.
3. Новая технология «Плазмер» реновации деталей для железных дорог / В. Н. Коржик, И. В. Кривцун, С. В. Петров [и др.] // Ремонт, восстановление, модернизация. – 2009. – № 1. – С. 20–22.
4. Технология и оборудование для плазменно-дугового напыления для восстановления ответственных деталей железнодорожного транспорта / В. Н. Коржик, М. Ю. Харламов, С. В. Петров [и др.] // Вестник Восточноукраин. ун-та им. В. Даля. – 2001. – № 14. – С. 76–84.
5. Продление срока службы осей РУ1 и РУ1Ш колесных пар грузовых вагонов, восстановленных методом плазменно-дуговой металллизации шеек и подступных частей / В. И. Зеленин, П. В. Кавуненко, В. В. Тисенко [и др.] // Автоматическая сварка. – 2019. – № 9. – С. 39–43.
6. Структура и триботехнические характеристики покрытий, полученных электродуговой металллизацией с использованием порошковых проволок / В. И. Похмурский, М. М. Студент, В. М. Довгуньк [и др.] // Автоматическая сварка. – 2003. – № 8. – С. 13–17.
7. Борисов Ю. С.. Использование сверхзвуковых струй в технологии газотермического напыления / Ю. С. Борисов, С. В. Петров // Автоматическая сварка. – 1995. – № 1. – С. 41–44.
8. Технологические особенности методов сверхзвукового газотермического напыления (Обзор) / В. А. Фролов, В. А. Поклад, Б. В. Рябенко [и др.] // Сварочное производство. – 2006. – № 11. – С. 38–47.
9. Петров С. В. Плазменное газоздушное напыление / С. В. Петров, И. Н. Карп. – К.: Наука думка, 1993. – 495 с.
10. Петров С. В. Установка электродугового сверхзвукового напыления PLAZER15-SA // С. В. Петров, И. Н. Карп // 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: автореф. дис. на соискание ученой степени д-ра техн. наук / В. А. Роянов. – Минск, БПИ. – 38 с.
12. Особенности структуры покрытий из порошковой проволоки системы Fe–Cr–Al, полученных в условиях сверхзвуковой электродуговой металллизации / В. Н. Коржик, А. Л. Борисова, Г. Н. Гордань [и др.] // Автоматическая сварка. – 2014. – № 2. – С. 33–38.

Поступила в редакцию 22.12.2015

## IX конференция «Сварка и термическая обработка живых тканей. Теория. Практика. Перспективы.

25–26 ноября 2016 г.

г. Киев, ИЭС им. Е. О. Патона НАН Украины

E-mail: office@paton.kiev.ua; тел.: (044) 205-20-06, 205-17-10