



УДК 621.793.7

ИССЛЕДОВАНИЕ ДИСПЕРГИРОВАНИЯ РАЗНОРОДНЫХ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ В ПРОЦЕССЕ ЭЛЕКТРОДУГОВОГО НАПЫЛЕНИЯ

Ю. С. БОРИСОВ, Н. В. ВИГИЛЯНСКАЯ, И. А. ДЕМЬЯНОВ, А. П. ГРИЩЕНКО, А. П. МУРАШОВ
ИЭС им. Е. О. Патона НАНУ. 03680, г. Киев-150, ул. Боженко, 11, E-mail: office@paton.kiev.ua

Исследован процесс совместного распыления стальной и медной проволок в условиях электродугового напыления. Установлено влияние параметров напыления на процесс распыления разнородных проволок, что делает возможным управление гранулометрическим составом продуктов распыления при электродуговом напылении псевдосплавных покрытий и соответственно структурой и свойствами получаемых покрытий. В качестве материалов использовали проволоки диаметром 2 мм: медную марки М1 и стальную Св-08А. Исследования проводили с помощью электродугового металлизатора ЭМ-14М. С помощью математического планирования эксперимента получены уравнения регрессии, отражающие зависимость среднего размера частиц от электрической мощности, давления сжатого воздуха и дистанции напыления. Установлено, что средний размер частиц главным образом зависит от давления сжатого воздуха. В случае сочетания при распылении максимальных значений мощности (9,6 кВт) и давления сжатого воздуха (7 атм) образуются частицы минимального размера: 37 мкм при распылении медной проволоки, 54 мкм при распылении стальной проволоки Св-08А и 52 мкм при их совместном распылении. Совокупность минимальных значений мощности (1,7 кВт) и давления сжатого воздуха (6 атм) ведет к формированию частиц максимального размера: 54 мкм при распылении медной проволоки, 85 мкм при распылении стальной проволоки Св-08А и 85 мкм при их совместном распылении. Обнаружено, что в процессе совместного распыления медной и стальной проволок в результате межфазного взаимодействия их расплавов образуются псевдосплавные частицы, состоящие из частиц расплава стали с оболочкой из меди на их поверхности.

Ключевые слова: электродуговое напыление, стальная и медная проволоки, диспергирование расплава, межфазное взаимодействие, псевдосплав, гранулометрический состав, микроструктура частиц

Одним из ключевых факторов процесса газотермического нанесения покрытий является размер частиц напыляемого материала. Он во многом определяет условия нагрева и ускорения частиц, развития процесса их взаимодействия с окружающей средой и в конечном счете форму, размер частиц, деформирующихся при ударе о поверхность подложки, которые формируют слой покрытия [1, 2]. От толщины этих частиц (сплетов) зависит скорость их охлаждения, которая связана с возможностью появления в покрытии неравновесных структур (аморфных, пересыщенных твердых растворов и т. п.) [3]. Гранулометрический состав частиц напыляемого материала влияет также на однородность свойств покрытия, степень гетерогенности его структуры.

В условиях применения для газотермического напыления порошков этот фактор определяется выбранным гранулометрическим составом используемого исходного материала. Коренное отличие метода проволочного газотермического напыления покрытий от порошкового состоит в том, что формирование потока частиц напыляемого материала происходит непосредственно в течение процесса нанесения покрытия при диспергировании расплава используемой проволоки. Это пре-

допределяет важность исследования процесса диспергирования, результаты которого необходимы для управления формированием покрытий и контроля их свойств.

Электродуговое напыление характеризуется большим количеством факторов, позволяющих управлять значениями скорости, температуры и особенно размерами напыляемых частиц [4], а следовательно, и свойствами покрытий.

Диспергирование расплава проволок при электродуговом напылении покрытий. При электродуговом напылении покрытие формируется из капель жидкого металла, движущихся в струе транспортирующего газа (рис. 1). Нагрев и плавление распыляемого металла происходит за счет тепла электрической дуги, горящей между расходуемыми проволоками — электродами, из которых образуется расплавленный металл. Жидкий металл сдувается с концов электродов, дробится под воздействием газодинамических и электромагнитных сил и в виде капель движется в направлении к поверхности напыляемой основы.

Процессы формирования и отрыва жидкого металла с торцов электродов проанализированы в работах [4–11]. Авторами рассмотрены основные силы, действующие на каплю расплавленного ме-

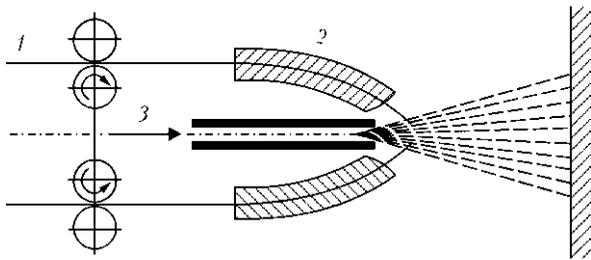


Рис. 1. Схема процесса электродугового напыления: 1 — проволоки; 2 — направляющие; 3 — сжатый воздух

талла, образующуюся на торце проволоки. Жидкий металл на торцах электродов удерживается силами поверхностного натяжения. По мере накопления металл под действием электродинамических сил выталкивается к периферийным частям электродов, где под действием газового потока происходит отрыв и перенос частиц. Сила, которая стремится оторвать каплю, зависит от скорости струи, а сила, удерживающая каплю, пропорциональна ее диаметру и поверхностному натяжению расплава материала проволоки. Баланс этих сил можно представить в виде уравнения [9]:

$$0,5C_d S \rho_g (W_g - W_p)^2 = \pi d_n \sigma, \quad (1)$$

где C_d — коэффициент аэродинамического сопротивления; $S = \pi d_{\max}^2 / 4$ — площадь поперечного сечения капли, m^2 ; ρ — плотность, kg/m^3 ; σ — поверхностное натяжение, N/m ; d_n — диаметр перемычки отрыва, m ; W — скорость, m/s , а индексы p, g относятся к каплям и газу соответственно.

Изменение параметров напыления (скорости подачи проволоки, тока и напряжения на электродах, давления сжатого воздуха) ведет к изменению механизма плавления проволок. Если между средней скоростью перемещения фронта плавления и скоростью подачи электродов существует динамическое равновесие, то наблюдается стабильное горение дуги. При таком режиме газовый поток обеспечивает эвакуацию и распыление жидкого металла с электродов до их столкновения и короткого замыкания. Далее расплавленный металл снова накапливается на торцах электродов, столб дуги сокращается и цикл повторяется. Вместе с периодическим выбросом порций металла из межэлектродного промежутка имеет место также непрерывное струйное стекание перегретого металла с поверхности электродов. Это результат уменьшения сил поверхностного натяжения при сильном перегреве расплавленного металла и, как следствие, невозможность удерживания им оплавленного слоя на поверхности электродов. Под действием струи газа этот оплавленный слой смывается с поверхности электродов и распыляется [12].

По условию равенства сил поверхностного натяжения и силы аэродинамического сопротивления для дуговой металлизации выполнена оценка максимального размера капель, срываемых с проволоки [13]:

$$d_{\max} = 1 / (W_g - W_p) \sqrt{8 \sigma d_n / (C_d \rho_g)}. \quad (2)$$

Решение обратной задачи позволяет определить необходимые условия, а именно, скорость истечения струи при распылении проволоки определенного диаметра.

Экспериментальные данные [8] показывают, что изменение электрических параметров процесса в некотором диапазоне позволяет варьировать не только температуру напыляемых частиц, но и их гранулометрический состав. В работах [5, 6, 14, 15] указывается, что основными параметрами, влияющими на распределение частиц по размерам при дуговой металлизации, являются напряжение на электродах дуги и давление сжатого воздуха.

На дисперсность напыляемого металла влияет также энергия воздушной струи, которая в свою очередь зависит от диаметра воздушного сопла и может быть выражена формулой [5]:

$$d_{cp} = K_1 (3,75 / R_0 + 0,29) \sqrt{G / \gamma \mu_2} \quad [mm], \quad (3)$$

где K_1 — коэффициент размерности; R_0 — радиус воздушного сопла; G — производительность аппарата, kg/s ; γ — плотность напыляемого металла kg/m^3 ; μ_2 — коэффициент равномерности распыления.

Физико-химические процессы, протекающие в жидком металле при расплавлении электродов дугой, размеры частиц распыляемого расплава, свойства покрытий зависят также от интенсивности плавления электродов и массы жидкого металла на их торцах. В работе [7] предложены формулы приближенного расчета массы жидкого металла, образующегося на торцах электродов в межэлектродном промежутке при плавлении сплошных и порошковых проволок. Они учитывают такие факторы процесса электродуговой металлизации, как ток дуги, скорость подачи электродов, частота сбросов жидкого металла, диаметр электродов.

При напылении псевдосплавных покрытий в электродуговые металлизаторы подают две проволоки из разнородных материалов, благодаря чему напыляемый слой представляет собой дисперсную смесь двух распыляемых материалов. При распылении разнородных проволок плавление может происходить неравномерно из-за разницы значений в температуре плавления. Экспериментальные результаты исследования характера расплавления частиц при одновременном распылении двух разнородных проволок отсутствуют. Данные



о влиянии режимов работы металлатора на процесс распыления разнородных проволок позволят установить способы управления гранулометрическим составом продуктов распыления при электродуговом напылении псевдосплавных покрытий и соответственно структурой и свойствами получаемых покрытий.

В настоящей работе проведено исследование процесса совместного распыления в условиях электродуговой металлзации стальной и медной проволок, изучено также влияние технологических параметров на гранулометрический состав частиц расплавов и микроструктуру продуктов распыления.

Методика проведения эксперимента. Для исследования процесса распыления в качестве рабочих материалов использовали проволоки диаметром 2 мм: медную марки М1 и стальную Св-08А. Процесс проводили с помощью двухпроводочного электродугового металлатора ЭМ-14М. Для установления характера взаимосвязи между условиями распыления проволок и гранулометрическим составом частиц применяли метод математического планирования эксперимента [16]. В качестве изменяемых факторов оптимизации выбрали следующие параметры: мощность дуги; давление сжатого воздуха и дистанцию напыления. Выбор основывался на том, что эти факторы оказывают существенное влияние на процесс распыления проволок [5, 6, 10]. Условия проведения

эксперимента сведены в матрицу планирования (таблица).

Граничные условия факторов выбрали из анализа предыдущих экспериментов и опыта электродугового напыления покрытий из проволочных материалов [17–19]. Кроме указанных изменяемых факторов, постоянными оставались такие факторы, как угол наклона струи к подложке — 90°, угол между электродами 30°.

Для исследования размера и структуры частиц, образующихся при распылении разнородных проволок, сбор частиц проводили путем распыления проволок в воду. Далее выполнили сепарацию частиц с использованием магнитной плиты.

Микроструктуру частиц исследовали на металлографическом микроскопе «Neophot-32». Измерение гранулометрического состава продуктов распыления проводили с использованием программы обработки изображений «Atlas».

Результаты анализа продуктов распыления.

На рис. 2 приведены гистограммы зависимости среднего размера частиц от режимов распыления, полученных при отдельном распылении медной и стальной проволок, а также при их одновременном распылении. Из них следует, что дисперсность распыленной меди меньше, чем стали и псевдосплава, что, по-видимому, связано с тем, что медь имеет меньший коэффициент поверхностного натяжения (поверхностное натяжение меди 1,35, стали 1,85 Н/м [20]).

В результате математической обработки результатов измерения получены следующие уравнения регрессии, выражающие зависимость размера частиц от условий распыления:

$$d_{\text{ср}}^{\text{р}}(\text{Cu}) = 46 - 0,31W - 0,62P + 0,004H,$$

$$d_{\text{ср}}^{\text{р}}(\text{Fe}) = 73 - 0,15W - 0,96P + 0,004H,$$

$$d_{\text{ср}}^{\text{р}}(\text{Cu} - \text{Fe}) = 73 - 0,74W - 1,21P + 0,01H.$$

Анализ уравнений регрессии позволил определить влияние изменяемых факторов процесса на средний размер частиц для каждого из материалов.

Матрица математического планирования эксперимента

Номер режима	Мощность W , кВт	Давление сжатого воздуха P , атм	Дистанция напыления H , мм
1	9,6	7	200
2	9,6	6	60
3	4,4	7	60
4	4,4	6	200
5	3,8	7	60
6	3,8	6	200
7	1,7	7	200
8	1,7	6	60

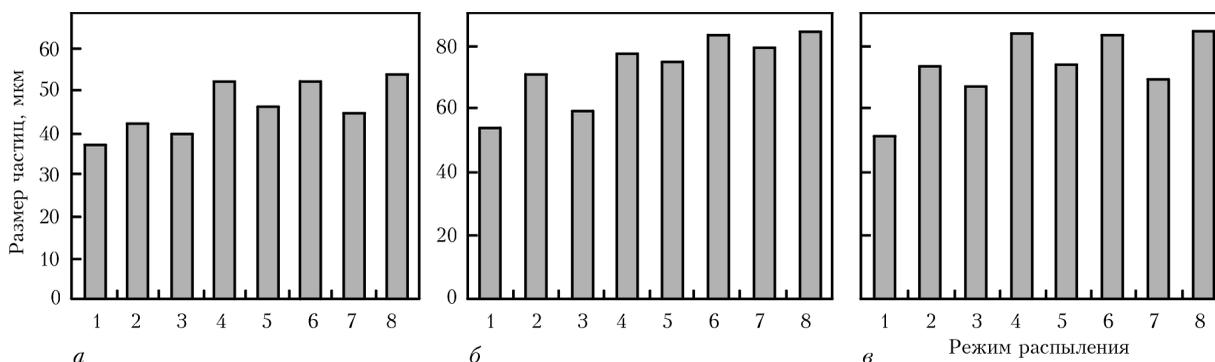


Рис. 2. Зависимость среднего размера частиц от режимов распыления: а — медные частицы; б — стальные; в — частицы псевдосплава сталь–медь



Уравнения регрессии свидетельствуют о том, что на размер частиц наибольшее влияние оказывает давление сжатого воздуха. Увеличение мощности и давления сжатого воздуха ведет к уменьшению диаметра частиц. Минимальный размер частиц получен при распылении в случае сочетания максимальных значений мощности и давления сжатого воздуха (режим № 1). Совокупность минимальных значений мощности и давления сжатого воздуха ведет к формированию частиц максимального размера (режим № 8).

Учитывая турбулентный характер струи при электродуговом напылении [13], образовавшиеся капли расплава меди и железа в процессе движения в струе могут сталкиваться, что определяет возможность развития процессов межфазного взаимодействия с явлениями взаимного смешивания и образования твердых растворов в системе медь-железо. Как видно из диаграммы состояния медь-железо (рис. 3), железо и медь ограниченно взаимно растворимы [21].

Существуют две области возможного взаимодействия — на начальной стадии плавления и отрыва капель с торцов медной и стальной проволок и в процессе их полета до поверхности подложки.

Для оценки возможности взаимодействия частиц в объеме струи распыления провели расчет условной объемной концентрации частиц расплава материала в струе напыления β' и оценили вероятность столкновения частиц в струе [22]. Условная объемная концентрация β' представляет собой отношение объема распыляемого материала к объему подаваемого газа (сжатого воздуха):

$$\beta' = V_{\text{пр}} / V_{\text{г}} \quad (4)$$

где $V_{\text{г}}$ — объем сжатого воздуха, равный 1,2 м³/мин; $V_{\text{пр}}$ — объем подаваемой проволоки, м³/мин, равный:

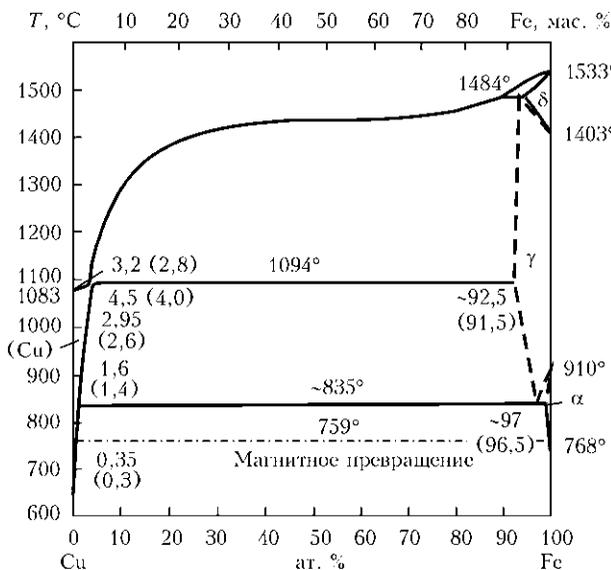


Рис. 3. Диаграмма состояния медь-железо

$$V_{\text{пр}} = \pi 2r^2 v_{\text{пр}}, \quad (5)$$

где r — радиус проволоки ($r = 0,001$ м); $v_{\text{пр}}$ — скорость подачи проволоки ($v_{\text{пр}} = 4,5$ м/мин).

Расчет β' по формуле (4) показал, что условная объемная концентрация частиц расплава материала в струе при металлизации составляет $0,28 \cdot 10^{-4}$, однако она выражает усредненное распределение дисперсного материала в объеме струи. Распределение частиц расплава материала по сечению струи неравномерно. Для его описания в первом приближении может быть применено гауссово распределение, которое наблюдается в распределении частиц, формирующих покрытие [23, 24]:

$$Y_i = Y_0 \exp(-r_i^2 / 2\delta^2), \quad (6)$$

где Y_i — плотность потока частиц в точке r_i сечения струи; Y_0 — плотность потока частиц на оси струи; r_i — текущий радиус сечения струи; δ — стандартное отклонение.

Интегрируя функцию Y_i по dr , получаем суммарную плотность потока дисперсного материала в сечении струи:

$$\int_{-\infty}^{+\infty} Y_i dr = Y_0 \sqrt{2\pi}\delta. \quad (7)$$

Суммарная плотность потока может быть получена при замене фигуры Гаусса равновеликим прямоугольником с базой $4r_p$ ($r_p = \sqrt{2}\delta$ — радиус рассеивания) и высотой, равной средней концентрации дисперсной среды в струе.

Заменяя r_p на $\sqrt{2}\delta$, получаем

$$Y_0 / Y_{\text{ср}} = 4 / \sqrt{\pi} = 2,26. \quad (8)$$

Таким образом, максимальные условные концентрации β' частиц расплава материала в струе при напылении, наблюдаемые в приосевой зоне, могут достигать $0,64 \cdot 10^{-4}$, а фактическая средняя объемная концентрация частиц расплава материала в струе составляет $\beta' < 0,5 \cdot 10^{-4}$.

Расчет отношения среднего расстояния между частицами в газовой струе к их размеру позволяет оценить возможность соударения частиц, коагуляции их в расплавленном состоянии и изменения вследствие этого состава и размера частиц напыляемого материала [23]. Отношение расстояния между частицами l к размеру частицы d_q соответственно

$$\frac{l}{d_q} = \frac{1}{\sqrt[3]{1,91\beta' - d_q}} - 1. \quad (9)$$

На рис. 4 представлены результаты расчета величины l/d_q при диаметре частицы 140 мкм в зависимости от β' . Из них следует, что при кон-

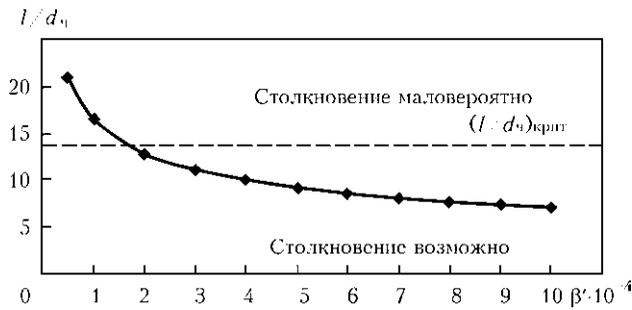


Рис. 4. Зависимость межчастичного расстояния от концентрации дисперсной фазы

центрациях частиц расплава материала менее $0,64 \cdot 10^{-4}$ процессы столкновения и коагуляции частиц при движении в объеме струи маловероятны.

При использовании данной методики оценки возможности взаимодействия частиц в объеме струи первоначально установлено, что частицы стали и меди в процессе полета в объеме струи не должны сталкиваться и взаимодействовать

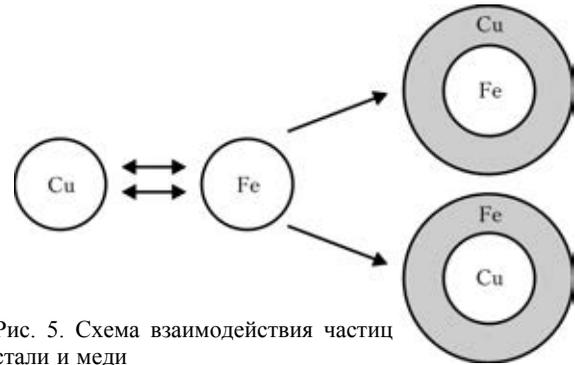


Рис. 5. Схема взаимодействия частиц стали и меди

между собой. Тем не менее результаты магнитной сепарации всей массы продукта диспергирования при совместном распылении медной и стальной проволоки показали, что практически все частицы собранного порошка характеризуются магнитными свойствами, что указывает на наличие в каждой из них магнитного материала — железа. В связи с этим возникла необходимость анализа процесса контактного межфазного взаимодей-

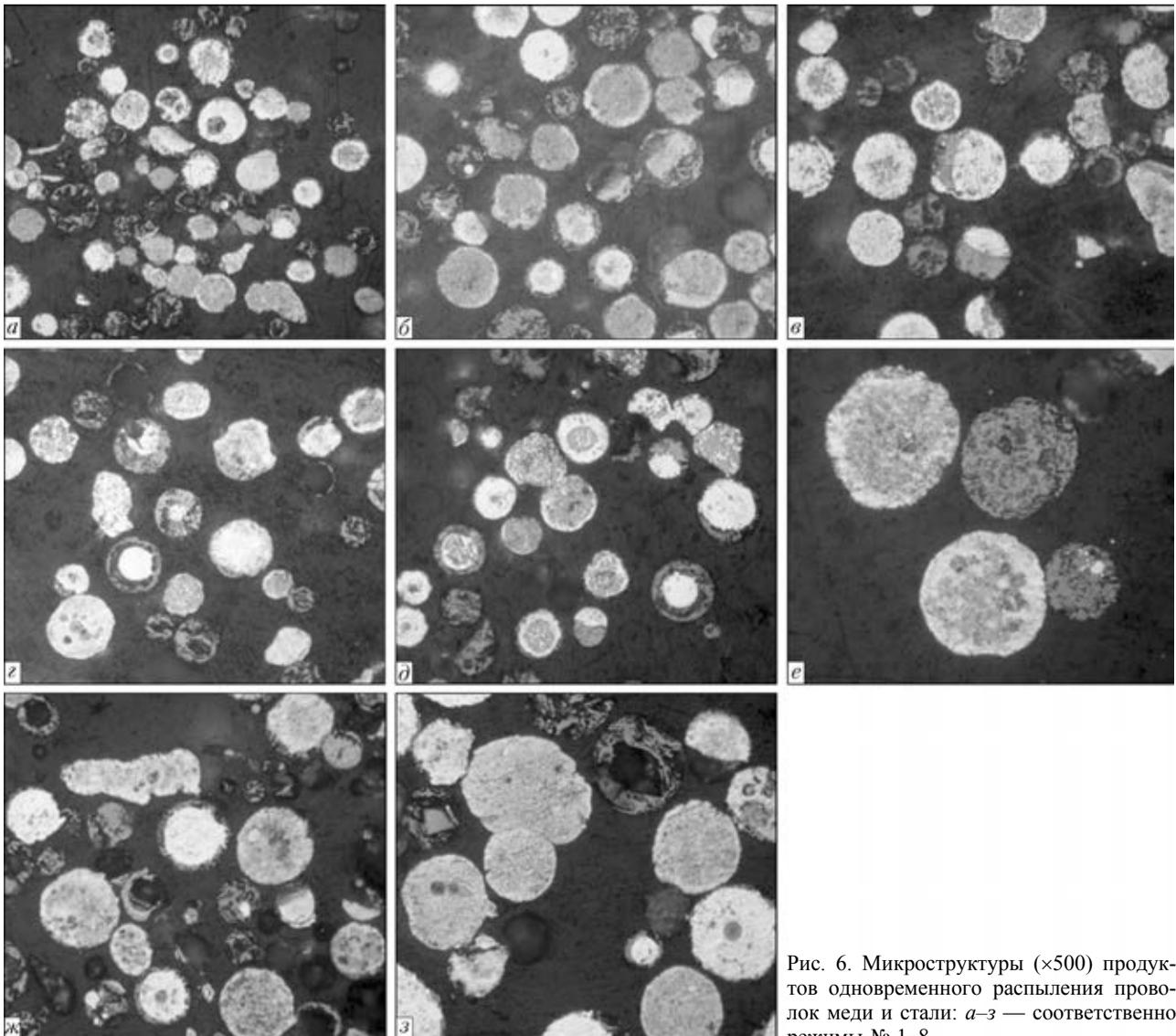


Рис. 6. Микроструктуры ($\times 500$) продуктов одновременного распыления проволок меди и стали: а-з — соответственно режимы № 1–8



твия частиц расплавов меди и железа в случае их столкновения.

Расчет поверхностной энергии расплава расплывенных частиц стали и меди позволяет прогнозировать наиболее вероятный вид контактного взаимодействия частиц в зависимости от их диаметра. Свободная энергия поверхности капли жидкости F пропорциональна ее площади [24]:

$$F = \sigma S, \quad (10)$$

где $S = 4\pi r^2$ — площадь поверхности сферической частицы радиусом r ; σ — поверхностное натяжение жидкости.

Изменение свободной энергии частицы после взаимодействия определяется по формуле

$$\Delta F = F' - F, \quad (11)$$

где $F' = F'_1 + F'_2$ — энергия частицы после взаимодействия; $F = F_1 + F_2$ — энергия частицы до взаимодействия.

На рис. 5 приведены виды возможного взаимодействия частиц стали и меди.

В случае захвата медной частицей частицы стали изменение свободной энергии составляет $\Delta F = 3,6 \cdot 10^{-8}$ Дж, в случае захвата стальной частицей частицы меди $\Delta F = 4,9 \cdot 10^{-8}$ Дж. Результаты данного расчета поверхностной энергии частиц позволяют заключить, что наиболее вероятный процесс взаимодействия частиц стали и меди будет протекать в направлении захвата расплавом меди стальных капель.

Анализ микроструктуры частиц показал, что в процессе распыления при всех технологических режимах частицы меди и стали соединяются и образуют псевдосплавные частицы. Как видно из рис. 6, в продуктах распыления медной и стальной проволок встречаются отдельные частицы стали, тогда как все медные частицы находятся в виде псевдосплавных частиц медь–сталь, которые представляют собой частицы меди сферической и каплевидной формы, в которые внедрены мелкие или крупные частицы стали.

Исходя из предыдущей оценки вероятности столкновения частиц при полете в объеме струи, можно полагать, что частицы псевдосплава медь–сталь образуются в процессе начальной стадии плавления и отрыва капель расплава с концов проволок.

Выводы

1. С использованием математического планирования эксперимента по исследованию процесса диспергирования расплава медной и стальной проволок в условиях электродугового напыления получены уравнения регрессии, отражающие зависимость среднего размера частиц от значений

электрической мощности, давления сжатого воздуха и дистанции напыления.

2. Установлено, что при изменении электрической мощности в пределах 1,7...9,6 кВт, давления сжатого воздуха 6...7 атм, дистанции напыления 60...200 мм средний размер напыляемых частиц в случае раздельного распыления медной проволоки изменяется в пределах 37...54 мкм, проволоки Св-08А — 54...85 мкм. При совместном распылении этих проволок в указанных условиях образуются частицы с размером от 52 до 85 мкм.

3. Средний размер частиц главным образом зависит от давления сжатого воздуха — с его увеличением диаметр частиц уменьшается. При распылении в случае сочетания максимальных значений мощности (9,6 кВт) и давления сжатого воздуха (7 атм) образуются частицы минимального размера: 37 мкм при распылении медной проволоки, 54 мкм при распылении проволоки Св-08А и 52 мкм при их совместном распылении. Совокупность минимальных значений мощности (1,7 кВт) и давления сжатого воздуха (6 атм) ведет к формированию частиц максимального размера: 54 мкм при распылении медной проволоки, 85 мкм при распылении проволоки из Св-08А и 85 мкм при их совместном распылении (псевдосплавные частицы).

4. Обнаружено, что в процессе электродугового напыления покрытий из медной и стальной проволок происходит межфазное взаимодействие частиц расплавов, в результате которого происходит формирование оболочки из меди на поверхности частиц расплава стали с образованием частиц псевдосплавной структуры. Расчетно-теоретический анализ процесса взаимодействия показывает, что наиболее вероятной областью этого взаимодействия является начальный участок процесса диспергирования расплавов проволок.

1. Балдаев Л. Х., Борисов В. Н., Вахалин В. А. Газотермическое напыление: Уч. пособие для вузов / Под общ. ред. Л. Х. Балдаева. — М.: Маркет ДС, 2007. — 344 с.
2. Кудинов В. В., Бобров Г. В. Нанесение покрытий напылением: Теория, технология и оборудование: Учебник для металлургических и машиностроительных специальностей вузов / Под ред. Б. С. Митина. — М.: Металлургия, 1992. — 432 с.
3. Борисов Ю. С., Коржик В. Н. Аморфные газотермические покрытия. Теория и практика (Обзор) // Автомат. сварка. — 1995. — № 4. — С. 3–11.
4. Вахалин В. А., Кудинов В. В., Белащенко В. Е. Исследование эффективного КПД нагрева электродов и коэффициента использования материала при дуговой металллизации // Физ. и химия обработки материалов. — 1981. — № 8. — С. 65–69.
5. Катц Н. В., Антошин Е. В., Вадивасов Д. Г. Металлизация распылением. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
6. Троицкий А. Ф. Основы металллизации распылением. — Ташкент: Госиздат УзССР, 1960. — 184 с.
7. Роянов В. А. Плавление электродов при дуговой металллизации // Свароч. пр-во. — 1990. — № 2. — С. 35–38.



8. *Анализ методов управления параметрами напыляемых частиц при электродуговой металлзации* / В. А. Агеев, В. Е. Белашенко, И. Э. Фельдман, А. В. Черноиванов // Там же. — 1989. — № 12. — С. 30–32.
9. *Коробов Ю. С.* Оценка сил, действующих на распыляемый металл при электрометаллизации // Автомат. сварка. — 2004. — № 7. — С. 23–27.
10. *Процесс плавления и распыления материала электродов при электродуговой металлзации* / В. А. Вахалин, В. В. Кудинов, С. Б. Масленников и др. // Физ. и химия обработки материалов. — 1981. — № 3. — С. 58–63.
11. *Коробов Ю. С., Бороненков В. Н.* Расчет параметров движения, нагрева и окисления частиц при электродуговой металлзации // Свароч. пр-во. — 1998. — № 3. — С. 9–13.
12. *Кузнецов В. Д., Пащенко В. М.* Фізико-хімічні основи створення покриттів: Навч. посібник. — К.: НМЦ ВО, 1999. — 176 с.
13. *Бороненков В. Н., Коробов Ю. С.* Основы дуговой металлзации. Физико-химические закономерности. — Екатеринбург: Изд-во Урал. ун-та, 2012. — 265 с.
14. *Newbery A. P., Granta P. S., Neiser R. A.* The velocity and temperature of steel droplets during electric arc spraying // Surface and Coatings Technology. — 2005. — **195**, № 1. — P. 91–101.
15. *Planch M. P., Liao H., Coddet C.* Relationships between in-flight particle characteristics and coating microstructure with a twin wire arc spray process and different working conditions // Ibid. — 2004. — **182**, № 2-3. — P. 215–226.
16. *Новик Ф. С., Арсов Я. Б.* Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов. — М.: Машиностроение, 1980. — 304 с.
17. *Металлизация распылением* / Н. В. Катц, Е. В. Антошин, Д. Г. Вадивасов и др. — М.: Машиностроение, 1966. — 200 с.
18. *Шашков А. Н.* Антифрикционные псевдосплавы. — М.: Машгиз, 1960. — 53 с.
19. *Сложные металлзационные псевдосплавы как подшипниковые материалы* / Л. В. Красниченко, А. И. Смолянинов, Е. Г. Подкович, В. М. Таратин // Применение новых материалов в сельскохозяйственном машиностроении: Сб. ст. — Ростов-на-Дону, 1966. — С. 3–20.
20. *Свойства элементов*: Справ. изд. / Под ред. М. Е. Дрицы. — М.: Металлургия, 1985. — 672 с.
21. *Хансен М., Андерко К.* Структуры двойных сплавов: В 2-х т. — М.: Металлургиздат, 1962. — Т. 2. — 624 с.
22. *Детлаф А. А., Яворский Б. М.* Курс физики. Механика. Основы молекулярной физики и термодинамики. — 4-е изд., перераб.: Учеб. пособие для вузов. — М.: Высш. шк., 1973. — Т. 1. — 384 с.
23. *Борисов Ю. С.* Теоретические и технологические основы получения плазменных покрытий из композиционных порошков: Дис. ... д-ра техн. наук. — Киев, 1982. — 514 с.
24. *Формирование напыляемого слоя.* <http://www.hvof.org/theory/forming/>.

Поступила в редакцию 26.11.2012

НОВАЯ КНИГА

Шаповалов В. О., Шейко І. В., Ремізов Г. О. Плазмові процеси та устаткування в металургії. — К.: Хімджест, 2012. — 384 с. (укр. яз.).

В учебнике обобщены многочисленные материалы о развитии, становлении и применении низкотемпературной плазмы в металлургии. Освещены вопросы теории и практики получения низкотемпературной плазмы, описаны разные типы и конструкции плазмотронов и их работа.

Рассмотрены разнообразные процессы и технологии практического применения низкотемпературной плазмы в металлургии: плавка металлов и сплавов в печах с керамическим подом, рафинирующий переплав металлов с формированием слитка в охлаждаемом кристаллизаторе, интенсификация плавки в открытых и вакуумных индукционных тигельных печах, послепечная обработка металлических расплавов в агрегатах типа ковш–печь, рафинирующий переплав поверхности слитков и заготовок.

Показаны возможности применения низкотемпературной плазмы для получения металлических материалов с высокими функциональными свойствами: монокристаллов тугоплавких металлов, гранулированных металлических порошков, лент с аморфной структурой.

Изложены методики расчета плазменно-дуговых печей с керамическим подом, гарнисажных печей и переплавных агрегатов, у которых слиток формируется в водоохлаждающем кристаллизаторе.

Для студентов металлургических и материаловедческих специальностей высших учебных заведений, аспирантов, преподавателей и специалистов, работающих в металлургической области.