



ОСОБЕННОСТИ ПРОЦЕССА МИКРОПЛАЗМЕННОГО НАПЫЛЕНИЯ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ПРОВОЛОЧНЫХ МАТЕРИАЛОВ

Ю. С. БОРИСОВ, д-р техн. наук, А. Н. КИСЛИЦА, С. Г. ВОЙНАРОВИЧ, инженеры
(Ин-т электросварки им. Е. О. Патона НАН Украины)

Техника микроплазменного напыления покрытий обеспечивает малый размер пятна напыления (несколько миллиметров), отличается небольшими габаритами оборудования и низким уровнем шумовыделения. С целью использования проволоки как исходного материала для напыления покрытий сконструирован микроплазмотрон с устройством для подачи проволоки. Исследованы структура и свойства покрытий, полученных микроплазменным способом с использованием проволоки из Mo, W, Ti, Ni-Cr, Cu, Al, латуни, Sn и стали. Результаты исследований свидетельствуют о возможности получения таким путем плотных покрытий при размере пятна напыления в пределах 3...8 мм.

Ключевые слова: микроплазменное напыление, плазмотрон, механизм подачи проволоки, распыление проволоки, проволочные материалы, медь, вольфрам, покрытие, микроструктура

Одним из способов газотермического напыления является нанесение покрытий с использованием в качестве исходных материалов проволок. Напыление покрытий из проволочных материалов производят плазменным, газопламенным способами и электродуговой металллизацией. Плазменный способ может реализовываться по схемам проволока — анод и нейтральная проволока. В качестве исходных материалов используют как сплошные проволоки из металлов и сплавов (медь, алюминий, железо, титан, никель, хром, молибден, вольфрам, различные сплавы и т. д.), так и порошковые различного состава [1].

Процесс плазменного напыления проволочных материалов характеризуется следующими особенностями:

все частицы, образующиеся при распылении проволоки, представляют собой капли расплава; точность и стабильность расхода распыляемого материала;

в схеме проволока — анод обеспечивается высокая производительность процесса напыления.

Благодаря перечисленным выше особенностям, покрытия, получаемые плазменным напылением из проволок, имеют плотную ламелярную структуру, низкую пористость, высокую прочность и твердость, малый разброс показателей микротвердости, низкое содержание оксидов в покрытии [2, 3]. До настоящего времени напыление с применением проволочных материалов проводили с помощью плазмотронов достаточно большой мощности. Например, в установке УПУ-8М используется плазмотрон мощностью до 40 кВт,

который может проводить напыление из проволочных материалов диаметром 0,8...1,2 мм. При нанесении покрытий на детали с толщиной стенок менее 1 мм возникает опасность местного перегрева и коробления изделия, а в случае необходимости напыления на узкие ребра или дорожки наблюдается большая потеря напыляемого материала.

За последние годы в ИЭС им. Е. О. Патона создан новый вариант плазменного напыления — микроплазменное напыление [4–6]. Установка МПН-004 включает источник питания с панелью управления, плазмотрон и специальное устройство для подачи порошка. Конструкция плазмотрона защищена патентом Украины [7]. Параметры его работы обеспечивают формирование ламинарной плазменной струи, что обуславливает ряд особенностей процесса микроплазменного напыления:

уменьшение размера пятна напыления до 1...5 мм (угол раскрытия ламинарной плазменной струи составляет всего 2...6 вместо 10...18° для турбулентных плазменных струй, а диаметр сопла 0,8...2 мм);

возможность нанесения покрытий на изделия малых размеров и с тонкими стенками без локального перегрева и коробления (низкая тепловая мощность микроплазменной струи позволяет снизить нагрев основы);

низкий уровень звука ламинарной плазменной струи (30...50 дБ).

Характеристика установки МПН-004 для микроплазменного напыления покрытий

Рабочий газ	аргон
Защитный газ	аргон
Мощность, кВт	≤ 3,0
Сила тока, А	10...50
Напряжение, В	≤ 60
Расход плазмообразующего газа, л/ч	10...250
Расход защитного газа, л/ч	60...400
Габариты, мм	390×225×205
Масса, кг	14



В ИЭС им. Е. О. Патона разработан микроплазменный способ нанесения покрытий с использованием проволоочных материалов [8, 9]. Он позволяет реализовать преимущества проволоочного способа газотермического напыления в условиях микроплазменной струи. С этой целью создана специализированная приставка к плазматрону, входящая в состав установки МПН-004 для микроплазменного напыления (рис. 1). Приставка представляет собой компактный механизм подачи проволоки в межэлектродный участок плазменной струи. Подающий механизм имеет возможность регулировки скорости подачи проволоки путем изменения количества оборотов на валу электродвигателя. Приставка имеет малую массу и крепится на место порошкового дозатора.

Конструктивной особенностью плазматрона является выносной анод. Для стабилизации плазменной струи и защиты анода осуществляется подача защитного газа — аргона. Наличие защитной атмосферы в зоне плавления проволоки позволяет снизить степень окисления напыляемого материала, что особенно важно при напылении активных металлов таких, как вольфрам, молибден, титан, цинк, латунь.

Анализ условия отрыва капли в условиях плазменного распыления проволоки показал, что отрыв капли наступает, когда усилие, создаваемое струей F_c , будет равно или превысит силу поверхностного натяжения $F_{п.н}$, удерживающую ее на торце [3]. Это условие может быть представлено следующим равенством:

$$F_c \geq F_{п.н}. \quad (1)$$

На образующуюся каплю в потоке действует сила лобового давления струи, которая может быть подсчитана по выражению

$$F_c = 0,5c_x \rho v^2 S, \quad (2)$$

где c_x — коэффициент лобового сопротивления струи, зависящий от числа Рейнольдса; ρ — плотность газа струи; v — скорость плазменной струи; S — площадь миделевого сечения капли расплава.

Как видно из формулы (2), F_c зависит от скорости потока v . Сила, удерживающая каплю на торце проволоки $F_{п.н}$, пропорциональна диаметру проволоки d и силе поверхностного натяжения данного металла σ :

$$F_{п.н} = \pi d \sigma. \quad (3)$$

Для распыления проволоки микроплазменной струей ($F_c > F_{п.н}$) необходимо обеспечивать скорость плазменной струи более высокую, чем в условиях напыления порошков. Скорость плазменной струи в свою очередь зависит от диаметра сопла, расхода плазмообразующего газа и мощности плазматрона. Расход плазмообразующего

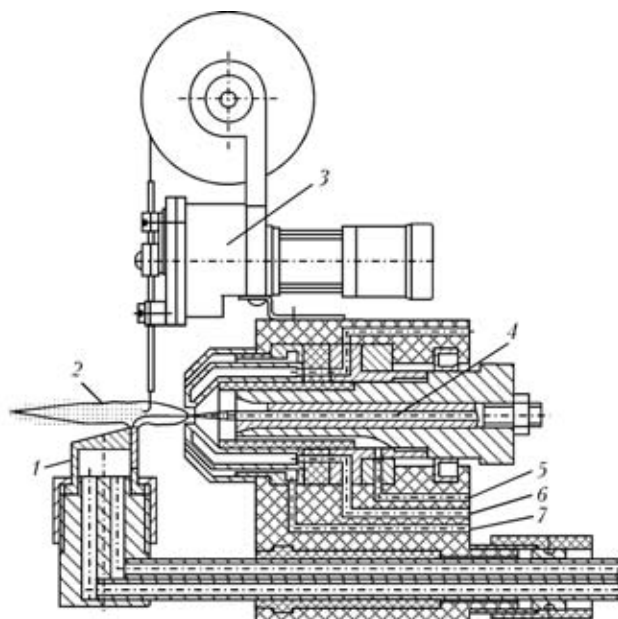


Рис. 1. Схема плазматрона для микроплазменного напыления проволоочными материалами: 1 — анод; 2 — плазменная струя; 3 — механизм подачи проволоки; 4 — катод; 5–7 — канал подачи соответственно плазмообразующего газа, воды и защитного газа

газа при распылении проволоки в 1,5...2 раза выше, чем при напылении порошковых материалов [5, 6].

Температура струи аргоновой плазмы в условиях микроплазменного напыления в результате большей мощности, приходящейся на единицу расхода плазмообразующего газа, превышает температуру аналогичной струи, получаемой в обычных плазматронах. Высокая температура струи дает возможность снизить силу поверхностного натяжения отрывающейся капли за счет перегрева расплава. Снизить силу, удерживающую каплю на торце проволоки $F_{п.н}$, можно также путем уменьшения диаметра распыляемой проволоки d . В связи с этим проволоку из тугоплавких металлов предпочтительно выбирать меньшего диаметра. Например, для распыления вольфрамовой проволоки ($\sigma = 2,3 \text{ Дж/м}^2$) ее диаметр должен быть 0,2 мм, хотя стальная ($\sigma = 1,78 \text{ Дж/м}^2$) и медная ($\sigma = 1,35 \text{ Дж/м}^2$) проволоки хорошо распыляются при диаметре 0,3 мм.

Рассматривая равенство (1) при допущении, что c_x и ρ являются постоянными, можно найти зависимость относительной скорости струи (для алюминия она принята 1), необходимой для распыления проволоки, от поверхностного натяжения различных материалов (рис. 2). Видно, что для материалов с высоким значением поверхностного натяжения (вольфрам, молибден) скорость распыляющей струи должна быть гораздо выше, чем для материалов с низким значением поверхностного натяжения (алюминия, меди, титана).

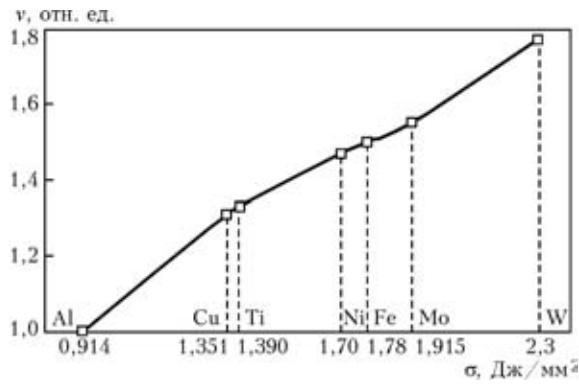


Рис. 2. Зависимость необходимой скорости плазменной струи от поверхностного натяжения разных материалов

Таким образом, при распылении проволоки в процессе микроплазменного напыления благоприятные условия создаются в результате сочетания следующих факторов: высокой удельной мощности (высокой энтальпии плазменной струи); высокой температуры плазменной струи; высокой скорости плазменной струи; использования проволок малого диаметра (0,3 мм).

В результате проведенных экспериментов установлено, что стабильный процесс распыления нейтральной проволоки микроплазменной струей с формирующим соплом диаметром 0,8 мм и рас-

ходом плазмообразующего газа до 300 л/ч наблюдается при использовании проволоки диаметром 0,2...0,4 мм. Проволока диаметром 0,2 мм используется для тугоплавких металлов таких, как вольфрам (3395), молибден (2620 °С), 0,3 мм — для стальной, медной, никромовой, титановой и др., 0,4 мм — для легкоплавких металлов таких, как свинец (327), олово (232 °С) и др. Скорость подачи проволоки в межэлектродный участок плазменной струи зависит от количества теплоты, необходимой для плавления единицы объема проволоки, т. е. от ее диаметра и теплофизических свойств материала. Количество теплоты, необходимое для плавления 1 см проволоки, можно определить по формуле

$$Q_{\text{пл}} = [c_p(T_{\text{пл}} - T_0) + C] \rho \cdot 0,01 \pi d_{\text{пр}}^2 / 4. \quad (4)$$

Учитывая свойства используемых материалов и то, что $T_0 = 293 \text{ K}$, можно найти значения $Q_{\text{пл}}$ для каждого из материалов.

Результаты расчетов представлены в табл. 1. Из таблицы видно, что для медной и титановой проволоки диаметром 0,3 мм ($Q_{\text{пл}} \approx 3,8 \cdot 10^2 \text{ Дж}$) оптимальные условия распыления достигаются при более высоких скоростях подачи проволоки

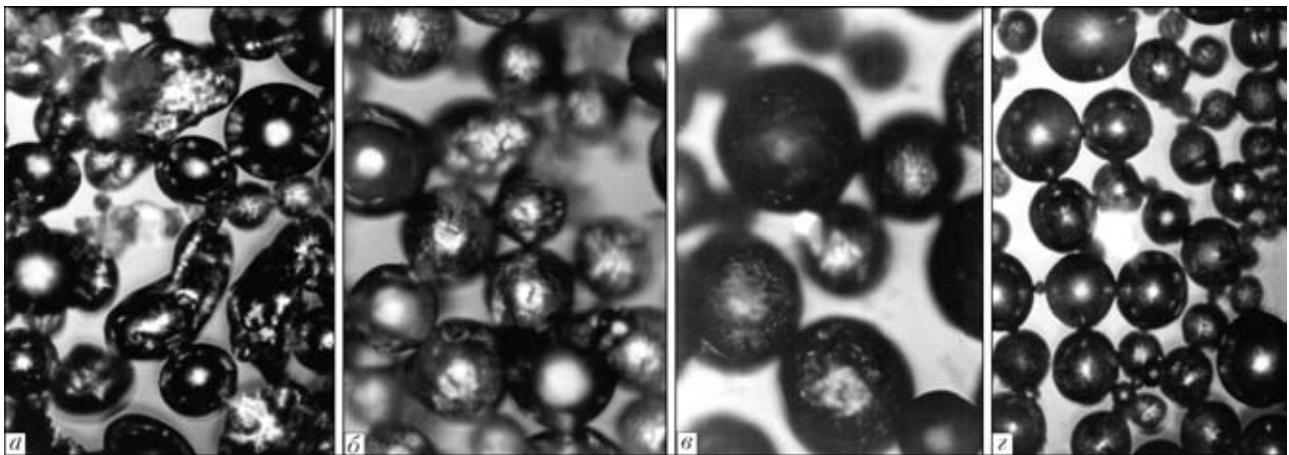


Рис. 3. Внешний вид частиц порошка, полученных распылением проволоки микроплазменной струей, $\times 200$: а — вольфрам; б — медь; в — никром; г — сталь (0,65 % С, 1 % Мп)

Т а б л и ц а 1. Количество теплоты, необходимое для плавления 1 см проволоки диаметром $d = 0,3 \text{ мм}$ для разных материалов

Материал	Плотность материала ρ , кг/м ³	Температура плавления $T_{\text{пл}}$, К	Теплота плавления $C \cdot 10^{-5}$, Дж/кг	Удельная теплоемкость $c_p \cdot 10^{-3}$, Дж/(кг·К)	Количество теплоты, необходимое для плавления 1 см проволоки диаметром 0,3 мм, $Q_{\text{пл}} \cdot 10^{-2}$, Дж
Fe	7860	1811	2,48	0,45	5,173
Cu	8920	1353	2,06	0,38	3,838
Al	2710	933	4,01	0,91	1,884
Ni	8960	1728	2,98	0,46	6,068
Ti	4500	1941	3,59	0,52	3,868
Mo	10200	2890	3,82	0,25	7,435
W	19230	3660	1,92	0,13	8,559



Таблица 2. Параметры микроплазменного проволочного напыления в зависимости от материала проволоки (экспериментальные данные)

Параметр	Материал проволоки						
	сталь	Cu	Ni-Cr	латунь	Ti	Mo	W
Диаметр проволоки, мм	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,2	0,2
Скорость подачи проволоки, м/мин	5,0	6,0	4,5	5,5	5,5	8,0	9,0
Напряжение, В	30	32	32	25	25	32	32
Ток, А	45	48	48	20	30	48	50
Удельная мощность, Вт/л	13,5	17,1	15,4	3,3	5	14	13,3
Расход плазмообразующего газа, л/ч	100	90	100	150	150	110	120
Расход защитного газа, л/ч	180	200	200	400	350	300	300
Расход напыляемого материала, г/мин	2,75	3,7	3,3	2,7	1,6	2,6	2,2

по сравнению со стальной и никромовой того же диаметра ($Q_{пл} > 5 \cdot 10^2$ Дж). Установлено, что для обеспечения стабильного процесса микроплазменного напыления покрытий из молибдена и вольфрама следует использовать проволоку диаметром 0,2 мм, более высокие значения силы тока и расхода газов. Скорость подачи проволоки в данном случае достигала 10 м/мин, что в 3...5 раз выше по сравнению с традиционными способами плазменного напыления с использованием проволочных материалов [10, 11].

Для определения фракционного состава порошков, полученных распылением проволоки микроплазменной струей, а также изучения формы частиц продукта распыления разных материалов проведен сбор порошка в воду. Режимы распыления проволоки соответствуют режимам, указанным в табл. 2. Все порошки собирали в ванну, наполненную водой, на расстоянии 300 мм от точки распыления и под углом 30° к поверхности воды. После удаления воды порошки просушивали в сушильном шкафу (рис. 3). Фракционный

Таблица 3. Фракционный состав порошков, полученных распылением проволоки микроплазменной струей

Материал проволоки	Размеры частиц порошка, мкм					
	0...20	20...45	45...63	63...80	80...100	100...160
Медь	15	30	40	10	5	—
Нихром	10	15	50	15	10	—
Сталь (0,65 % C, 1 % Mn)	29	15	20	15	10	1
Вольфрам	10	10	15	20	30	15

состав порошков определяли с помощью металлографического микроскопа (рис. 4). Результаты исследований продуктов распыления разных материалов представлены в табл. 3. Так, например, для частиц никрома преобладает фракция 45...63 мкм, а количество остальных фракций симметрично уменьшается. В случае порошка стали (0,65 % C, 1,0 % Mn) преобладает фракция 0...20 мкм, а количество остальных фракций уменьшается в сторону увеличения размеров частиц. При распылении вольфрамовой проволоки количество частиц разных фракций примерно одинаково и лишь некоторое увеличение наблюдается в диапазоне размеров 63...100 мкм.

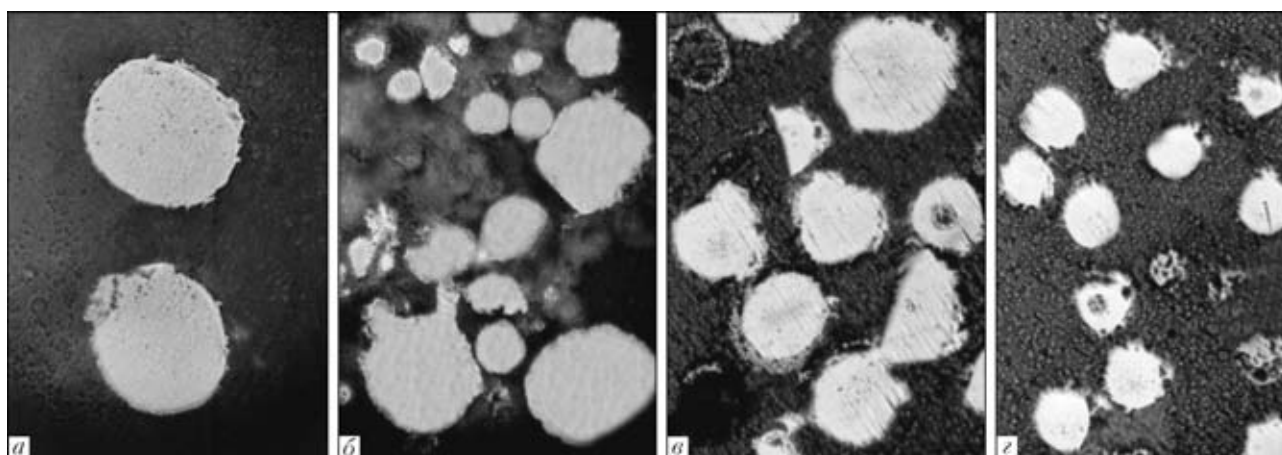


Рис. 4. Микроструктура поперечного сечения частиц порошка, полученных распылением проволоки микроплазменной струей: а — вольфрам, X400; б — медь, X400; в — никром, X250; з — сталь (0,65 % C, 1 % Mn), X200

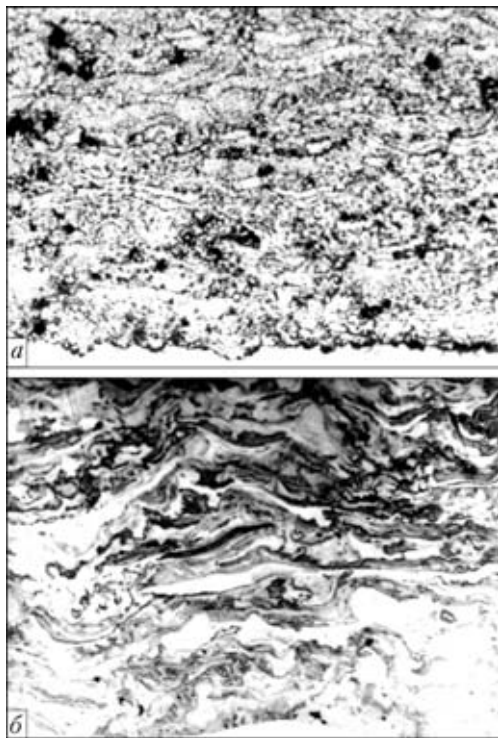


Рис. 5. Микроструктура (X200) плазменных покрытий, полученных методом микроплазменного распыления проволок из вольфрама (травленное) (а) и меди (нетравленное) (б)

В результате экспериментов по определению оптимальных условий микроплазменного напыления покрытий с использованием проволок из различных материалов и при разном диаметре проволоки установлены зависимости расходов плазмообразующего и защитного газов, напряжения и тока, диаметра и скорости подачи проволоки от материала проволоки. Результаты экспериментов приведены в табл. 2.

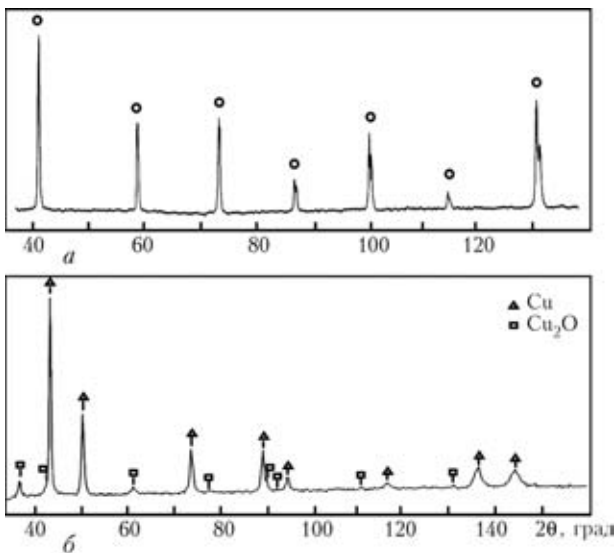


Рис. 6. Фазовый состав покрытий из вольфрама (а) и меди (б), полученных методом микроплазменного распыления проволок из материалов

Микроструктура плазменных покрытий, полученных при распылении проволок из вольфрама и меди, представлена на рис. 5.

Покрытие из вольфрама толщиной 1,0 мм имеет достаточно плотную структуру, без сколов и трещин, хорошо прилегает к основе. Структура lamellarная. Внутренняя структура lamелей мелкодисперсная, местами столбчатая. Толщина lamелей 5...10 мкм. Согласно данным рентгеноструктурного фазового анализа (рис. 6, а) покрытие содержит одну фазу — вольфрам. Микротвердость покрытия из вольфрама составляет 1880...2060 МПа.

Медное покрытие (рис. 5, б) толщиной 0,5 мм, как и вольфрамовое, имеет плотную структуру, без сколов и трещин, хорошо прилегает к основе. Структура lamellarная гетерогенная. Толщина lamелей 5...30 мкм. Основной фазой покрытий является медь (рис. 6, б), кроме того, имеются включения Cu_2O и области эвтектики $Cu-Cu_2O$. Микротвердость покрытия из меди составляет 450...610 (медь), 870...910 (Cu_2O); 1000...1100 МПа (эвтектика $Cu-Cu_2O$).

Выводы

1. Факторами, влияющими на процесс микроплазменного напыления с использованием проволок из различных материалов, являются сила тока, расход плазмообразующего газа, диаметр проволоки и скорость ее подачи. Анализ условий отрыва капли при микроплазменном распылении проволоки показал, что в этом случае необходимым является использование проволок малого диаметра (0,2...0,4 мм) и применение повышенных скоростей подачи проволоки (5...10 м/мин).
2. Расход плазмообразующего газа (аргона) связан с диаметром проволоки и поверхностным натяжением расплава металла. Установлена зависимость необходимой скорости плазменной струи, при которой обеспечиваются оптимальные условия образования капли расплава на торце проволоки и последующего дробления (диспергации), от поверхностного натяжения расплава разных металлов.
3. При распылении проволоки содержание частиц размером менее 63 мкм в случае меди составляет 85, стали и нихрома — 75, вольфрама — 35 мас. %. Форма частиц близка к сферической.
4. Анализ микроструктуры покрытий показал, что микроплазменное покрытие, полученное распылением проволоки, имеет плотную структуру (с толщиной lamелей 5...30 мкм) при невысокой степени окисления материала, что связано с применением защитного газа.

1. Газотермические покрытия из порошковых материалов / Ю. С. Борисов, Ю. А. Харламов, С. Л. Сидоренко, Е. Н. Ардатовская: Справочник. — Киев: Наук. думка, 1987. — 544 с.



2. Борисов Ю. С., Борисова А. Л. Плазменные порошковые покрытия. — Киев: Техніка, 1986. — 223 с.
3. Краснов А. Н., Шаривкер С. Ю., Зильберберг В. Г. Низкотемпературная плазма в металлургии. — М.: Металлургия, 1970. — 216 с.
4. Microplasma spraying / K. Yushchenko, Yu. Borisov, Yu. Pereverzev et al. // Proc. of the 14th Intern. thermal spray conf., Kobe, 1995. — P. 237–274.
5. Investigation of the microplasma spraying processes / Yu. Borisov, I. Sviridova, S. Voynarovich et al. // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Essen, 2002. — P. 335–338.
6. Microplasma spraying of bioceramic coatings / V. Bobrik, S. Voynarovich, N. Ulianchich et al. // Proc. of the Intern. thermal spray conf., Orlando, 2003. — Vol. 1. — P. 553–558.
7. Пат. Украины 1848 В23К10/00. Плазматрон для напыления покрытий / Ю. С. Борисов, С. Г. Войнарович, А. А. Фомакин, К. А. Ющенко. — Оpubл. 16.06.2003, Бюл. № 6.
8. Борисов Ю. С., Кислица А. Н. Микроплазменное напыление с использованием проволоочных материалов // Автомат. сварка. — 2002. — № 3. — С. 54–55.
9. Microplasma wire spraying / Yu. Borisov, A. Kislitsa, S. Voynarovich // Proc. of the Intern. thermal spray conf. and exposition ITSC 2004 «Thermal Spray Solutions Advances in Technology and Application», Osaka, Japan, 2004.
10. Образование частиц при плавлении проволоки в плазменном потоке / Г. В. Бобров, В. И. Привезенцев, Л. В. Умнова, Н. С. Суров // Порош. металлургия. — 1969. — 77, № 5. — С. 104–111.
11. К механизму плазменного распыления проволоки / В. А. Петруничев, В. В. Титков // Физ. и химия обработки металлов. — 1977. — № 1. — С. 14–16.

The technology for microplasma spraying of coatings provides a small size of the spraying spot (several millimetres), is characterised by small dimensions of the equipment involved and a low level of noise. Microplasmatron with a special wire feed device has been designed to utilise wire as a source material for spraying. Structure and properties of coatings produced by the microplasma method using Mo, W, Ti, Ni-Cr, brass, Al and steel wires have been investigated. The investigation results prove the possibility of utilising this method for production of dense coatings, the spraying spot ranging from 3 to 8 mm.

Поступила в редакцию 18.02.2005



МЕЖДУНАРОДНАЯ ВЫСТАВКА «КОРРОЗИЯ-2006»

6–8 июня 2006 г.

г. Львов

Организаторы: Европейская коррозионная федерация, Национальная академия наук, Министерство образования и науки, Министерство промышленной политики Украины, Украинская ассоциация коррозионистов, Физико-механический институт им. Г. В. Карпенко НАН Украины

Тема выставки:

- оборудование для подготовки поверхности перед нанесением покрытий;
- технологии и оборудование для нанесения защитных металлических, полимерных и лакокрасочных покрытий;
- противокоррозионные и защитные материалы;
- оборудование для электрохимзащиты металлоконструкций;
- средства неразрушающего контроля и технической диагностики;
- приборы и методы для оценки коррозионной стойкости материалов;
- ингибиторы и биоциды;
- экологические аспекты противокоррозионной защиты

Одновременно с выставкой пройдет 8-я Международная научная конференция «Проблемы коррозии и противокоррозионной защиты конструкционных материалов».

Контактные телефоны: (0322) 63-15-77; 229 62 53; факс (0322) 63 15 77.
E-mail: pokhmurs@ipm.lviv.ua, kornii@ipm.lviv.ua