

видимый факел, к тому же буквально после нескольких включений наблюдалось сильное оплавление (рис.1) гайки-завихрителя, что делает невозможным её (и следовательно плазмотрона ВПР-15) дальнейшее использование.

В связи с данными обстоятельствами было принято решение об изменении конфигурации формирующей системы для требуемого расхода плазмообразующего газа. Корпус ВПР-15 оставлен прежним, замене подлежал катодный узел. Вместо термического (пленочного) катода использовался вольфрамовый стержень диаметром 1,5 мм определенной длины и соответствующая по геометрии катодно – сопловой камеры медная гайка завихритель, содержащая прорезанные каналы для плазмообразующего газа (рис.2).

Оптимизированные характеристики модернизированного плазмотрона ВПР-15 для плазменной термообработки были следующие:

- ток прямой дуги – 90-100 А;
- ток косвенной дуги – 20-40А;
- длина канала сопла – 3,5 мм;
- расстояние между катодом и соплом – 4 мм;
- расход плазмообразующего газа – 4-5 л/мин.

С усовершенствованным для решения задач поверхностного термического упрочнения плазмотроном ВПР-15 был проведен ряд экспериментов по закалке образцов стальных поверхностей (Ст.3 и 60ПП). Получены вполне обнадеживающие результаты. В частности, на стали 60ПП ширина дорожки в результате плазменной закалки составляла ~5 мм, глубина зоны термического влияния доходила до 1,5 мм, микротвердость - до 10000 МПа. После плазменного модифицирования ширина дорожки составляла ~4 мм, глубина зоны термического влияния ~1,1мм, микротвердость - до 13000 МПа. Структура вблизи поверхности представляла собой игольчатый мартенсит, далее наряду с мартенситом появлялся троостит, а затем также и феррит. В процессе дальнейшей эксплуатации планируется произвести оценку ресурса работы модернизированного плазмотрона, в частности, подбором оптимального теплового режима минимизировать неизбежную эрозию катода, возникающую вследствие наличия 1-2 % кислорода в плазмообразующем газе.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Эсибян Э.М. Воздушно-плазменная резка: состояние и перспектива.// Автоматическая сварка. 2000, №12, С.6-20. 2. Аппарат А 16 12 УХЛ4 для воздушно-плазменной резки металлов «Киев-4М». Техническое описание и инструкция по эксплуатации. Институт электросварки им. Е.О. Патона.

УДК 621.793

*Акулович Л.М., Миранович А. В.*

## ИССЛЕДОВАНИЕ СВОЙСТВ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ НАПЛАВКОЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
Минск, Республика Беларусь*

**Введение.** Механизм нанесения покрытий при наплавке в электрическом и магнитном полях состоит из двух основных этапов: формирования межэлектродных токопроводящих цепочек из частиц ферромагнитного порошка; расплавление частиц порошка под действием электрического тока, проходящего по образовавшимся цепочкам, и нанесение расплава на упрочняемую поверхность.

На первом этапе превалирует действие на процесс наплавки магнитного поля, на втором – электрического. Генератором магнитного поля являются электромагнитные катушки (ЭМ) [1] или постоянные магниты (ПМ) [2].

Отличительной особенностью магнитного поля, генерируемого ЭМ, является наличие переменной составляющей величины напряженности магнитного поля, которая оказывает основное влияние на величину силы, прижимающей частицу порошка к упрочняемой поверхности [3]

$$f_{\varphi} = \frac{4}{3} \sum_{i=1}^n \frac{\mu \Delta_i^2 b_i K H_i}{R_i + \Delta_i},$$

где  $n$  – число частиц в цепочке;  $R_i$  – расстояние от границы  $i$ -й частицы до оси упрочняемой поверхности, м;  $\Delta_i$ ,  $b_i$  – размеры большой и малой осей эллипсоида, описывающего  $i$ -ю частицу, м;  $\mu$  – магнитная проницаемость порошкового материала, Гн/м;  $K$  – магнитная восприимчивость материала порошка, Гн/м;  $H_i$  – напряженность магнитного поля у верхней границы зерна, А/м.

В свою очередь, изменение силы  $f_{\varphi}$  влияет на стабильность электрической проводимости цепочек из частиц порошка и на свойства полученных покрытий. В связи с этим в задачу исследований входило сравнительное изучение пористости и микротвердости покрытий, нанесенных на установках с магнитными системами (МС) на электро- и постоянных магнитах.

**Методики проведения исследований микротвердости и пористости покрытий.** В качестве образцов использовались кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой 12 мм из стали 45 ГОСТ 1050 – 88, микроструктура которых в исходном состоянии представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. Твердость – 240 НВ.

Микротвердость измеряли на приборе ПМТ – 3 по стандартной методике. Толщину диффузионных слоев и зоны термического влияния измеряли по распределению микротвердости в сечении образцов при помощи окулярной вставки со шкалой и увеличением  $\times 200$ .

Изучение открытой пористости образцов проводилось на поверхности покрытий нетравленных микрошлифов. Исследование выполнялось на автоматическом анализаторе изображения «Mini MagiScan» фирмы «Jouze Loebel» с компьютерной обработкой данных по программе количественного анализа. Определение пористости покрытий и размера пор состояло из следующих этапов: калибровка и фиксация изображения; сегментирование; выбор необходимых измерений.

При этом в автоматическом режиме измерялась площадь пор и вычислялась по программе на ЭВМ поверхностная (открытая) пористость  $\Pi$ , измеряемая в процентах

$$\Pi = \frac{F_p}{F_{\Sigma}} \cdot 100\%$$

где  $F_p$  – площадь пор, мм<sup>2</sup>;  $F_{\Sigma}$  – общая видимая площадь поля, мм<sup>2</sup>.

Объемную пористость покрытий определяли методом гидростатического взвешивания [1]. Насыщающей жидкостью служил керосин, в котором время выдержки образцов при температуре 18 °С составляло 24 ч. Объемная пористость  $\Pi$  определялась по формуле

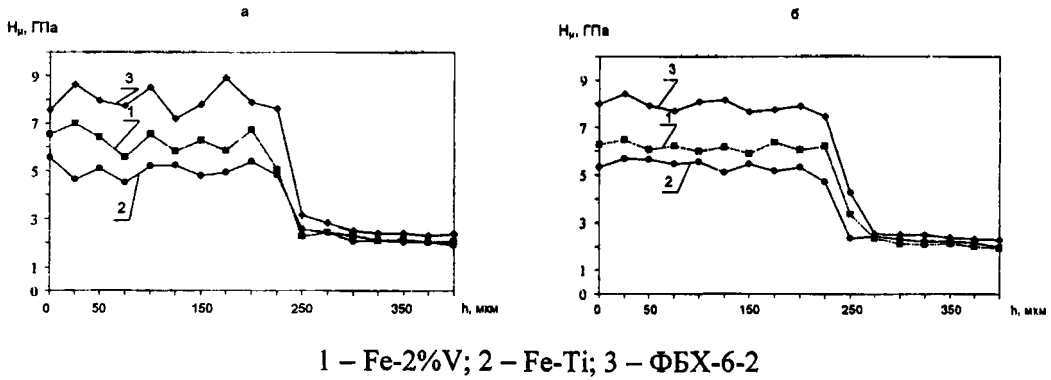
$$\Pi = \frac{(m_1 - m_2)}{\rho_{\zeta}} \cdot \frac{1}{V} \cdot 100\%$$

где  $m_1$ ,  $m_2$  – масса покрытия до и после пропитки соответственно, кг;  $\rho_{\zeta}$  – плотность насыщающей жидкости, кг/м<sup>3</sup>;  $V$  – объем покрытия, м<sup>3</sup>.

Исследования проводились на пяти образцах с нанесенными покрытиями из композиционных порошков Fe – 2%V, Fe – Ti и ФБХ 6-2 для каждого вида магнитной системы.

**Микротвердость и пористость покрытий.** На рисунке 1 представлены зависимости распределения микротвердости по глубине наплавленного слоя. Анализ результатов позволяет сделать вывод, что твердость изменяется по трем выраженным участкам: покрытие, зона термического влияния и основа. Установлено, что для слоев, полученных наплавкой с МС на ПМ, колебания микротвердости по толщине являются небольшими и значения микротвердости находятся в пределах 4,5 ... 6,0 ГПа для покрытий из порошков Fe – 2%V и Fe – Ti, для покрытия из порошка ФБХ 6-2 в пределах 7,3 ... 8,7 ГПа. Обусловлено это формированием в результате скоростного охлаждения более однородной мелкодисперсной структуры. Для покрытий, полученных наплавкой с МС на ЭМ, колебания микротвердости по толщине более существенны и значения микротвердости находятся в пределах 4,5 ... 7,0 ГПа для покрытий из порошков Fe – 2%V, Fe – Ti и 7,0 ... 9,1 ГПа для покрытия из порошка ФБХ 6-2. Это связано с тем, что в наплавленном слое присутствует разветвленная пористость. Максимальная твердость наблюдается у покрытий из порошка ФБХ 6-2, полученных наплавкой с МС на ЭМ и ПМ, что обусловлено присутствием в структуре слоев закалочного мартенсита и комплексных боридов хрома CrB<sub>2</sub>, Cr<sub>3</sub>B<sub>3</sub>, ферроборида Cr<sub>1,65</sub>Fe<sub>0,35</sub>B<sub>0,96</sub>, а также боридов на основе железа FeB и FeB<sub>2</sub>. При этом в покрытиях, полученных наплавкой с МС на ЭМ (рисунок 1, а), наблюдаются пики микротвердости, что указывает о повышенном содержании углерода в слое вследствие проплавления основы. Толщина слоев покрытий

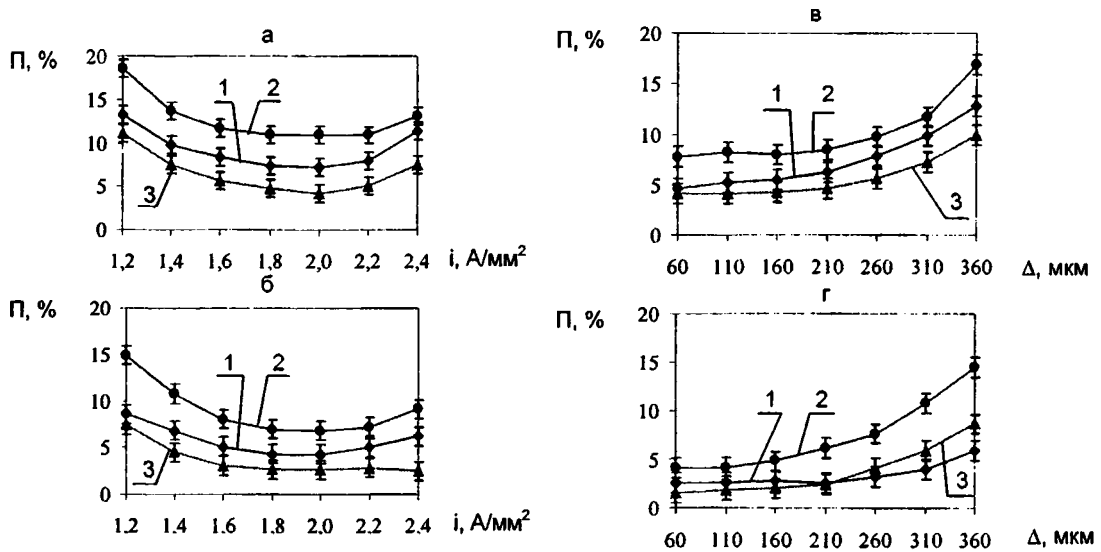
находится в пределах 200 ... 300 мкм.



1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2  
 Рисунок 1 – Распределение микротвердости по толщине наплавленного слоя, полученного наплавкой с использованием магнитных систем на ЭМ (а) и ПМ (б) композиционных порошков

Участок зоны термического влияния (ЗТВ) для исследуемых покрытий, полученных наплавкой с МС на ЭМ, характеризуется немонотонным изменением микротвердости в связи с образованием структуры полной закалки и резким переходом до твердости исходного образца. При этом толщина ЗТВ составляет примерно 60 ... 90 мкм. Наплавленные слои, полученные наплавкой с МС на ПМ, отличаются тем, что микротвердость меняется более плавно (рисунок 1, б), а протяженность ЗТВ находится в пределах 80 ... 110 мкм. Это связано, по-видимому, с тем, что происходит более полное протекание процесса закалки в результате более длительного термического воздействия ванны расплава композиционного порошка на прилежащие к этой зоне поверхностные слои.

Известно [1], что наибольшее влияние на пористость покрытий оказывают плотность разрядного тока и размер зерен композиционного порошка, так как первый параметр характеризует условие нагрева и последующего плавления цепочек микроэлектродов порошка в рабочем зазоре, а второй – плотность распределения жидкой фазы порошка по толщине покрытия.



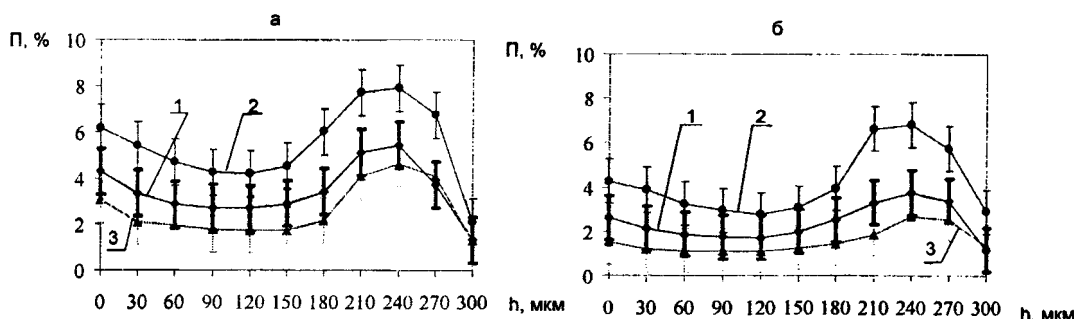
1 – разброс значений объемной пористости для композиционных порошков

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 2 – Зависимость объемной пористости покрытий П от плотности разрядного тока  $i$  (а, б), размера частиц порошка  $\Delta$  (в, г), полученных наплавкой с применением МС на ЭМ (а, в) и ПМ (б, г) композиционных порошков

В связи с этим проводились исследования зависимости пористости покрытий из порошков Fe-2%V, Fe-Ti и ФБХ-6-2 от плотности разрядного тока  $i$  и размера частиц композиционного порошка. Анализ результатов исследований (рисунок 2) показал, что объемная пористость покрытий

в зависимости от технологических факторов и материала покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ЭМ и ПМ, может меняться в пределах 5,0 ... 18,0 % и 3,0 ... 14,0 % соответственно. Более низкая объемная пористость покрытия из порошка ФБХ-6-2 по сравнению с другими покрытиями объясняется высокой химической активностью хрома и бора, которые активизируют процесс уплотнения наплавленного слоя за счет увеличения жидкотекучести расплава и более полного вывода шлаков и газов. Наибольшее влияние на объемную пористость оказывает плотность разрядного тока, наименьшее – размер частиц композиционного порошка. Результаты исследований показывают, что повышение температуры наплавки за счет увеличения плотности разрядного тока от 1,2 до 2,0 А/мм<sup>2</sup> приводит к снижению пористости покрытий от 18,0 до 3,0 % в результате уменьшения промежутков между каплями расплава частиц порошка. Однако при температуре, превышающей температуру плавления частиц порошка, происходит увеличение пористости в результате увеличения растворимости газов. Изменение размеров частиц порошка от 360 до 180 мкм приводит к снижению пористости в 1,35 раза.



I – разброс значений пористости для различных порошков

1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 3 – Распределение пористости по глубине покрытий, полученных наплавкой с использованием МС на ЭМ (а) и ПМ (б) композиционных порошков

Покрытия, полученные наплавкой на установках с МС на ЭМ и ПМ на оптимальных режимах, имеют объемную пористость в пределах 5,0 ... 12,0 % и 3,0 ... 7,0 % соответственно.

Анализ результатов исследований распределения пор по глубине покрытий (рисунок 3) показал, что наибольшая пористость находится на границе покрытия и основы. Это объясняется тем, что в процессе нанесения покрытий происходит захлопывание газа каплями расплава порошка на поверхности заготовки и усадка при переходе жидкой фазы в твердую в результате уменьшения растворимости газов при отводе тепла в основу.

В большинстве случаев на границе покрытия и основы фиксируются шаровидные поры

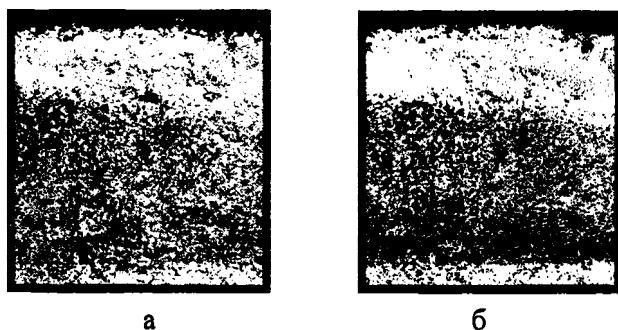


Рисунок 4 – Фотографии пористой микроструктуры покрытий, полученных наплавкой композиционного порошка Fe – Ti (×200) с использованием установок с МС на ЭМ (а) и ПМ (б)

размером 10 ... 20 мкм (рисунок 4). Следует отметить, что повышенная пористость наблюдается и в поверхностных слоях покрытий. В большей степени она выражена для покрытия, полученного наплавкой порошка Fe-Ti, в меньшей – для покрытия из порошка ФБХ-6-2. При этом открытая пористость образуется по границам застывших капель расплава порошка в виде продолговатых округлых пор. Поры размером 20 ... 30 мкм распределены по поверхности покрытия неравномерно.

Таблица – Открытая пористость покрытий  
из композиционных порошков

Материал покрытия	Открытая пористость, %		
	min	max	средняя
Наплавка с применением ЭМ			
Fe-2%V	4,0	8,0	6,0
Fe-Ti	6,0	11,0	8,5
ФБХ-6-2	4,0	7,5	5,5
Наплавка с применением ПМ			
Fe-2%V	3,0	6,0	4,5
Fe-Ti	5,0	9,0	7,0
ФБХ-6-2	2,0	5,0	3,5

Анализ результатов исследований показал, что открытая пористость покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ЭМ и ПМ, находится в пределах 4,0 ... 12,0 % и 2,0 ... 9,0 % соответственно. Это свидетельствует о работоспособности покрытий, в особенности, при трении с ограниченной смазкой, так как поры являются аккумуляторами смазочного материала. Меньший предел значений открытой пористости покрытий, полученных наплавкой с применением ПМ, обеспечивается за счет уменьшения градиента плотности подводимого теплового потока и скорости охлаждения покрытий. Это достигается при следующем режиме наплавки: расход рабочей жидкости  $q = 0,9 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3/(\text{с} \cdot \text{мм}^2)$ ; плотность разрядного тока  $i = 1,65 \text{ А/мм}^2$ ; величина рабочего зазора  $\delta = 1,5 \text{ мм}$ ; скорость подачи  $S = 0,15 \text{ мм/об}$ ; окружная скорость заготовки  $V = 0,050 \text{ м/с}$ ; расход порошка  $q = 2,75 \cdot 10^{-3} \text{ г/с} \cdot \text{мм}^2$ .

**Заключение.** На основании полученных результатов исследований физико-механических свойств покрытий можно сделать следующие выводы:

1 Покрытия, полученные наплавкой на установках с МС на ЭМ и ПМ на оптимальных режимах, имеют объемную пористость в пределах 5,0 ... 12,0 % и 3,0 ... 7,0 % соответственно. Показано, что открытая пористость покрытий, полученных наплавкой с использованием установок с МС на ЭМ и ПМ, находится в пределах 4,0 ... 12,0 % и 2,0 ... 9,0 % соответственно.

2 Изменение микротвердости по толщине покрытий, полученных наплавкой с МС на ПМ, находятся в пределах 4,5 ... 6,0 ГПа для покрытий из порошков Fe – 2%V и Fe – Ti, для покрытия из порошка ФБХ 6-2 в пределах 7,3 ... 8,7 ГПа, что обусловлено формированием в процессе наплавки более однородной мелкодисперсной структуры. Для покрытий, полученных наплавкой с МС на ЭМ, колебания микротвердости по толщине более существенны и значения микротвердости находятся в пределах 4,5 ... 7,0 ГПа для покрытий из порошков Fe – 2%V, Fe – Ti и 7,0 ... 9,1 ГПа для покрытия из порошка ФБХ 6-2, что связано с присутствием в наплавленном слое разветвленной пористости.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ракомсин А. П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / Под ред. П. А. Витязя. – Мн.: Парадокс, 2000. – 201 с. 2. Мрочек Ж. А., Кожуро Л. М., Миранович А. В. Использование постоянных магнитов в устройствах электромагнитной наплавки // Теория и практика машиностроения. – 2004. – № 3. – С. 75 – 84. 3. Акулович Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.