

УДК 621.793

## ТЕХНОЛОГИЯ НАНЕСЕНИЯ ЗАЩИТНЫХ ПОКРЫТИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ И ЭНЕРГИИ ПОСТОЯННЫХ МАГНИТОВ

**Акулович Л.М., д.т.н, профессор; Миранович А.В., ст. преподаватель**  
(Учреждение образования «Белорусский государственный аграрный  
технический университет», Республика Беларусь)

*Рассматриваются физико-механические свойства покрытий, нанесенных с использованием электрических разрядов и энергии электрических и постоянных магнитов на поверхности металлических образцов. Выявлена взаимосвязь показателей свойств покрытий и конструктивного исполнения магнитных систем для наплавки.*

**Введение.** Для повышения износостойкости посадочных поверхностей деталей автотракторной техники и рабочих органов землеобрабатывающих машин применяют методы упрочнения, использующие высокоинтенсивные источники энергии (плазменная, индукционная, лазерная наплавки и др.). Одним из них является электромагнитная наплавка (ЭМН) [1].

Известно [2, 3], что формирование покрытий на поверхности изделий происходит в рабочей зоне (РЗ) – пространстве, ограниченном полюсными наконечниками и деталью, в котором образуется многоэлектродная система из частиц ферропорошка в результате воздействия на них электрического и магнитного полей. Механизм нанесения покрытий состоит из двух основных этапов: формирование межэлектродных токопроводящих цепочек из частиц ферропорошка под действием магнитного поля; расплавление частиц порошка под действием электрического тока. При этом усилие прижима частицы порошка к упрочняемой поверхности определяется по формуле [3]

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

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.

Источниками магнитного поля в рабочей зоне устройств ЭМН являются электромагнитные катушки (ЭМ) [1] или постоянные магниты (ПМ) [2].

Установлено [3], что электромагнитные катушки создают пульсирующее магнитное поле, которое приводит к нестабильности электрической проводимости цепочек из частиц порошка и свойств полученных покрытий. Для устранения этого недостатка применяются магнитные системы МС с постоянными магнитами, которые обеспечивают в РЗ неизменную во времени величину магнитной индукции и исключают необходимость синхронизации электрических импульсов источника технологического тока и электромагнитов [4]. В связи с этим в задачу исследований входило сравнительное изучение микротвердости, толщины, сплошности и пористости покрытий из композиционных ферромагнитных порошков (Fe-2%V; Fe-Ti; ФБХ-6-2), нанесенных на установках ЭМН с магнитными системами на электрических 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 измерялась на приборе ПМТ – 3 по стандартной методике.

Измерение толщин покрытий осуществлялось на шлифах поперечного среза при помощи оптического микроскопа, имеющего диапазон увеличения  $\times 200$ . При этом относительная погрешность измерений составляла  $\pm 10\%$ . Выполнялось не менее десяти измерений местных толщин по всей длине шлифа. Равномерность (колебания) толщины покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца [5].

Предварительная оценка сплошности покрытий выполнялась визуально с использованием лупы 4-7 кратного увеличения, точная – по фотографиям шлифов поперечного среза. Сплошность покрытий  $G$  определяется в процентах по формуле [2]

$$G = \frac{L_{\text{сп}}}{L_{\Sigma}} \cdot 100\%$$

где  $L_{\text{сп}}$  – суммарная протяженность участков с покрытиями, мм;  $L_{\Sigma}$  – общая протяженность исследуемого участка, мм.

Объемную пористость покрытий определяли методом гидростатического взвешивания [5]. Насыщающей жидкостью служил керосин, в котором время выдержки образцов при температуре  $18^{\circ}\text{C}$  составляло 24 ч. Объемная пористость  $\Pi$  определялась по формуле:

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

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

Количественный стереологический анализ открытой пористости покрытий выполнялся по программе количественного анализа «Genias 26» на автоматическом анализаторе изображения «Mini MagiScan» фирмы «Jouze Loebl» (Англия). В автоматическом режиме измерялась площадь пор и определялась поверхностная пористость  $\Pi$ , измеряемая в процентах

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

где  $F_{\text{п}}$  – площадь пор,  $\text{мм}^2$ ;  $F_{\Sigma}$  – общая видимая площадь поля,  $\text{мм}^2$ .

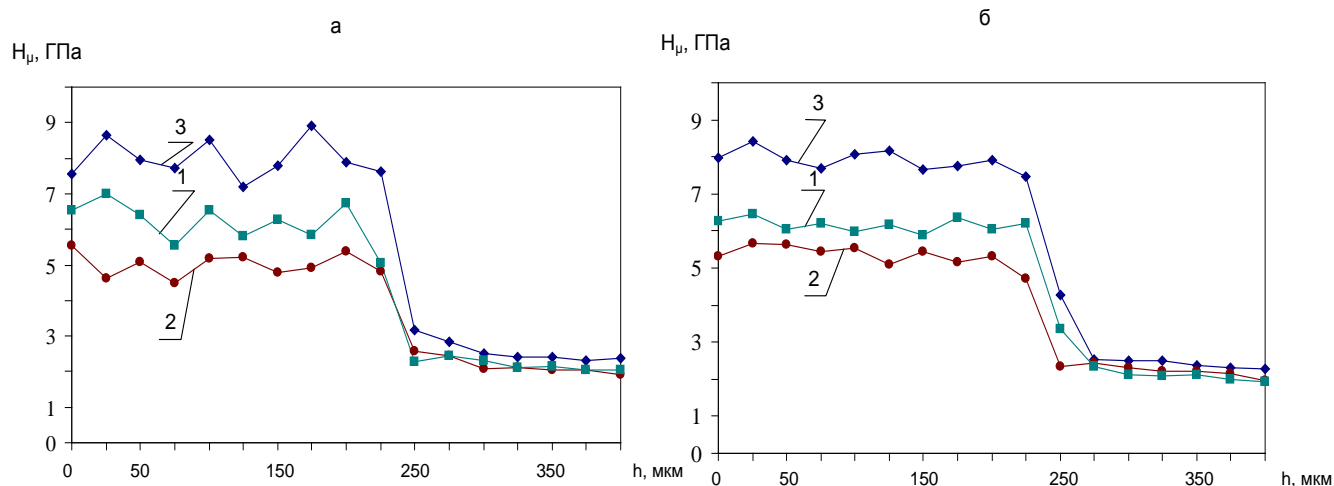
В работе исследование пористости выполнялось с помощью оптического микроскопа, имеющего диапазон увеличения  $\times 200$ . Пористость одного образца определялась по результатам изучения пяти визуально выбранных характерных участков покрытия. При этом погрешность измерений составляла  $\pm 2,5\%$  от средней величины параметра (процента пористости).

#### **Микротвердость, толщина, сплошность и пористость покрытий.**

Анализ результатов распределения микротвердости по глубине наплавленного слоя (рисунок 1) 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  $\text{CrB}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{B}_3$ , ферроборида  $\text{Cr}_{1,65}\text{Fe}_{0,35}\text{B}_{0,96}$ , а также боридов на основе железа FeB и  $\text{FeB}_2$ . 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.

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 протяженність ЗТВ знаходиться в межах 80 ... 110 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

Известно [2], что исходя из равномерности распределения толщины покрытия можно судить об устойчивости технологического режима наплавки. Анализ результатов измерений (таблица 1) показал, что толщина покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ЭМ и ПМ, находится в пределах 237,0 ... 270,0 мкм и 240,0 ... 289,0 мкм соответственно.

Таблица 1 – Толщина покрытий и равномерность толщины покрытий из ферромагнитных порошков

Материал покрытия	Средняя толщина покрытия, мкм	Колебания толщины покрытия, мкм	Средняя толщина покрытия, мкм	Колебания толщины покрытия, мкм
	ЭМН с МС на ЭМ		ЭМН с МС на ПМ	
Fe-2%V	260,0	41,0	289,0	34,0
Fe-Ti	237,0	55,0	240,0	50,0
ФБХ-6-2	270,0	46,0	281,0	37,0

Установлено, что наибольшая толщина наблюдается для покрытий из ферромагнитных порошков Fe-2%V и ФБХ-6-2, полученных наплавкой на установках с МС на ПМ, а колебания толщины на 17,1 ... 19,5 % меньше по сравнению с аналогичной характеристикой покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ЭМ. Более равномерная толщина покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ПМ, свидетельствует о стабильности процесса ЭМН.

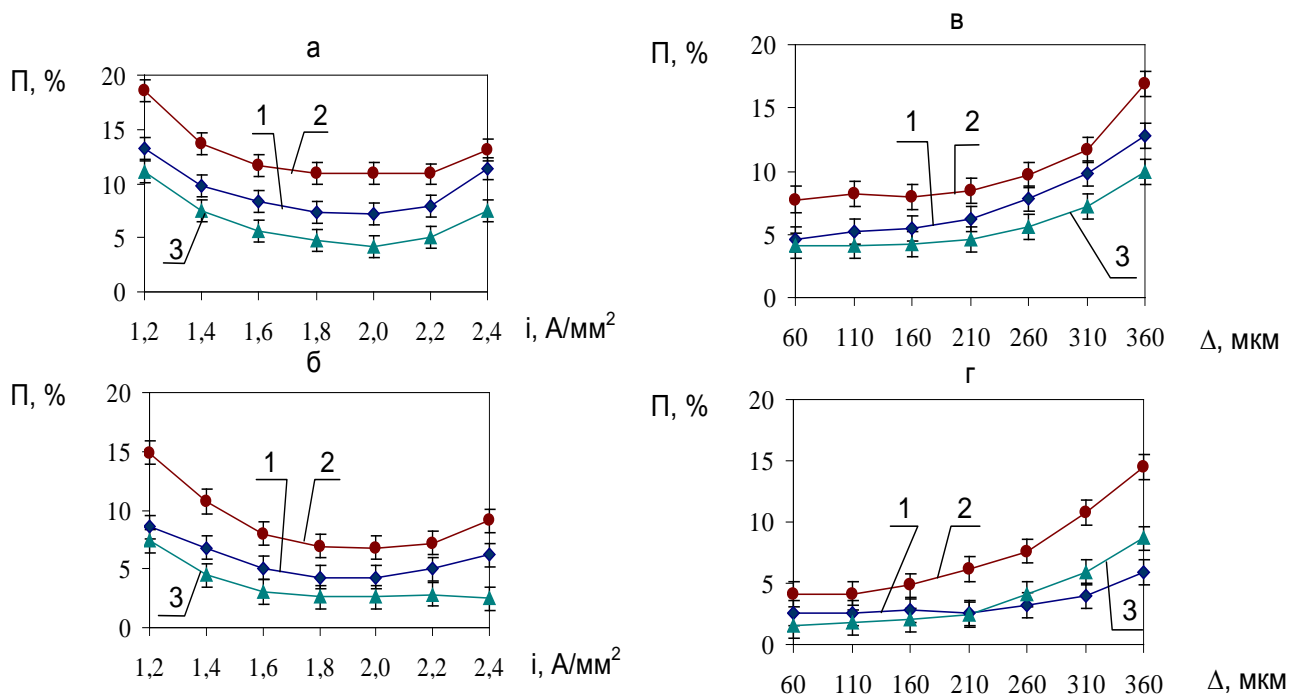
Анализ результатов исследований (таблица 2) показал, что средняя сплошность покрытий, полученных наплавкой на установках с МС на ЭМ и

ПМ, знаходиться в межах 81,7 ... 91,9 % і 90,9 ... 98,2 % відповідно. Для покриття, отриманого наплавкою порошка ФБХ-6-2, в окремих випадках спостерігається максимальна щільність покриттів на рівні 100 %. При цьому в поверхневих шарах покриттів спостерігається нерівномірно розподілена пористість, яка утворюється по границям застиглих крапель расплава ФМП в вигляді подовговатих округлих пор розміром 20 ... 30 мкм.

Таблиця 2– Щільність покриттів із композиційних порошоків

Матеріал покриття	Середня щільність покриття, %	
	ЭМН с МС на ЭМ	ЭМН с МС на ПМ
Fe-2%V	91,1	96,5
Fe-Ti	81,2	90,9
ФБХ-6-2	89,9	98,2

Результати досліджень (рисунок 2) показують, що об'ємна пористість покриттів в залежності від технологічних факторів і матеріала покриттів, отриманих наплавкою на установках с МС на ЭМ і ПМ, змінюється в межах 5,0 ... 18,0 % і 3,0 ... 14,0 % відповідно.



I – розброс значень об'ємної пористості для композиційних порошоків

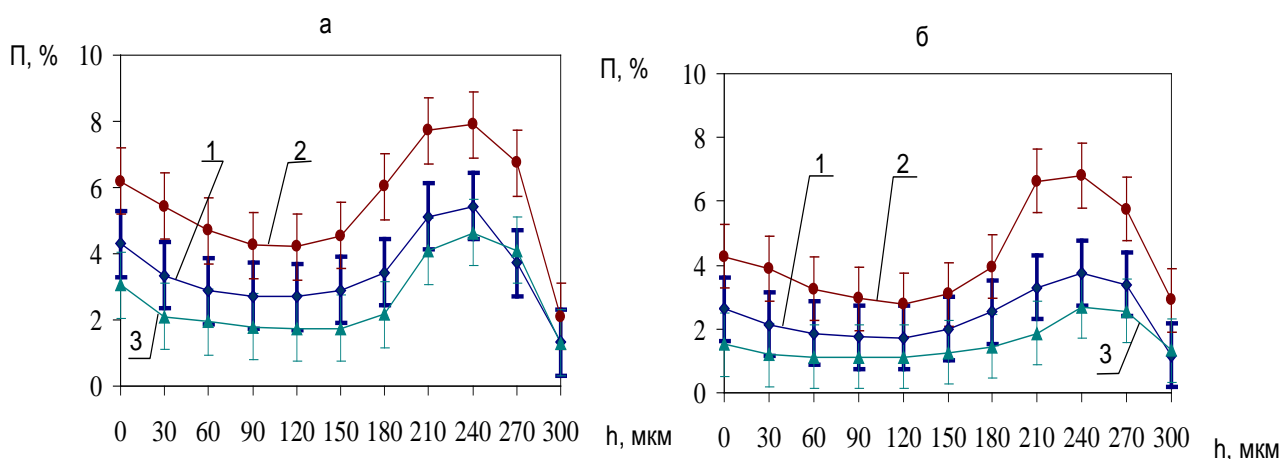
1 – Fe-2%V; 2 – Fe-Ti; 3 – ФБХ-6-2

Рисунок 2 – Залежність об'ємної пористості покриттів П від густоти розрядного струму  $i$  (а, б), розміру частинок порошка  $\Delta$  (в, г), отриманих наплавкою з використанням МС на ЭМ (а, в) і ПМ (б, г) композиційних порошоків

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.

Покрyтия, 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.



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

Преимущественно на границе покрытия и основы фиксируются продолговатые шаровидные поры размером 10 ... 20 мкм (рисунок 4). Следует отметить, что 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.



Рисунок 4 – Фотографії пористої мікроструктури покриттів, отриманих наплавкою композиційного порошку Fe – Ti ( $\times 200$ ) з використанням установок з МС на ЕМ (а) і ПМ (б)

**Заключення.** На основі отриманих результатів досліджень якісних характеристик покриттів можна зробити наступні висновки:

1 Покриття, отримані наплавкою на установках з МС на ЕМ і ПМ на оптимальних режимах, мають об'ємну пористість в межах 5,0 ... 12,0 % і 3,0 ... 7,0 % відповідно. Показано, що щільність покриттів, отриманих наплавкою на установках з МС на ЕМ і ПМ, знаходиться в межах 88,5 ... 93,5 % і 91,5 ... 98,0 % відповідно.

2 Зміна мікротвердості по товщині покриттів, отриманих наплавкою з МС на ПМ, знаходиться в межах 4,5 ... 6,0 ГПа для покриттів з порошків Fe – 2%V і Fe – Ti, для покриття з порошка ФБХ 6-2 в межах 7,3 ... 8,7 ГПа, що обумовлено формуванням в процесі наплавки більш однорідної мелкодисперсної структури. Для покриттів, отриманих наплавкою з МС на ЕМ, коливання мікротвердості по товщині більш суттєві і значення мікротвердості знаходяться в межах 4,5 ... 7,0 ГПа для покриттів з порошків Fe – 2%V, Fe – Ti і 7,0 ... 9,1 ГПа для покриття з порошка ФБХ 6-2, що пов'язано з присутністю в наплавленому шарі розгалуженої пористості.

3 Встановлено, що найбільша товщина спостерігається для покриттів з ферромагнітних порошків Fe-2%V і ФБХ-6-2, отриманих наплавкою на установках з МС на ПМ, а коливання товщини на 17,1 ... 19,5 % менше порівняно з аналогічною характеристикою покриттів, отриманих наплавкою на установках з МС на ЕМ. Більш рівномірна товщина покриттів, отриманих наплавкою на установках з МС на ПМ, що свідчить про стабільність процесу ЕМН.

**Список літератури:**

1. Ракомсин, А.П. Упрочнение и восстановление изделий в электромагнитном поле / А.П. Ракомсин ; под общ. ред. П.А. Витязя. – Минск : Парадокс, 2000. – 201 с.
2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : Полоц. госуд. ун-т, 1999. – 240 с.
3. Миранович, А.В. Повышение ресурсо- и энергосбережения процесса электромагнитной наплавки / А.В. Миранович, Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро // Тяжелое машиностроение. – 2006. – № 4. – С. 29 – 33.
4. Акулович, Л.М. Повышение качества покрытий при электромагнитной наплавке в постоянном магнитном поле / Л.М. Акулович, А.В. Миранович // Вестник ПГУ. Серия В. Промышленность. Прикладные науки. – 2008. – № 8. – С. 58 – 65.
5. Методы исследования материалов: структура, свойства и процессы нанесения неорганических покрытий / Л.И. Тушинский и [др.]. – М. : Мир, 2004. – 384 с.

**Анотація****ТЕХНОЛОГІЯ НАНЕСЕННЯ ЗАХИСНИХ ПОКРИТТІВ З  
ВИКОРИСТАННЯМ ЕЛЕКТРИЧНИХ РОЗРЯДІВ І ЕНЕРГІЮ  
ПОСТІЙНИХ МАГНІТІВ**

Акулович Л.М., д.т.н., професор; Міранович А.В.

*Розглядаються фізико-механічні властивості покриттів, нанесення з використанням електричних розрядів і енергії електричних і постійних магнітів на поверхні металевих зразків. Виявлено взаємозв'язок показників властивостей покриттів і конструктивного виконання магнітних систем для наплавлення.*

**Abstract****TECHNOLOGY APPLYING PROTECTIVE COATINGS USING ELECTRIC  
SHOCKS AND ENERGY OF PERMANENT MAGNETS**

Akulovich L., Miranovich A.

*The research physical and mechanical properties of coverings made by welding using electrical discharges, and the energy electric and constant magnets on the surface of metallic samples. The correlation between the performance properties of the coating and a design of magnetic systems for welding.*