

**КАЧЕСТВЕННЫЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПОКРЫТИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ КОМБИНИРОВАННОЙ  
МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКОЙ**

***Л.М. АКУЛОВИЧ, А.В. МИРАНОВИЧ, Д.Е. АФАНАСЕНКО***  
*Белорусский государственный аграрный технический университет,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Представлены результаты исследования микроструктуры, микро-  
твердости, объемной пористости и шероховатости поверхности покры-  
тий, полученных комбинированной магнитно-электрической обработкой.*

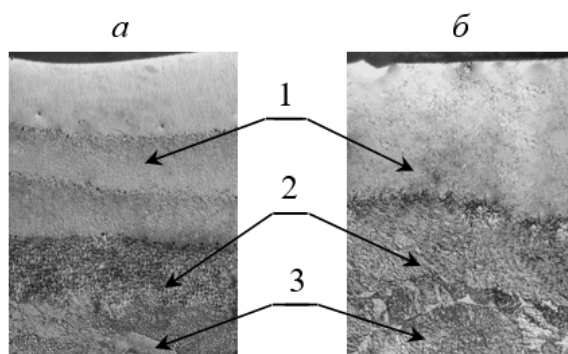
В последнее время для упрочнения и восстановления пустотелых и не-  
жестких деталей в условиях машиностроительного и ремонтно-восстано-  
вительного производства интенсивное развитие получили электрофизические  
методы [1], к числу которых относится магнитно-электрическое упрочнение  
(МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (КМП) [2, 3]. Суще-  
ственным недостатком практически всех металлических покрытий, полученных  
МЭУ на нежестких деталях, является наличие в них растягивающих остаточных  
напряжений, а также присутствие таких дефектов, как разнотолщинность, поры,  
несплошности и трещины [3, 4]. Решение этой проблемы возможно за счет фор-  
мирования покрытий путем совмещения магнитно-электрического упрочнения с  
абразивной обработкой и их последующей поверхностной пневмовибродинами-  
ческой обработкой (ПВДО), что позволяет в одной технологической схеме одно-  
временно обеспечить нанесение покрытий, смятие и сглаживание микронеров-  
ностей на поверхностях сформированных покрытий.

В соответствии с этим, **целью исследований** являлось изучение струк-  
туры, качественных характеристик покрытий, полученных комбинирован-  
ным способом МЭУ и поверхностной пневмовибродинамической обработки.

**Материалы, параметры процесса и методики проведения исследо-  
ваний.** Изучение качественных свойств покрытий, полученных последова-  
тельным нанесением паст, состоящих из КМП (ФБХ-6-2 и Fe-10%V) и свя-  
зующего (эпоксидная смола ЭДП, растворенная в жидком стекле (ТО РБ  
02974150 – 015 – 99), и их обработкой МЭУ с ПВДО на цилиндрические об-  
разцы из стали 45 (ГОСТ 1050-88). Микроструктура образцов после закалки  
представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. Упрочнение  
поверхностей выполнялось на оптимальных режимах: МЭУ – на установке  
модели УМЭУ-1 с одновременной обработкой формируемого покрытия ре-  
жущим абразивным кругом [2, 4]; ПВДО – специальным инструментом с ра-  
бочими телами (шариками радиусом 3 мм) и подачей сжатого воздуха под  
давлением 0,1 МПа [3, 4]. Микроструктура упрочненных поверхностных  
слоев изучались методом оптической металлографии поперечных шлифов с  
использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» и циф-

рового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость определялась на приборе ПМТ-3М по стандартной методике, толщина поверхностных слоев – по распределению микротвердости. Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P, объемной пористость покрытий – методом гидростатического взвешивания.

**Обсуждение результатов.** Микроструктурный анализ показал, что в покрытии из КМП ФБХ-6-2 упрочненный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения (рисунок 1, а). Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа ( $\text{Fe}_2\text{C}$ ), бориды ( $\text{FeB}$ ,  $\text{CrB}_2$ ,  $\text{Cr}_5\text{B}_3$ ) и ферробориды ( $\text{Cr}_{1,65}\text{Fe}_{0,35}\text{B}_{0,96}$ ). Толщина упрочненного слоя характеризуется расширенной зоной термического влияния (ЗТВ) вследствие улучшения условий теплопередачи от наносимого металла КМП к основе. Отмечается зона полной закалки со структурой мелкоигольчатого мартенсита, твердость которой несколько выше, чем у покрытия. При этом особенностью покрытия является его слабая травимось, которая связана с повышением плотности дефектов, вводимых в структуру аустенита и формированием на этой основе дислокационного мартенсита.



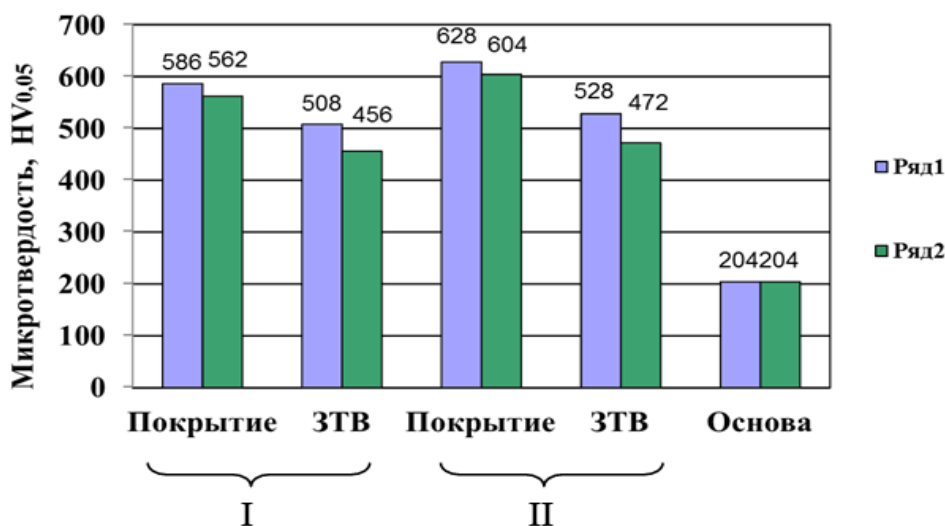
Покрытия ( $\times 200$ ) из КМП: а – ФБХ-6-2;  
б – Fe-10%V  
(1 – покрытие; 2 – ЗТВ; 3 – основа)

Рисунок 1. – Фотографии микроструктуры покрытий после МЭУ с ПВДО

Покрытие из КМП Fe-10%V характеризуется мелкодендритным строением (рисунок 1, б), основу которого составляет твердый раствор ванадия в  $\alpha$ -железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия ( $\text{V}_2\text{C}$ ,  $\text{V}_4\text{C}_{2,67}$ ) и железа ( $\text{FeC}$ ,  $\text{FeC}_8$ ). Для микроструктуры покрытий характерно образование малоуглеродистого мартенсита и наличие структурно-свободного  $\delta$ -феррита, на участках, прилегающих к основе. На самой границе с основой со стороны покрытия образуется тонкий слой со структурой полной закалки, что связано с диффузией углерода из материала основы в жидкую фазу покрытия.

Следует отметить, что покрытия из КМП ФБХ-6-2 и Fe-10%V, упрочненные МЭУ с ПВДО, по сравнению с МЭУ имеют более высокую плотность и однородность слоев с присутствующими более мелкими порами (менее 0,1 мкм) по границам зерен или ячеек, большую протяженность ЗТВ (более 400 мкм), менее выраженную поверхность раздела между покрытием

и основой. Это подтверждается результатами исследований микротвердости покрытий. Так, установлено, что наибольшее значение средней микротвердости (рисунок 2) наблюдается у покрытий из КМП ФБХ-6-2, полученных МЭУ с ПВДО, и составляет 628 HV<sub>0,05</sub>, что на 7,6% больше микротвердости покрытий, полученных МЭУ (580 HV<sub>0,05</sub>), и в 3,1 раза больше по сравнению с материалом основы (204 HV<sub>0,05</sub>).



Ряд: 1 – КМП ФБХ-6-2; 2 – КМП Fe-10%V ; ЗТВ – зона термического влияния

Рисунок 2. – Диаграмма результатов исследований микротвердости упрочненных поверхностей МЭУ (I), МЭУ с ПВДО (II)

Результаты исследований (таблица) показывают, что МЭУ с ПВДО покрытий по сравнению с МЭУ при уменьшении средней их толщины на 10,2 – 11,9 %, позволяет повысить качество упрочненных поверхностей за счет снижения их объемной пористости в 1,5 – 1,6 раза, средней шероховатости по параметру *Ra* в 2,3 – 2,9 раза.

Таблица 1. – Показатели качества упрочненных поверхностей

Материал КМП	Средняя толщина покрытий, мкм	Объемная пористость покрытий, %	Средняя шероховатость поверхности ( <i>Ra</i> ), мкм
Магнитно-электрическое упрочнение с обработкой абразивным кругом			
ФБХ-6-2	286	3,8	3,0
Fe-10%V	274	3,2	2,3
Магнитно-электрическое упрочнение с обработкой абразивным кругом и пневмовибродинамическим инструментом			
ФБХ-6-2	252	2,4	1,3
Fe-10%V	246	2,1	0,8

**Выводы.** В результате выполненных исследований установлено:

1. ПВДО покрытий после МЭУ позволяет получить более высокую плотность и однородность слоев с присутствующими более мелкими порами (менее 0,1 мкм) по границам зерен или ячеек, большую протяженность ЗТВ (более 400 мкм), а также увеличить микротвердость покрытий на 7,6%.

2. Комбинированная магнитно-электрическая обработка поверхностей по сравнению с МЭУ позволяет повысить качество покрытий за счет уменьшения их объемной пористости в 1,5 – 1,6 раза и средней шероховатости поверхности по параметру  $Ra$  в 2,3 – 2,9 раза.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.

2. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.

3. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л.М. Кожуро, Б.П. Чемисов. – Минск: Наука и техника, 1995. – 232 с.

4. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.