

**ФОРМИРОВАНИЕ ГРАДИЕНТА СТРУКТУРЫ
ПОВЕРХНОСТНОГО СЛОЯ
ПРИ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКОМ УПРОЧНЕНИИ**

А.В. МИРАНОВИЧ, Л.М. АКУЛОВИЧ, В.Г. МИСЬКО

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

Основным показателем, определяющим износостойкость поверхностей в условиях абразивного изнашивания, является структура и микротвердость поверхностного слоя. При магнитно-электрическом упрочнении (МЭУ) формируется градиент структуры поверхностного слоя, обеспечивающий плавный переход свойств материала от слоя к слою. Наибольшей износостойкостью при абразивном изнашивании обладают борированные слои покрытий из порошков ФБ-17 и ФБХ-6-2 с микротвердостью до 18 ГПа.

Для восстановления изношенных поверхностей деталей в ремонтном производстве наиболее востребованы технологии нанесения износостойких покрытий с одновременным упрочнением поверхностных слоев [1]. К их числу относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ), использующее концентрированные потоки энергии магнитного поля и электрических разрядов [2]. Такая концентрация потоков тепловой энергии неизбежно приводит к формированию градиента структуры поверхностного слоя. При наличии градиентной структуры стоит задача обеспечить плавный переход свойств материала от слоя к слою с одновременным сочетанием различных эксплуатационных характеристики, которыми не обладают однородные материалы (высокая твердость и ударная вязкость, тепло- и коррозионная стойкость) [3, 4].

Микроструктура упрочненного слоя, обеспечивающая его физико-механические параметры при МЭУ, определяется химическим составом упрочняющего порошка и материала основы.

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-88), микроструктура которых после закалки (твердость – 240 НВ) представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита. На поверхность образцов наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа: ферробора ФБ-17 (ГОСТ 14848-69), Fe-2%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), а также сплава ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75).

Микроструктура покрытий изучалась методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera». Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3 по стандартной методике при величине статической нагрузки на индентор $P \sim 0,49$ Н (50 г). Толщину покрытий определяли по распределению микротвердости в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз.

Общим в структурном строении упрочненного слоя исследованных покрытий является то, что в нем можно выделить три зоны: наплавленную, диффузионную и зону термического влияния (рис. 1). Микроструктура упрочненного слоя, определяющая его физико-механические параметры, зависит от химического состава упрочняющего порошка и материала основы.

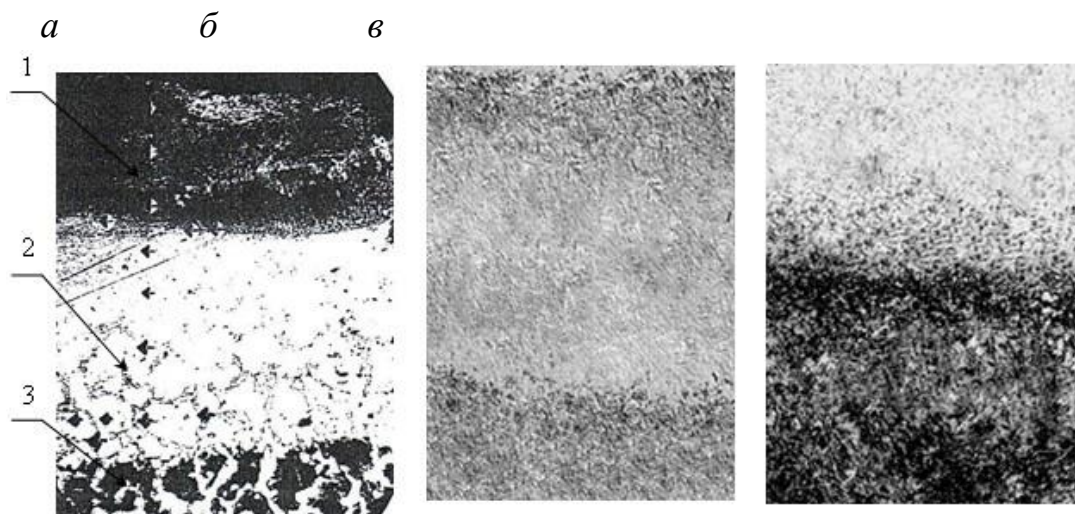
При упрочнении ферробором ФБ-17 основными структурными составляющими являются закалочный мартенсит, сорбит и комплексные бориды на основе FeB и Fe₂B. Наплавленный слой содержит большое количество мелкодисперсных боридов с микротвердостью 16...18 ГПа (рис. 1 а). Диффузионная зона представляет собой α -твердый раствор бора в железе с микротвердостью 8...11 ГПа. На границе наплавленного и диффузионного слоев заметен тонкий боридный слой, а на границе диффузионного слоя и матрицы обнаружено повышенное содержание углерода на глубине около 100 мкм.

В покрытии из ФБХ-6-2 наплавленный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения (рис. 1 б). Поверхностные слои толщиной 100...150 мкм состоят из частиц очень тонкого игольчатого строения размером до 5 мкм, которые вытянуты в сторону основного металла и увеличиваются до 10...15 мкм. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в α -железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа (Fe₂C), бориды (FeB, CrB₂, Cr₅B₃) и ферроборида (Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}).

Структура покрытия из ФМП Fe-Ti характеризуется мелкодендритным строением (рис. 1 в), основу которого составляет твердый раствор титана в α -железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe₂Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Граница раздела имеет плавный переход, в котором на глубине до 50...90 мкм происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с последовательным образованием структур – однофазной (дисло-

кационный мартенсит) и двухфазной (дислокационный мартенсит и рекристаллизованный феррит).

Покрытие из порошка Fe-2%V также характеризуется мелкодендритным строением, основу которого составляет твердый раствор ванадия в α -железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия (V_2C , $V_4C_{2,67}$) и железа (FeC , FeC_8). Диффузионная зона имеет структуру дислокационного мартенсита. Зона термического влияния представляет собой область неполной закалки, структура которой представляет феррит и отдельные участки перлита, превратившегося в троосто-мартенсит.



1 – наплавленная зона; 2 – диффузионная зона; 3 – зона термического влияния; покрытия из ФМП: *а* – ФБ-17 ($\times 200$), *б* – ФБХ-6-2 ($\times 500$), *в* – Fe-Ti ($\times 500$)

Рисунок 1. – Фотографии микроструктуры покрытий после МЭУ

Результаты экспериментальных исследований поверхностного слоя показывают, что микротвердость изменяется по трем четко выраженным участкам – наплавленная зона, диффузионная зона и зона термического влияния. Максимальная микротвердость наблюдается у покрытий из ФМП ФБ-17 (наплавленная зона – до 18 ГПа, диффузионная зона – $8,0 \div 11,4$ ГПа) и ФБХ-6-2 (наплавленная зона – $7,3 \div 8,7$ ГПа), что обусловлено формированием в результате скоростного охлаждения мелкодисперсной структуры слоев, в которых присутствуют закалочный мартенсит и комплексные бориды хрома CrV_2 , Cr_5V_3 , ферроборид $Cr_{1,65}Fe_{0,35}V_{0,96}$, а также бориды на основе железа FeV и FeV_2 .

Характерной особенностью покрытий является высокая однородность наплавленных слоев и, как следствие, незначительные изменения микротвердости по толщине покрытий из порошков Fe-Ti и Fe-2%V (в пределах $4,5 \dots 6,2$ ГПа).

Экспериментально установлено, что износостойкость борированных слоев на 40-50 % выше, чем цементованных. Поэтому для условий абразивного изнашивания предпочтительно использовать покрытия из ФМП ФБ-17 и ФБХ-6-2.

ЛИТЕРАТУРА

- 1 Технология ремонта машин / Е. А. Пучин [и др.] ; под ред. Е. А. Пучина. – М : УМЦ «Триада», 2006. Ч. I. – 348 с.
- 2 Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.
- 3 Minko, D. Biomechanical properties of composite compact-porous titanium produced by electric discharge sintering / D. Minko, K. Belyavin, V. Sheleg // IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering, 2017. – V. 218. – № 012008; doi:10.1088/1757-899X/218/1/012008.
- 4 Минько, Д.В. Влияние параметров импульсного лазерного воздействия на формирование градиента структуры пористых материалов из порошка титана / Д.В. Минько // Литье и металлургия. – 2018. – № 3(92). – С. 88–94.

**МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
НАЦИОНАЛЬНАЯ АКАДЕМИЯ НАУК БЕЛАРУСИ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ КОМИТЕТ ПО НАУКЕ И ТЕХНОЛОГИЯМ
МИНИСТЕРСТВО ПРОМЫШЛЕННОСТИ РЕСПУБЛИКИ БЕЛАРУСЬ
ПОЛОЦКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ОАО «НПО «ЦЕНТР
НАУЧНО-ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ ПАРК
ПОЛОЦКОГО ГОСУДАРСТВЕННОГО УНИВЕРСИТЕТА**

Инновационные технологии в машиностроении

Электронный сборник материалов международной
научно-технической конференции,
посвященной 50-летию машиностроительных специальностей
и 15-летию научно-технологического парка
Полоцкого государственного университета
(Новополоцк, 21-22 апреля 2020 г.)



ИннТехМаш

Под редакцией
чл.-корр. НАН Беларуси, д-ра техн. наук, проф. В. К. Шелега;
д-ра техн. наук, проф. Н. Н. Попок

Новополоцк
Полоцкий государственный университет
2020

УДК 621(082)

Редакционная коллегия:

Н. Н. Попок (председатель), В. П. Иванов (зам. председателя),
Р. С. Хмельницкий (отв. Секретарь), А.В. Дудан, В. А. Данилов, Е.В. Бритик

Инновационные технологии в машиностроении [Электронный ресурс] : электронный сборник материалов международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию машиностроительных специальностей и 15-летию научно-технологического парка Полоцкого государственного университета, Новополоцк, 21-22 апр. 2020 г. / Полоц. гос. ун-т ; под. ред. В. К. Шелега; Н. Н. Попок. – Новополоцк : Полоц. гос. ун-т, 2020. – 1 опт. диск (CD-ROM).

ISBN 978-985-531-691-7.

Отражены современное состояние и направления развития технологии и оборудования механической и физико-технической обработки; рассмотрены вопросы создания современных материалов, изготовления, восстановления и упрочнения деталей машин, автоматизации производства, эксплуатации и модернизации автомобилей и других машин.

Для научных и инженерно-технических работников исследовательских, проектных и производственных организаций, а также преподавателей, аспирантов, магистрантов и студентов технических специальностей учреждений образования.

Прилагаются [титulyные листы презентаций докладов](#) участников конференции.

Сборник включен в Государственный регистр информационного ресурса. Регистрационное свидетельство № 3141815008 от 28.03.2018.

211440, ул. Блохина, 29, г. Новополоцк, Беларусь
тел. 8 (0214) 59-95-53, e-mail: n.popok@psu.by

№ госрегистрации 3141815008**ISBN 978-985-531-691-7**

© Полоцкий государственный университет, 2020

2 – дополнительный титульный экран – производственно-технические сведения

Для создания текстового электронного издания «Инновационный технологии в машиностроении» использованы текстовый процессор Microsoft Word и программа Adobe Acrobat XI Pro для создания и просмотра электронных публикаций в формате PDF.

Компьютерный дизайн *Е. А. Балабуровой*
Техническое редактирование и верстка *И. Н. Чапкевич*

Подписано к использованию 23.04.2020.
Объем издания: 10,9 Мб. Тираж 3 диска. Заказ 264.

Издатель и полиграфическое исполнение:
учреждение образования «Полоцкий государственный университет».

Свидетельство о государственной регистрации
издателя, изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/305 от 22.04.2014.

ЛП № 02330/278 от 08.05.2014.

211440, ул. Блохина, 29,
г. Новополоцк,
Тел. 8 (0214) 59-95-41, 59-95-44
<http://www.psu.by>