

образом, для изготовления сменных почворезущих деталей сельскохозяйственных машин могут успешно применяться стали 45 и 60ГП с упрочнением по импортозамещающей технологии импульсной закалки.

### **Список использованной литературы**

1. Бернштейн Д.Б. Абразивное изнашивание лемешного лезвия и работоспособность плуга // Тракторы и сельскохозяйственные машины. 2002. №6. С. 39–42.
2. Future Materials in Agricultural Construction – Technical report (Domex Hardenable Steel) // проспект фирмы SSAB.
3. Juna H.J., Kanga J.S., Seob D.H., Kangb K.B., Park C.G. Effects of deformation and boron on microstructure and continuous cooling transformation in low carbon HSLA steels // Materials Science and Engineering. 2006. A 422. pp. 157–162.
4. Бетень, Г.Ф. Объемные нанокристаллические износостойкие детали рабочих органов сельскохозяйственной техники / Г.Ф. Бетень [и др.] // Вестник Полоцкого государственного университета/ – 2012, №3, серия В. Промышленность. Прикладные науки. – С. 46–51.
5. Бетень, Г.Ф. Анискович, Г.И. Модификация структуры и механических свойств стали пониженной прокаливаемости при импульсном закалочном охлаждении жидкостью. / MOTOROL/ – Lublin-Pzeszow, 2013, vol. 15, №7 – С. 80–86.
6. Анискович, Г. И. Упрочнение башмаков и дисков режущего аппарата ротационных косилок / Г. И. Анискович, Д. П. Литовчик, М. А. Шевчук // Современные проблемы освоения новой техники, технологий, организации технического сервиса в АПК : материалы Международной научно-практической конференции "Беларго-2019", Минск, 6–7 июня 2019 г. – Минск : БГАТУ, 2019. – С. 43–53.

**Summary.** The analysis of the elemental composition, investigation of the structure, and measurement of hardness and microhardness, determination of impact toughness of the studied samples showed that the most acceptable material for the manufacture of replaceable parts of working bodies of deep cultivators is steel 45 in combination with heat treatment by the method of pulse quenching cooling by liquid.

УДК 621.791.92 : 621.81

**Миранович А.В.**, кандидат технических наук, доцент

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

## **ПОВЫШЕНИЕ ФИЗИКО-МЕХАНИЧЕСКИХ И ЭКСПЛУАТАЦИОННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЕТАЛЕЙ ИЗ ЖЕЛЕЗОУГЛЕРОДИСТЫХ СПЛАВОВ КОМБИНИРОВАННЫМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫМ И ЛАЗЕРНЫМ УПРОЧНЕНИЕМ**

**Аннотация.** В работе представлены результаты исследования физико-механических и эксплуатационных характеристик покрытий, полученных комбинированным способом магнитно-электрического упрочнения с лазерной обработкой.

**Abstract.** The work presents the results of a study of the physical, mechanical and operational characteristics of coatings obtained by a combined method of magnetic-electric hardening with laser processing.

**Ключевые слова.** Комбинированная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, лазерная обработка, технологические параметры, микротвердость, пористость, толщина и износостойкость покрытий.

**Keywords.** Combined processing, magnetic-electric hardening, laser processing, technological parameters, microhardness, porosity, thickness and wear resistance of coatings.

Известно [1], около 60% отказов сельскохозяйственной техники и технологического оборудования происходит по причине преждевременного износа быстроизнашиваемых поверхностей деталей из железоуглеродистого сплава. В связи с этим разработка и внедрение технологий упрочнения (восстановления) изношенных деталей имеет одно из приоритетных направлений. При этом сокращение числа ремонтно-восстановительных работ в организациях АПК, и, следовательно, снижение эксплуатационных затрат возможно путем повышения в процессе восстановления физико-механических и эксплуатационных характеристик поверхностей деталей, лимитирующих период работы техники, до уровня, соответствующего сроку службы их в целом или межремонтному периоду [1, 2].

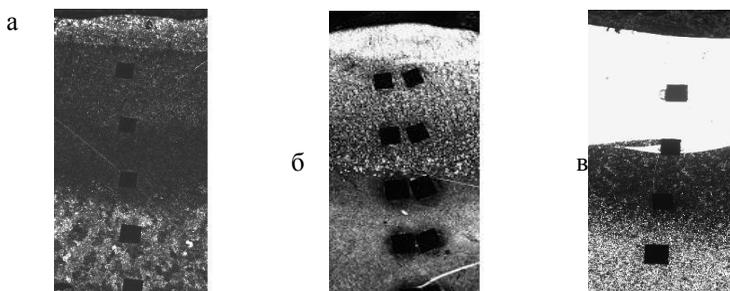
Для поверхностной обработки пустотелых деталей машин в условиях ремонтных предприятий применяется магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (КМП), основанное на использовании концентрированных потоков энергии [2, 3]. МЭУ имеет такие достоинства, как отсутствие специальной предварительной подготовки поверхности детали, незначительная зона термического влияния и высокая прочность сцепления покрытия с основным материалом детали. Однако поверхностные дефекты формируемых покрытий (разнотолщинность, объемная пористость) не позволяют использовать МЭУ для упрочнения и восстановления поверхностей деталей машин, износ которых более 0,1 мм на диаметр [1, 3]. Решение этой проблемы возможно за счет обработки покрытий лазером. При этом влияние лазерной обработки на кинетику фазовых превращений, структуру и свойства, износостойкость покрытий, полученных МЭУ, недостаточно изучено.

Эксперименты проводили на цилиндрических образцах из стали 45 (ГОСТ 1050-2013), микроструктура которых после закалки представляла собой смесь феррита и сорбитообразного перлита.

На поверхность образцов наносили покрытия из двухкомпонентных легированных порошков на основе железа Fe-5%V и Fe-Ti (ГОСТ 9849-86), а также сплава ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75) на установке мод. УМЭУ-1 при следующем режиме: величина магнитной индукции 1,0 Тл; рабочий зазор 1,5 мм; сила разрядного тока 100 А; размер частиц КМП 240 – 320 мкм; расход рабочей жидкости (5%-й раствор эмульсола Э2 в воде)  $0,4 \cdot 10^{-3} \text{ дм}^3 / (\text{с} \cdot \text{мм}^2)$ ; окружная

скорость заготовки 1,6 м/с. Лазерная обработка покрытий на образцах выполнялась на CO<sub>2</sub>-лазере типа «Комета-2» мощностью 1 кВт на следующем режиме: диаметр пятна 1,0 мм; плотность мощности 0,2 Вт/мм<sup>2</sup>; скорость луча 250 мм/мин.

Макро- и микроструктура и трещинообразование покрытий изучались методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» (Австрия) и цифрового фотоаппарата «HP photosmart 715 digital camera», растрового электронного микроскопа LEO 1455 VP (фирма «Carl Zeiss»). Микротвердость измеряли на приборе ПМТ-3М 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. Разнотолщинность покрытий определялась по разности максимальной и минимальной местных толщин покрытий образца. Объемная пористость покрытий определялась методом гидростатического взвешивания. В качестве количественного критерия трещинообразования принималась удельная длина трещин на поверхности площадью 1,0 мм<sup>2</sup>. Исследование износостойкости образцов с поверхностными слоями из композиционных ферромагнитных порошков, обработанных при оптимальных условиях и режимах процессов проводились на машине трения модели 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схеме «диск-колодка» при сравнительной оценке износостойкости покрытий в различных условиях изнашивания при трении скольжения: со смазочным материалом и смазочным материалом, загрязненным частицами абразива.



Покрyтия из КМП ( $\times 50$ ): а – Fe-Ti, б – Fe-5%V, в – ФБХ-6-2

Рисунок 1 – Фотографии микроструктуры покрытий после МЭУ и лазерной обработки

Микроструктурный анализ показал, что покрытие из КМП Fe-Ti характеризуется мелкодендритным строением (рисунок 1, а), основу которого составляет твердый раствор титана в  $\alpha$ -железе, а также незначительного количества остаточного аустенита, интерметаллидов (FeTi, Fe<sub>2</sub>Ti), карбидов титана (TiC) и железа (FeC). Граница раздела

имеет плавный переход, в котором происходит полная фазовая перекристаллизация материала основы с образованием дислокационного мартенсита и рекристаллизованного феррита.

Покрытие из КМП Fe-5%V также характеризуется мелкодендритным строением (рисунок 1, б), основу которого составляет твердый раствор ванадия в  $\alpha$ -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.

В результате выполненных исследований макро- и микроструктуры покрытия из КМП ФБХ-6-2 (рисунок 1, в) установлено, что в нанесенных слоях отсутствуют дефекты в виде раковин и посторонних включений. Покрытие имеют микроструктуру мелкодисперсного строения. Структура покрытия представляет собой конгломерат твердых и пластичных фаз, когерентно связанных между собой, и состоит из основы – твердого раствора хрома в  $\alpha$ -железе, а также остаточного аустенита, карбидов ( $Fe_2C$ ,  $Cr_7C_3$ ), боридов ( $FeB$ ,  $CrB_2$ ,  $Cr_3B_3$ ) и ферроборида ( $Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$ ).

В результате рентгенофазового анализа установлено (таблица 1), что покрытия представляют собой конгломерат твердых (мартенсит, карбиды ванадия, железа, титана и хрома, интерметаллиды, бориды, ферроборид) и пластичных (аустенит) фаз, когерентно связанных между собой.

Таблица 1 – Фазовый состав покрытий из КМП Fe-Ti, Fe-5%V и ФБХ-6-2

Присутствующие фазы	Содержание, %	Присутствующие фазы	Содержание, %	Присутствующие фазы	Содержание, %
Покрытие из КМП Fe-Ti		Покрытие из КМП Fe-5%V		Покрытие из КМП ФБХ-6-2	
FeTi	1,10	$V_2C$	1,30	FeB	1,90
$Fe_2Ti$	0,90	$V_4C_{2,67}$	0,90	$CrB_2$	1,60
TiC	1,90	FeC	1,60	$Cr_3B_3$	1,80
FeC	2,40	$FeC_8$	0,50	$Cr_7C_3$	1,50
тврд. раств. Ti в $\alpha$ Fe	91,50	тврд. раств. V в $\alpha$ -Fe	91,10	$Fe_2C$	2,10
остаточный аустенит	2,20	остаточный аустенит	4,60	тврд. раств. Cr в $\alpha$ -Fe	87,00
–	–	–	–	остаточный аустенит	4,10

Выявлено, что в покрытиях из КМП ФБХ-6-2 и Fe-5%V доля аустенита значительно больше, чем в покрытие из КМП Fe-Ti. Это обусловлено достаточно высокой концентрацией углерода стабилизирующего аустенит, что объясняется особенностью формирования структуры в процессе МЭУ. При лазерной обработке покрытий из КМП ФБХ-6-2 и Fe-5%V в результате подплавления материала основы происходит встречная диффузия углерода в покрытие, а также частичное расплавление карбидов в жидком металле.

Установлено, что наибольшее значение средней микротвердости наблюдается у покрытий, полученных МЭУ КМП ФБХ-6-2 (рисунок 2), и составляет 587 HV, что в 2,9 раза больше по сравнению с материалом основы. Это обусловлено формированием мелкодисперсной структуры слоев в результате их скоростного охлаждения. Следует отметить, что после лазерной обработки покрытий из КМП ФБХ-6-2 средняя микротвердость уменьшилась примерно в 1,2 раза и составляет 508 HV. Снижение микротвердости возможно по причине перераспределения внутренних напряжений на границе раздела «покрытие-основа детали».

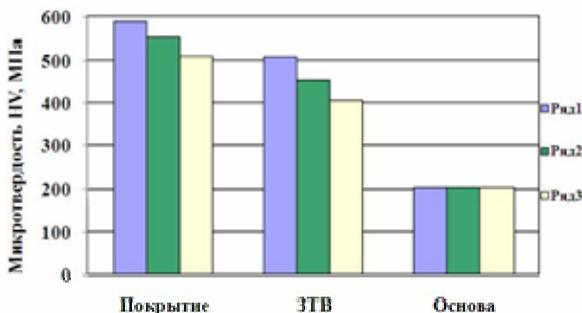


Рисунок 2 – Диаграмма результатов исследований на микротвердость  
Ряд (покрытия из КМП): 1 – ФБХ-6-2;  
2 – Fe-5%V; 3 – Fe-Ti

Выявлено, что лазерная обработка покрытий, полученных МЭУ, при уменьшении средней их толщины в 1,12 раза (таблица 2), позволяет повысить качество поверхностного слоя за счет снижения их объемной пористости в 2,7 – 3,3 раза и средней разнотолщинности в 1,16 – 1,21 раза.

Установлено, что за счет применения лазерной обработка покрытий из КМП Fe-Ti, достигается снижение удельной длины трещин с 70,0 мкм/мм<sup>2</sup> до 15 мкм/мм<sup>2</sup>, а для покрытий из КМП Fe-5%V и ФБХ-6-2 – происходит полное исчезновение трещин на поверхности образцов.

Таблица 2 – Пористость, толщина и разнотолщинность покрытий, полученных МЭУ и лазерной обработки

Материал КМП	Средняя толщина покрытий, мкм	Средняя разнотолщинность покрытий, мкм	Объемная пористость покрытий, %
Магнитно-электрическое упрочнение			
Fe-Ti	257	63	6,8
Fe-5%V	263	57	4,6
ФБХ-6-2	274	51	5,1
Магнитно-электрическое упрочнение и лазерная обработка			
Fe-Ti	229	54	2,3
Fe-5%V	235	49	1,4
ФБХ-6-2	244	42	1,9

Анализ результатов износостойкости образцов с покрытиями, полученными МЭУ с лазерной обработкой, показывает, что в различных условиях изнашивания при трении скольжения наибольшей износостойкостью обладают покрытия из КМП ФБХ-6-2 (рисунок 3, а и б).

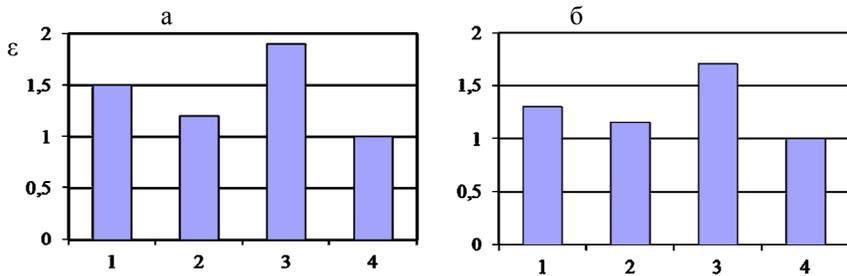


Рисунок 3 – Диаграммы относительной износостойкости покрытий из КМП Fe-5%V (1), Fe-Ti (2) и ФБХ-6-2 (3), эталона (4)

Условия трения скольжения:

а – со смазочным материалом; б – со смазочным материалом с частицами абразива

Так, износостойкость этих покрытий выше в 1,71–1,94 раза износостойкости эталона. Износостойкость покрытий из КМП Fe-5%V по сравнению с эталоном больше в 1,32–1,56 раза. Покрытия из КМП Fe-Ti имеют износостойкость равную эталону.

В порядке убывания износостойкости покрытий при трении скольжения последние можно расположить в следующей последовательности:

ФБХ-6-2→Fe-5%V→Fe-Ti→ эталон (сталь 45, 52–54 HRC).

Анализ результатов триботехнических исследований контртела и покрытий показывает, что минимальный износ пар сопряжений при трении скольжения с маслом получен для покрытий из композиционных

ферромагнитных порошков ФБХ-6-2 и Fe-5%V. Это обусловлено достаточно высоким содержанием метастабильного аустенита, который обеспечивает необходимую пластичность основы этих КМП. В результате чего приповерхностные микрообъемы покрытий способны выдерживать большее количество циклов передеформирования в процессе изнашивания. Пара трения «покрытие из КМП Fe-Ti - чугун ХТВ» имеет по сравнению с другими исследуемыми трибосопряжениями наибольшие момент и коэффициент трения скольжения с маслом и маслом с частицами абразива.

Анализ результатов испытаний износостойкости покрытий показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 5,5–7,3 %. Это свидетельствует о высоком уровне физико-механических свойств покрытий, полученных МЭУ с лазерной обработкой.

#### **Список использованной литературы**

1. Кожуро, Л.М. Обработка деталей машин в магнитном поле. Минск : Наука и техника, 1955. 232 с.
2. Акулович, Л. М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк: ПГУ, 1999. – 240 с.
3. Черноиванов, В.И. Восстановление деталей машин / В.И. Черноиванов, И.Г. Голубев. – М. : ФГНУ «Росинформагротех», 2010. – 376 с.
4. Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.
5. Хейфец, М.Л. Процессы самоорганизации при формировании поверхностей. Гомель : ИММС НАНБ, 1999. 276 с.

**Summary.** The work presents the results of a study of the physical, mechanical and operational characteristics of coatings obtained by a combined method of magnetic-electric hardening with laser processing.

УДК 621.923

**Акулович Л.М.**, доктор технических наук, профессор;

**Сергеев Л.Е.**, кандидат технических наук, доцент;

**Войтёнок А.С.**, студент;

**Сакович А.О.**, студент

*УО «Белорусский государственный аграрный технический университет»,  
г. Минск, Республика Беларусь*

### **ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЖУЩЕЙ СПОСОБНОСТИ ФЕРРОАБРАЗИВНЫХ ПОРОШКОВ ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ДЕТАЛЕЙ СЕЛЬСКОХОЗЯЙСТВЕННЫХ МАШИН**

**Аннотация.** Методы финишной обработки деталей сельскохозяйственных машин подвижно-скоординированными абразивными частицами