

Литература

1. Эффективное покрытие для повышения эксплуатационной надёжности и срока службы труб в жёстких условиях нефтегазодобычи / В. И. Большаков, Е. В. Проскуркин, Т. А. Дергач // *Металознавство та термічнаобробкаметалів*. - 2013. - № 2-3. - С. 5-13.
2. Скобло Т.С. Напряжения и деградация структуры, формируемые в насосно-компрессорных трубах при эксплуатации. Монография. / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко. Под ред. проф. Т.С. Скобло – Харьков: ООО «ПромАрт», 2018. – 153с.
3. Влияние добавок углеродсодержащей шихты в пластичную смазку на особенности формирования поверхности трения соединений в насосно-компрессорных трубах / Т.С. Скобло, А.И. Сидашенко, И.Н. Рыбалко, А.Ю. Марченко, А.К. Олейник // *Проблемитрибології (Problems of Tribology)* – 2017. – Хмельницький, 2017. – №3. - С. 16-24.

УДК 621.791.92 : 621.81

**ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ЭЛЕКТРОМЕХАНИЧЕСКОЙ  
ОБРАБОТКИ НА КАЧЕСТВО ПОВЕРХНОСТЕЙ ПОКРЫТИЙ,  
ПОЛУЧЕННЫХ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ**

**Миранович А.В.,** к.т.н., доцент, **Щурский Д.С.**  
БГАТУ, г. Минск, Республика Беларусь

Известно, что создание на контактных поверхностях деталей машин оптимальных сочетаний параметров качества (толщины, шероховатости, распределения микротвердости, фазового и химического состава по глубине поверхностного слоя и др.) возможно за счет использования электрофизических способов в сочетании с традиционно существующими (формообразующими и упрочняющими) [1, 2]. Одним из перспективных направлений упрочнения металлических поверхностей деталей является обработка комбинированным способом, включающим последовательное проведение совмещенных в одной технологической схеме магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) и электромеханическую обработку (ЭМО) [3]. Следует отметить, что при МЭУ в результате совместного воздействия разрядного тока и магнитной индукции в рабочем зазоре (РЗ) на частицы ферромагнитного порошка (ФМП) в составе пасты, а также при ЭМО – технологического тока и усилия накатывания электрода-инструмента на обрабатываемую поверхность формируются покрытия с регулируемыми параметрами качества [3, 4].

Поэтому целью исследований являлось изучение влияния стабилизированных технологических параметров электромеханической обработки на параметры качества поверхностных слоев, полученных магнитно-электрическим упрочнением.

Исследования проводились на цилиндрических образцах из стали 45 с покрытиями, полученными МЭУ ферромагнитным порошком ФБХ-6-2 (ГОСТ 11546-75) в составе пасты (раствор эпоксидной смолы ЭДП в жидком стекле (ТО РБ 02974150-015-99) и последующей ЭМО. Магнитно-электрическое упрочнение выполнялось – на установке модели УМЭУ-1 на оптимальных режимах (таблица 1) и ЭМО – накатным устройством с роликовым электродом-инструментом (плотность технологического тока  $i_э=100-110$  А/мм<sup>2</sup>; напряжение  $U_э=2-6$  В; усилие накатывания электродом-инструментом  $P_э=0,25-0,75$  кН).

Таблица 1 – Оптимальные режимы МЭУ

Материал ФМП	Оптимальные значения				
	$i$ , А/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , мм	$S$ , мм/об	$V$ , м/с	$q$ , г/(с·мм <sup>2</sup> )
ФБХ 6-2	1,91	1,50	0,220	0,055	$2,86 \cdot 10^{-3}$

где  $i$  – плотность разрядного тока, А/мм<sup>2</sup>;  $\delta$  – величина рабочего зазора, мм;  $S$  – скорость подачи, мм/об;  $V$  – окружная скорость заготовки, м/с;  $q$  – расход ФМП, г/с·мм<sup>2</sup>.

Макро- и микроструктура изучалась с использованием светового микроскопа Mef-3 (фирма «Reichert-Jung») и растрового электронного микроскопа

LEO 1455 VP (фирма «Carl Zeiss»). Рентгенофазовый анализ осуществлялся с помощью рент-

геновского дифрактометра ДРОН-3. Толщина упрочненных поверхностных слоев определялась по распределению микротвердости на приборе ПМТ-3М в поперечном сечении образцов при помощи окулярной вставки с увеличением в 200 раз. Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P.

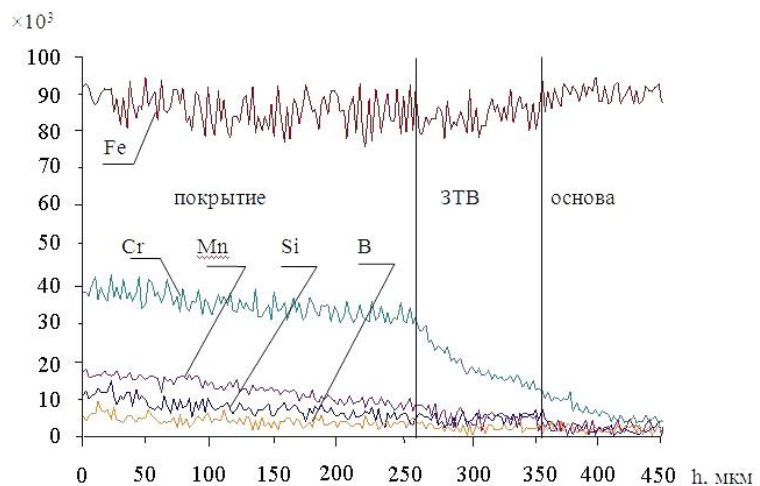
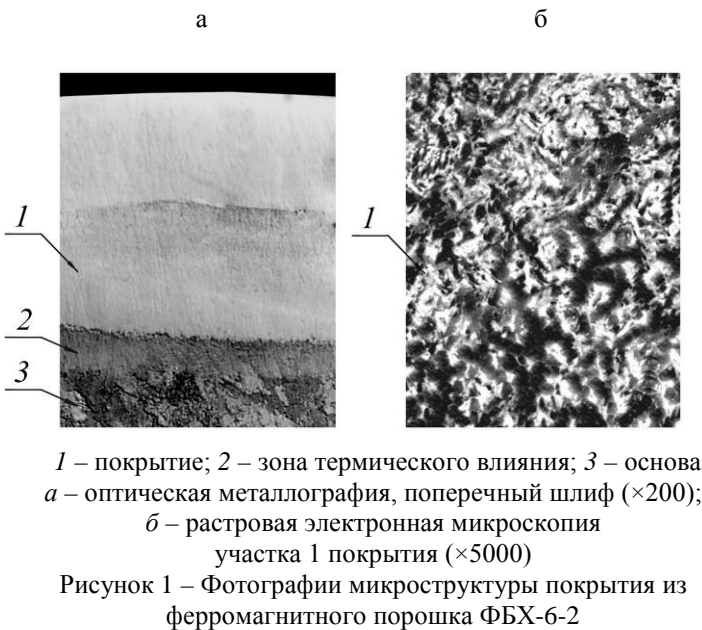
В результате выполненных исследований макро- и микроструктуры покрытия из порошка ФБХ-6-2 (рисунок 1, а) установлено, что в наплавленных слоях отсутствуют дефекты в виде раковин и посторонних включений. Покрытие имеют микроструктуру мелкодисперсного строения (рисунок 1, б).

Рентгенофазовым анализом установлено, что 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 ( $FeB$ ,  $CrB_2$ ,  $Cr_5B_3$ ) и ферроборида ( $Cr_{1,65}Fe_{0,35}B_{0,96}$ ). Переход от основного металла к наплавленному (рисунок 1, а и б) резкий, а граница сплавления – плотная.

Покрытие характеризуется небольшой зоной термического влияния и имеет структуру рекристаллизованного феррита и перлита. Это обусловлено тем, что основной металл не успевает нагреться выше температуры аустенитного превращения из-за высокой скорости охлаждения.

В результате выполненных рентгеноструктурного анализа и расчета параметров тонкой структуры установлено, что покрытие имеет тонкодисперсное строение с размером кристаллитов в пределах 17,30–30,20 нм; плотность дислокаций (хаотических), в объемах кристаллов в пределах  $(11,6213–12,6396) \cdot 10^8$ ,  $1/cm^2$ ; относительную среднеквадратическую микродеформацию в пределах  $(22,72–36,83) \cdot 10^{-4}$ . Следует отметить, что при ЭМО покрытия из ферромагнитного порошка ФБХ-6-2, осуществляемой с более высокой плотностью технологического тока, в результате подплавления материала основы происходит встречная диффузия углерода в покрытие, а также частичное расплавление карбидов в жидком металле.

Результаты микрорентгено-спектрального анализа покрытий после ЭМО показывают, что значительно выраженная концентрация легирующих элементов указывает на наличие карбидов и боридов этих элементов, которые менее растворены в жидком металле в результате более интенсивного охлаждения и кристаллизации. При этом равномерное распределение карбидо-боридной составляющей по глубине



наплавленного слоя и плавный переход легирующих элементов на границе покрытий и основы (рисунок 2) обуславливает повышение однородности физико-механических свойств покрытий и положительно влияет на их триботехнические свойства.

Результаты исследований показывают, что незначительные колебания и плавное изменение значений микротвердости по толщине в пределах 571–623 HV<sub>0,05</sub> для покрытия из ФМП ФБХ-6-2 обусловлены однородностью наплавленных слоев. Установлено, что покрытие из порошка ФБХ-6-2 имеет максимальную микротвердость 623 HV<sub>0,05</sub> (рисунок 3). Данное обстоятельство объясняется формированием мелкодисперсной структуры слоев в результате их скоростного охлаждения и последующего пластического деформирования.

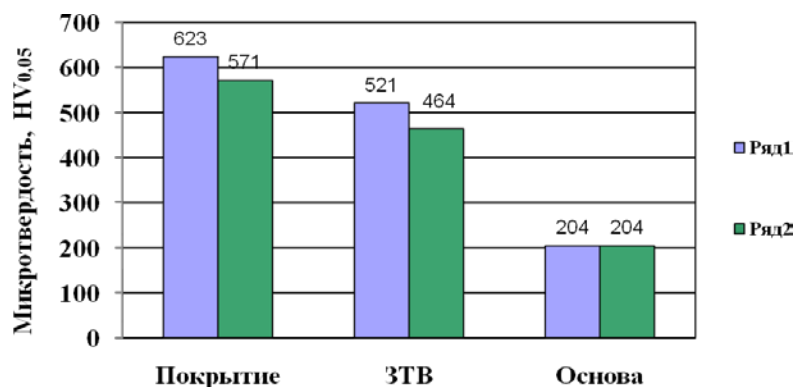
Результаты исследований (таблица 2) показывают, что ЭМО нанесенных покрытий МЭУ при уменьшении средней их толщины в 1,17 раза, позволяет повысить качество упрочненных поверхностей за счет снижения их средней шероховатости в 1,67 раза и средней разнотолщинности в 1,4 раза.

Экспериментальными исследованиями установлено следующее:

1. ЭМО покрытий, полученных МЭУ, позволяет увеличить микротвердость покрытий в 1,1 раза по сравнению с покрытиями, полученными МЭУ;
2. ЭМО нанесенных покрытий МЭУ позволяет уменьшить среднюю их толщину в 1,17 раза, снизить среднюю шероховатость в 1,67 раза и среднюю разнотолщинность в 1,4 раза.

#### Литература

1. Усов, С.В. Теория и практика создания мультипликативных комбинированных технологий на основе информационных систем / С.В. Усов, О.Ф. Вячеславова и [др.]. – М. : Университет машиностроения, 2016. – 247 с.
  2. Албагачиев, А.Ю. Прогрессивные машиностроительные технологии, оборудование и инструменты / А.Ю. Албагачиев [и др.]. – М. : Издательский дом «Спектр», 2015. – 464 с.
  3. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
- Акулович, Л.М. Магнитно-электрическое упрочнение поверхностей деталей сельскохозяйственной техники / Л.М. Акулович, А.В. Миранович. – Минск : БГАТУ, 2016. – 236 с.



Ряд: 1 – покрытие после МЭУ и ЭМО;  
2 – покрытие после МЭУ

Рисунок 3 – Диаграмма результатов исследований микротвердости упрочненного поверхностного слоя из ФМП ФБХ-6-2

Таблица 2 – Показатели качества упрочненных поверхностей

Материал ФМП	Средняя толщина покрытий, мкм	Средняя разнотолщинность покрытий, мкм	Средняя шероховатость поверхности, мкм
Магнитно-электрическое упрочнение			
ФБХ-6-2	276	51	10,2
Магнитно-электрическое упрочнение с ЭМО			
ФБХ-6-2	235	36	6,1