

чего зазора, $K_z = 1$; время обработки, $t = 60$ с. Показатели качества оцениваются по шероховатости Ra_2 и светоотражательной способности поверхностного слоя (Φ). Производительность определяется удельным массовым съемом материала ΔG , мг/(см²·мин).

Использование ФАП на основе быстрорежущей стали Р6М5 в отличие от Ж15КТ, который при обработке цветных металлов придает слою детали темный или матовый оттенок, позволяет получать блестящую поверхность. Образцы для обработки цветных металлов представляют собой цилиндрические заготовки, изготовленные из пруткового материала меди МЗ, бронзы БрАЖ9-4, латуни Л63, алюминия Д16. Размеры $D \times L = 40 \times 60$ мм. СОТС – патент № 23142, 3 %-й водный раствор. Производительность процесса обработки при использовании данного порошка выше, чем Ж15КТ на 20%.

Список использованной литературы

1. Сакулевич, Ф. Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 326 с.
2. Акулович, Л. М. Магнитно-абразивная обработка сложнопровильных поверхностей деталей сельскохозяйственных машин / Л. М. Акулович, Л. Е. Сергеев. – Минск : БГАТУ, 2019. – 272 с.

Summary. The research results showed that the presented ferroabrasive powders, in comparison with the used composite powder Zh15KT, provide higher productivity and quality of surface treatment of agricultural machine parts.

УДК 621.791.92 : 621.81

Акулович Л.М., доктор технических наук, профессор;
Миранович А.В., кандидат технических наук, доцент;
Афанасенко Д.Е., аспирант

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

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК И ИЗНОСОСТОЙКОСТИ РАБОЧИХ ПОВЕРХНОСТЕЙ НЕЖЕСТКИХ ДЕТАЛЕЙ МАШИН КОМБИНИРОВАННЫМ УПРОЧНЕНИЕМ

Аннотация. В работе изучены структура, качественные характеристики и износостойкость формируемых покрытий, полученных комбинированным способом магнитно-электрического упрочнения и поверхностной пневмовибродинамической обработкой.

Abstract. The work studied the structure, quality characteristics and wear resistance of the formed coatings obtained by a combined method of magnetic-electric hardening and surface pneumovibrodynamic treatment.

Ключевые слова. Комбинированная обработка, магнитно-электрическое упрочнение, пневмовибродинамическая обработка, технологические параметры, микротвердость, шероховатость и износостойкость покрытий.

Keywords. Combined processing, magnetic-electric hardening, pneumovibrodynamic processing, technological parameters, microhardness, roughness and wear resistance of coatings.

Для упрочнения и восстановления нежестких деталей машин применяются электрофизические методы [1], к которым относится магнитно-электрическое упрочнение (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (КМП) [2, 3]. Одним из недостатков поверхностей, полученных МЭУ, является разнотолщинность и несплошность покрытий из КМП, присутствие в них пор и трещин [3, 4]. Для снижения пористости и шероховатости формируемых покрытий, увеличения их износостойкости предложено обрабатывать рабочие поверхности комбинированным способом магнитно-электрического упрочнения с одновременной обработкой режущим абразивным кругом и последующей поверхностной пневмовибродинамической обработкой (ПВДО). Технологическая схема (рисунок 1) позволяет выполнять исполнительными рабочими органами одновременное смятие и сглаживание микронеровностей формируемых поверхностных слоев.

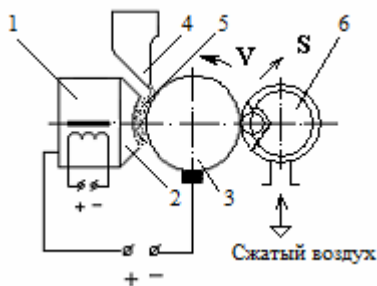


Рисунок 1 – Технологическая схема МЭУ с ПВДО

1 – электромагнитный питатель с постоянными магнитами; 2 – полюсный наконечник; 3 – обрабатываемая деталь; 4 – бункер-дозатор; 5 – композиционный ферромагнитный порошок; 6 – абразивный круг и инструмент ПВДО

Для реализации комбинированной обработки нежестких деталей типа «тело вращения» создан производственный технологический модуль мод. ЭМПП-1 на базе токарного станка мод. 1Е61М, в состав которого входят установка для МЭУ мод. УМЭУ-1 с источником технологического тока мод. Invertec-270Т и инструмент для ПВДО. В процессе комбинированной обработки под воздействием постоянного магнитного поля, генерируемого электромагнитным питателем 1 с постоянными магнитами, частицы КМП 5 выстраиваются вдоль магнитных

силовых линий в виде цепочек-электродов в рабочем зазоре между полюсным наконечником 2 и деталью 3, нагреваются, расплавляются и пе-

реносятся под действием технологического тока сварочного выпрямителя мод. Invertec-270Т на обрабатываемую поверхность. Далее покрытия формируются в виде монолитных соединений расплавленного КМП с основой, подвергаются обработке абразивным кругом и воздействию рабочих тел (деформирующих шаров) инструмента ПВДО 6.

Следует отметить, что деформирующие шары 2 (рисунок 2) перемещаются вдоль камеры расширения стакана 1 инструмента ПВДО и получают орбитальное вращательное движение под действием сжатого воздуха. Вследствие вращения корпуса инструмента 3 рабочие тела 2 развивают центробежную силу и взаимодействуют с обрабатываемой поверхностью, посредством чего происходит смятие и сглаживание ее микронеровностей.

Целью исследований являлось изучение структуры, качественных характеристик и износостойкости формируемых покрытий, полученных комбинированным способом МЭУ и поверхностной ПВДО (МЭУ с ПВДО).

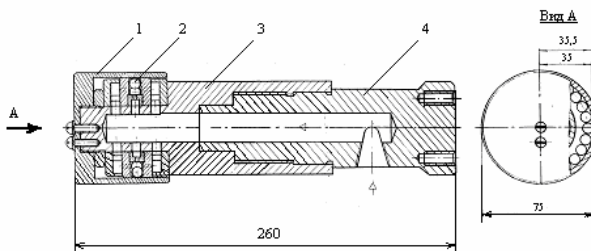


Рисунок 2 – Инструмент для ПВДО
наружных рабочих поверхностей нежестких деталей типа «тело вращения»
1 – стакан; 2 – деформирующие шары; 3 – корпус;
4 – оправка для закрепления инструмента

Исследование выполнялось на цилиндрических образцах из стали конструкционной легированной 30ХГС ГОСТ 4543-2016 (кольца с наружным диаметром 40 мм, внутренним – 16 мм и высотой – 12 мм, массой – 125 г.) с покрытиями, полученными последовательным нанесением паст, состоящих из КМП (ФБХ-6-2 и Fe-5%V) и связующего (эпоксидная смола ЭДП, растворенная в жидком стекле ТО РБ 02974150-015-99), и их комбинированной обработкой МЭУ с ПВДО. Упрочнение поверхностей выполнялось на модуле мод. ЭМПИ-1 на оптимальных режимах: МЭУ на установке мод. УМЭУ-1 с одновременной обработкой формируемого покрытия режущим абразивным кругом из карбида кремния зеленого зернистостью 16 – 25 [2, 3]; ПВДО – специальным инструментом с рабочими телами (шариками радиусом 3,0 мм) и подачей сжатого воздуха под

давлением 0,1 МПа [2, 4]. Постоянными поддерживались следующие технологические факторы: размер частиц КМП $\Delta = 240 - 320$ мкм; величина рабочего зазора $\delta = 1,5$ мм; расход рабочей жидкости (СОЖ – 5%-й раствор эмульсола Э2 в воде) $q = 0,4 \cdot 10^{-3}$ дм³/(с·мм²). Микроструктура упрочненных поверхностных слоев изучались методом оптической металлографии поперечных шлифов с использованием светового микроскопа Mef-3 фирмы «Reichert-Jung» и цифрового 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. Испытания износостойкости образцов с покрытиями проводились в соответствии с требованиями ГОСТ 23.224-86 «Обеспечение износостойкости изделий. Методы оценки износостойкости восстановленных деталей» на машине трения мод. 2070 СМТ-1 по стандартной методике по схемам «диск-колодка» при сравнительной оценке износостойкости покрытий при трении скольжения со смазочным материалом и смазочным материалом, загрязненным частицами абразива. Износ образцов с покрытиями и эталона определялся на оптическом длинномере ИЗВ-1.

В результате микроструктурного анализа установлено, что в покрытии из КМП ФБХ-6-2 упрочненный слой имеет микроструктуру мелкодисперсного строения. Основу покрытия составляет твердый раствор хрома в α -железе, остаточный аустенит, а также карбиды железа, бориды и ферробориды. Зона полной закалки имеет структуру мелкоигольчатого мартенсита. Покрытие характеризуется слабой травимостью и повышенной плотностью дефектов, вводимых в структуру аустенита и формируемого на этой основе дислокационного мартенсита.

Покрытие из КМП Fe-5%V характеризуется мелкодендритным строением, основу которого составляет твердый раствор ванадия в α -железе, остаточный аустенит, карбиды ванадия и железа. В покрытии выявлен малоуглеродистый мартенсит, на участках, прилегающих к основе – структурно-свободный δ -феррит. На границе с основной образуется тонкий слой со структурой полной закалки, что объясняется диффузией углерода из материала основы в жидкую фазу покрытия.

Следует отметить, что покрытия из КМП ФБХ-6-2 и Fe-5%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. Установлено, что наибольшее значение средней микротвердости (рисунок 3) наблюдается у покрытий из КМП ФБХ-6-2, полученных МЭУ с ПВДО, и составляет 628 $HV_{0,05}$, что на 7,6% больше микротвердости покрытий, полученных МЭУ (580 $HV_{0,05}$), и в 3,1 раза больше по сравнению с материалом основы (204 $HV_{0,05}$).

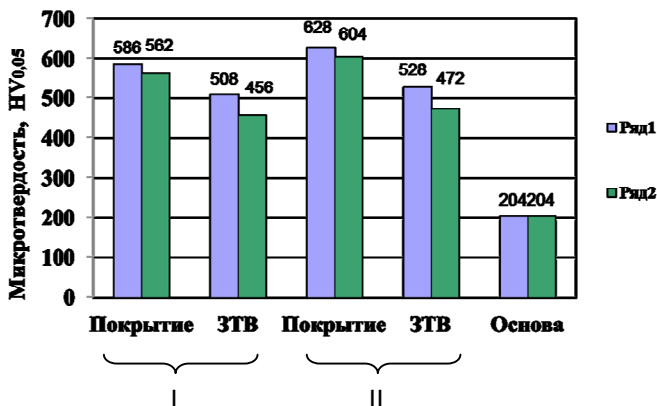


Рисунок 3 – Диаграмма результатов исследований микротвердости упрочненных поверхностей МЭУ (I), МЭУ с ПВДО (II)

Ряд: 1 – КМП ФБХ-6-2; 2 – КМП Fe-5%V; ЗТВ – зона термического влияния

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 1,45–1,62 раза, средней шероховатости по параметру Ra в 2,32–2,91 раза.

Таблица – Показатели качества упрочненных поверхностей

Материал КМП	Средняя толщина покрытий, мкм	Объемная пористость покрытий, %	Средняя шероховатость поверхности (Ra), мкм
МЭУ с обработкой абразивным кругом			
ФБХ-6-2	288	3,8	2,9
Fe-5%V	275	3,2	2,2
МЭУ с обработкой абразивным кругом и инструментом ПВДО			
ФБХ-6-2	253	2,4	1,4
Fe-5%V	245	2,1	0,9

В результате проведенных испытаний износостойкости обработанных образцов установлено, что в различных условиях изнашивания при трении скольжения относительная износостойкость покрытий из КМП, полученных МЭУ с последующей обработкой инструментом ПВДО, выше в 1,15–1,35 раза по сравнению с традиционным МЭУ (рисунок 3, а и б). При этом наибольшей износостойкостью обладают покрытия из КМП ФБХ-6-2 и выше в 1,63–1,89 раза износостойкости эталона. Износостойкость покрытий из КМП Fe-5%V по сравнению с эталоном больше в 1,23–1,45 раза.

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

ФБХ-6-2 → Fe-5%V → эталон (сталь 30ХГС, 52 – 56 НRC).

Триботехнические исследования контртела и покрытий показывают, что минимальный износ пар сопряжений при трении скольжения с маслом получен для покрытий из КМП, что обусловлено наличием в структуре поверхностных слоев остаточного аустенита (пластичной и более мягкой фазы), который выполняет роль демпфера, снижающего динамические нагрузки на поверхность, и ускоряет процесс приработки пары «деталь-контртело».

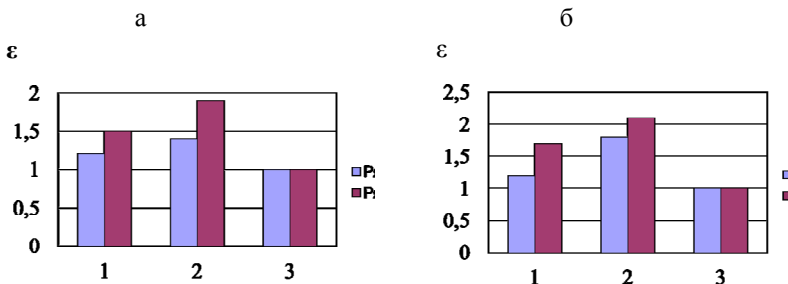


Рисунок 3 – Диаграммы относительной износостойкости покрытий из КМП Fe-5%V (1) и ФБХ-6-2 (2), эталона (3)

а – МЭУ с обработкой абразивным кругом ; б – МЭУ с обработкой абразивным кругом и инструментом ПВДО

Ряд (условия трения скольжения):

1 – со смазочным материалом с частицами абразива;

2 – со смазочным материалом

В условиях гидроабразивного изнашивания (масло, загрязненное частицами абразива) наименьший износ пар сопряжений получен для покрытия из КМП ФБХ-6-2, что обусловлено присутствием в нанесенном слое закалочного мартенсита, комплексных боридов и ферроборида. Следует отметить, что минимальный износ пары трения «покрытие из

порошка ФБХ-6-2 – чугуна ХТВ» объясняется минимальной пористостью и максимальной сплошностью покрытия.

Выявлено, что для пары трения, работающей при трении скольжения со смазочным материалом и смазочным материалом с частицами абразива, рекомендуется использовать покрытия из КМП ФБХ-6-2, а для неподвижных соединений – покрытия из КМП Fe-5%V.

Анализ результатов испытаний износостойкости покрытий из КМП, полученных комбинированной обработкой, показал, что разброс экспериментальных данных не превышает 4,2–8,3 %. Это обстоятельство свидетельствует о высоком уровне физико-механических свойств покрытий, полученных МЭУ с последующей обработкой инструментом ПВДО.

Список использованной литературы

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.

Summary. The work studied the structure, quality characteristics and wear resistance of the formed coatings obtained by a combined method of magnetic-electric hardening and surface pneumovibrodynamic treatment.

УДК 537.643:2

Щурин К.В., доктор технических наук, профессор;
Карлюк А.П., ассистент

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

ОБЪЕКТИВНЫЙ АНАЛИЗ ЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОСТИ МАГНИТНОЙ АКТИВАЦИИ ТОПЛИВ ДИЗЕЛЬНЫХ ДВС

Аннотация. В статье представлены результаты обширного анализа низкоэнергетических воздействий на жидкое топливо. Выявлены технические и технологические преимущества применения метода магнитной активации жидких сред с использованием постоянных неодимовых магнитов.

Abstract. This paper presents the results of an extensive analysis of low-energy impacts on liquid fuels. The technical and technological advantages of