

УДК 621.791.92 : 621.81

**Миранович А.В.**, к.т.н., доцент;  
**Акулович Л.М.**, д.т.н., профессор;  
**Ворошухо О.Н.**, инженер

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

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОБРАБАТЫВАЕМОСТИ ИЗНОСОСТОЙКИХ ПОКРЫТИЙ, ПОЛУЧЕННЫХ МАГНИТНО-ЭЛЕКТРИЧЕСКИМ УПРОЧНЕНИЕМ**

**Аннотация.** В статье исследуется обрабатываемость поверхностей деталей машин с покрытиями, полученными магнитно-электрическим упрочнением.

**Ключевые слова:** износостойкие покрытия, магнитно-электрическое упрочнение, механическая обработка, композиционные ферромагнитные порошки, производительность, шероховатость.

**Annotation.** In the article the the machinability of surfaces of machine parts with coatings obtained by magnetic-electric hardening.

**Keywords:** wear-resistant coatings, magnetic-electric hardening, mechanical treatment, composite ferromagnetic powders, productivity, roughness.

### **Введение**

Физико-механические и эксплуатационные свойства рабочих поверхностей деталей машин, в том числе восстановленных или упрочненных, в значительной степени определяют их надежность и долговечность. В связи с этим все большее значение придается обеспечению их высокого качества в процессе чистовой обработки.

Известно, что затраты на обработку изделий составляют 40 – 50 % общих затрат на их восстановление и, в отдельных случаях, даже могут превышать затраты на их наплавку или упрочнение (особенно при применении легированных наплавочных материалов) [1]. При этом специфика механической обработки покрытий, полученных магнитно-электрическим упрочнением (МЭУ) композиционными ферромагнитными порошками (КФП), связана с их

структурой [2]. Поэтому при выборе метода и режимов обработки покрытий ставилась задача по оценке возможного их влияния на свойства материала покрытия и основы, а также на точность.

В соответствии с этим определение обрабатываемости поверхностей с покрытиями, полученными МЭУ, механической обработкой – шлифованием (черновым и чистовым) абразивными кругами проводили в три этапа. В качестве критериев обрабатываемости использовали съем материала (производительность)  $Q$  (г/мин) для черновой и параметр шероховатости  $Ra$  при чистовой обработке.

### Основная часть

На первом этапе решалась задача выбора шлифовального круга (инструмента) при обработке покрытий из порошка Fe-2%V на круглошлифовальном станке модели ЗБ12 после МЭУ и МЭУ с последующим поверхностно-пластическим деформированием (ППД) [3]. Для этого применяли круги из различных видов электрокорунда зернистостью 16 – 40, карбида кремния зеленого зернистостью 40 на керамической связке и алмазные круги. Результаты исследований анализировали с целью проверки гипотез о равенстве дисперсий (полей рассеяния) и средних значений (математических ожиданий). Для этого эксперименты по определению производительности повторяли до 5 раз, а параметров шероховатости до 10 – 15 раз.

Проверка влияния марки материала круга на параметры обрабатываемости на основании гипотез о равенстве дисперсий и средних значений показала, что она не оказывает влияния на величину генерального среднего  $\bar{Y}$ . Поэтому при обработке образцов с МЭУ и МЭУ с ППД можно использовать любой из предложенных кругов.

В качестве примера рассмотрим обработку образцов при следующем режиме: окружная скорость круга  $V_k = 30$  м/с; окружная скорость образца  $V = 36,3$  м/мин; продольная подача  $S_{пр} = 2,25$  м/мин; поперечная подача  $S_{п} = 0,01$  мм/дв.ход; число двойных ходов выхаживания  $n = 5$ ; СОЖ – 5-процентный раствор эмульсола Э2 в воде.

Установлено, что съем кругами из электрокорунда белого и легированного одинаково эффективен независимо от зернистости и

твердости и обусловлен, очевидно, в первую очередь, влиянием связки, поскольку использование вулканитовой связки снижает съем примерно вдвое. Наихудшие результаты по съему имеет круг из карбида кремния зеленого. Это явление отличается от известных представлений о работоспособности таких кругов, однако может быть объяснено, если учесть, что в диапазоне температур 750°–850°С твердость зерен электрокорунда несколько выше твердости зерен карбида кремния. С учетом одновременной оценки величин  $Q$  и  $R_a$  можно в случае применения однократного шлифования рекомендовать круг 25A25ПСМ27К6, который обеспечил высокие результаты по шероховатости ( $R_a = 0,65 - 0,75$  мкм), что соответствует чистовому шлифованию.

Наилучшие результаты по величине съема были получены при использовании круга 91A16ПСМ29К5 для деталей с покрытиями, полученными МЭУ, но, поскольку  $R_a = 1,2 - 1,5$  мкм, его нельзя рекомендовать для однократного шлифования. Следует отметить, что круги таких марок значительно засаливаются и требуют частых правок.

При использовании круга 13A20НС27В5 выявлены низкие результаты по величине съема и шероховатости поверхности; на обработанной поверхности детали наблюдались прижоги.

Алмазный круг АС125/100С2100Б1 выявил высокие результаты по исследуемым параметрам как при обработке покрытий с ППД, так и без него, но большая часть поверхности обработанных образцов содержала прижоги. Последнее обстоятельство легко объяснить взаимодействием алмазов с железом обрабатываемого покрытия, что вызывает интенсивное затупление зерен и возрастание температуры шлифования.

При применении двукратного шлифования (чернового и чистового) можно для предварительного шлифования рекомендовать круги 24A25НСМ17К5, 15A40НС27К6, 25A40ПС25К6, которые показали хорошие результаты по производительности процесса шлифования и по параметрам шероховатости. Для чистового шлифования можно использовать круг 64С40ПМ37К5, обеспечивающий  $R_a = 0,45 - 0,55$  мкм.

Обрабатываемость покрытий, полученных МЭУ с ППД, при черновой обработке незначительно лучше, чем при чистовой, что

связано с уплотнением поверхностного слоя и повышением его твердости. Однако существенных отличий как в целом, так и по области использования кругов в отдельности не наблюдается.

На втором этапе определения обрабатываемости покрытий, полученных МЭУ и МЭУ с ППД, рассматривалось влияние режимов шлифования на производительность и качество обработанной поверхности.

Известно, что съем материала и параметры шероховатости обработанной поверхности при шлифовании подчиняются логарифмическому нормальному закону распределения [3]. Поэтому зависимость исследуемых параметров от изучаемых факторов можно представить зависимостью

$$P = e^{\alpha} \cdot S_{\text{пр}}^x \cdot S_{\text{п}}^y \cdot V^z \cdot n^{\beta}, \quad (1)$$

где  $P$  – исследуемый параметр;  $e = 2,718$  – основание натурального логарифма;  $\alpha, x, y, z, \beta$  – коэффициенты регрессии;  $S_{\text{пр}}, S_{\text{п}}, V, n$  – независимые переменные (факторы).

Уравнение (1) является исследуемой математической моделью, в которой для получения значений показателей степени делаем преобразование, прологарифмировав обе части. В результате получаем уравнение

$$Y = b_0 + b_1X_1 + b_2X_2 + b_3X_3 + b_4X_4.$$

Здесь  $Y$  истинное значение параметра в логарифмическом масштабе;  $X_1, X_2, X_3, X_4$  – логарифмы регрессии, соответственно;  $S_{\text{пр}}, S_{\text{п}}, V, n, b_1, b_2, b_3, b_4$  – коэффициенты, значения которых определяем при помощи метода математического планирования экспериментов, применив дробный факторный эксперимент типа  $2^{4-1}$ .

В нашем случае функциями отклика служили следующие параметры:  $Y_1 = Q$  – съем материала, г/мин;  $Y_2 = Ra$  – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм;  $Y_3 = H_{\text{max}}$  – отклонение 5 наибольших максимумов, мкм;  $Y_4 = H_{\text{min}}$  – отклонение 5 наибольших минимумов, мкм;  $t_p = Y_5$  – относительная опорная длина профиля на уровне  $p$ , %.

Обработку образцов с покрытием из порошка Fe-2%V производили шлифовальным кругом 15A40PC27K6 с охлаждением 5-процентным раствором эмульсола в воде при скорости  $V_k = 30$  м/с.

Установлено, что во всех уравнениях коэффициенты по критерию Стьюдента значимы с 95-процентной доверительной вероятностью, а уравнения по критерию Фишера адекватны при 5-процентном уровне значимости.

Уравнения регрессии, для покрытий, полученных МЭУ, имеют следующий вид

$$\begin{aligned} Q &= 1,121 + 0,792X_1 + 0,436X_2 - 0,052X_3 + 0,249X_4; \\ Ra &= 0,067 + 0,411X_1 + 0,079X_2 - 0,109X_3 + 0,023X_4^*; \\ H_{max} &= 1,419 + 0,387X_1 + 0,074X_2 + 0,025X_3^* - 0,033X_4; \\ H_{min} &= 1,366 + 0,283X_1 + 0,014X_2^* + 0,089X_3 - 0,015X_4^*; \\ t_p &= 4,122 - 0,055X_1 + 0,008X_2^* + 0,054X_3 + 0,059X_4. \end{aligned} \quad (2)$$

Уравнения регрессии, для покрытий, полученных МЭУ с ППД, имеют следующий вид

$$\begin{aligned} Q' &= 1,759 + 0,678X_1 + 0,344X_2 + 0,087X_3 + 0,006X_4^*; \\ Ra' &= -0,088 + 0,332X_1 + 0,141X_2 - 0,099X_3 - 0,061X_4; \\ H'_{max} &= 1,384 + 0,198X_1 + 0,175X_2 - 0,042X_3^* - 0,063X_4; \\ H'_{min} &= 1,656 + 0,103X_1 + 0,063X_2 - 0,052X_3 - 0,057X_4; \\ t'_p &= 3,814 - 0,082X_1 - 0,079X_2 - 0,021X_3^* - 0,003X_4^*. \end{aligned} \quad (3)$$

Уравнения регрессии (2) и (3) преобразованы и после потенцирования приняли следующий вид:

для покрытий, полученных МЭУ,

$$\begin{aligned} Q &= e^{2,663} \cdot S_{np}^{2,286} \cdot S_n^{0,725} \cdot V^{-0,149} \cdot n^{0,359}; \\ Ra &= e^{0,557} \cdot S_{np}^{1,187} \cdot S_n^{0,155} \cdot V^{-0,316} \cdot n^{-0,032}; \\ H_{max} &= e^{0,886} \cdot S_{np}^{0,818} \cdot S_n^{0,116} \cdot V^{0,071} \cdot n^{-0,048}; \\ H_{min} &= e^{0,065} \cdot S_{np}^{0,815} \cdot S_n^{0,02} \cdot V^{0,258} \cdot n^{-0,022}; \\ t_p &= e^{3,692} \cdot S_{np}^{-0,16} \cdot S_n^{0,01} \cdot V^{0,14} \cdot n^{0,085}, \end{aligned} \quad (4)$$

а для покрытий, полученных МЭУ с ППД,

$$\begin{aligned} Q' &= e^{1,279} \cdot S_{np}^{2,036} \cdot S_n^{0,551} \cdot V^{0,251} \cdot n^{0,008}; \\ Ra' &= e^{1,003} \cdot S_{np}^{0,959} \cdot S_n^{0,234} \cdot V^{-0,286} \cdot n^{-0,088}; \\ H'_{max} &= e^{2,525} \cdot S_{np}^{0,571} \cdot S_n^{0,282} \cdot V^{-0,12} \cdot n^{-0,091}; \\ H'_{min} &= e^{2,306} \cdot S_{np}^{0,298} \cdot S_n^{0,105} \cdot V^{-0,15} \cdot n^{-0,05}; \\ t'_p &= e^{3,782} \cdot S_{np}^{-0,123} \cdot S_n^{-0,123} \cdot V^{-0,07} \cdot n^{-0,007}. \end{aligned} \quad (5)$$

Анализ полученных уравнений (4) и (5), позволяет рекомендовать для обработки покрытий, полученных МЭУ, следующий ре-

жим:  $V_k = 30$  м/с;  $V = 40$  м/мин;  $S_{пр} = 1 - 3$  м/мин;  $S_{п} = 0,005 - 0,010$  мм/дв.ход;  $n = 3 - 4$ . Для обработки поверхностей деталей, подвергнутых МЭУ с ППД, продольную подачу следует увеличить до  $2 - 3$  м/мин, а поперечную до  $0,01 - 0,015$  мм/дв.ход.

На третьем этапе определялась обрабатываемость покрытий, полученных МЭУ и МЭУ с ППД порошков из различных материалов по критериям  $Q$ , Ra и  $t_p$ .

Обработку образцов (по 10 штук для каждого КФП) проводили шлифовальным кругом 15A40HC27K6 с применением СОЖ (5-процентный водный раствор эмульсола Э2) при следующем режиме:  $V_k = 30$  м/с;  $V_d = 36$  м/мин;  $S_{пр} = 1,7$  м/мин;  $S_{п} = 0,01$  мм/дв.ход;  $n = 3$ .

Полученные результаты представлены на рисунке, из которого следует, что метод нанесения покрытий не оказывает существенно влияния на обрабатываемость последних. В тоже время химический состав материалов КФП влияет на обрабатываемость покрытий. С учетом убывания обрабатываемости рассматриваемые покрытия (рисунок) по критериям обрабатываемости можно расположить в ряды. Так, для покрытий, полученных МЭУ, имеем:

- по критерию  $Q$ :

ПР - Сталь45 - 1%В→Fe - 2%V→ПЖРВ2→Fe - 10%V→Fe - Ti→Р6М5Ф3→С - 300→Р6М5К5→ФБХ 6-2;

- по критерию Ra:

ФБХ 6-2→Р6М5К5→Р6М5Ф3→С - 300→Fe - Ti→Fe - 10%V→Fe - 2%V→ПР Сталь 45 - 1%В→ПЖРВ2;

- по критерию  $t_p$ ;

ФБХ 6-2→Р6М5К5→Р6М5Ф3→Fe - 10%V→Fe - Ti→Fe - 2%V→С - 300 → ПР Сталь 45 - 1%В→ПЖРВ2.

Для покрытий, полученных МЭУ с ППД:

- по критерию  $Q$ :

ПЖРВ2→ПР Сталь 45 - 1%В→Fe - 2%V→Fe - 10%V→С - 300→Fe - Ti→Р6М5К5→Р6М5Ф3→ФБХ 6-2;

- по критерию Ra:

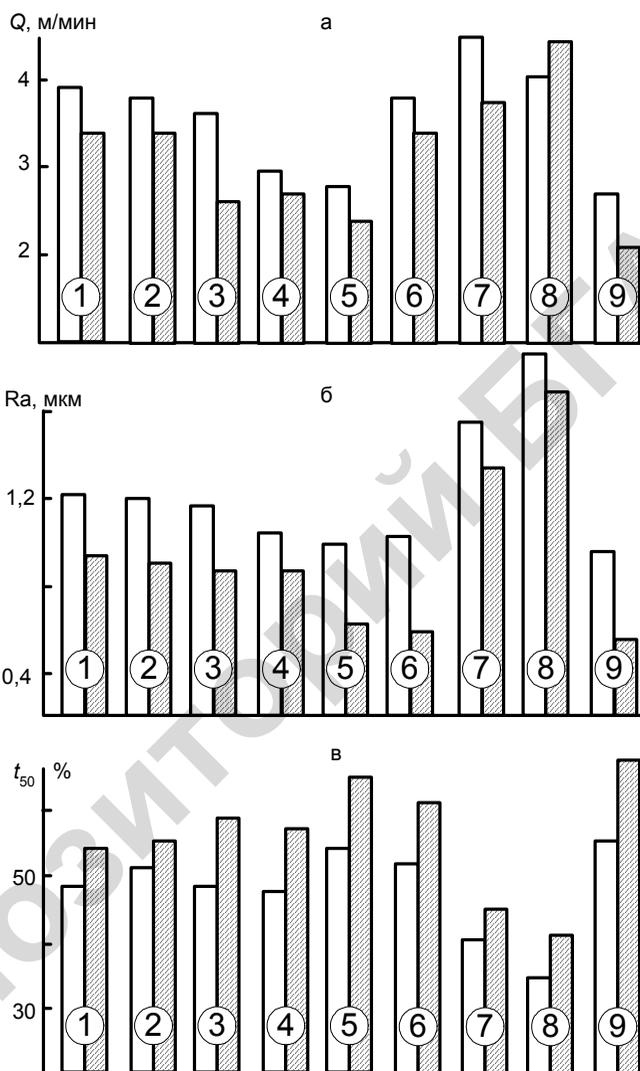
ФБХ 6-2→Р6М5Ф3→Р6М5К5→Fe - Ti→С - 300→Fe - 10%V→Fe - 2%V→ПР Сталь 45 - 1%В→ПЖРВ2;

- по критерию  $t_p$ ;

ФБХ 6-2→Р6М5К5→Р6М5Ф3→Fe - Ti→С - 300→Fe - 10%V→Fe - 2%V→ ПР Сталь 45 - 1%В→ПЖРВ2.

Покрытия, с учетом влияния химического состава материалов КФП на обрабатываемость, разделили на две группы. К первой группе отнесены покрытия, которые при обработке показали самые высокие результаты по критерию производительности и очень низкие по критериям качества обработанной поверхности (ПР Сталь 45-1%В и ПЖРВ2). Вторую группу составили покрытия, имеющие наилучшие показатели по критериям качества обработанной поверхности и невысокие по производительности (ФБХ 6-2, Р6М5К5, Р6М5Ф3, С-300, Fe-V, Fe-Ti).

Видно (рисунок), что покрытия, имеющие лучшую обрабатываемость по производительности, показывают наихудшие результаты по критериям качества обработанной поверхности. Обусловлено это тем, что химический состав материалов КФП при формировании покрытий определяет физико-механические свойства последних, которые оказывают влияние на обрабатываемость. Так, покрытия второй группы относятся к высоколегированным, имеющим высокую микротвердость. Так, например, в покрытиях из порошков Fe - V и Fe - Ti присутствуют твердые растворы ванадия и титана в железе. В структуре покрытий из быстрорежущих сталей, ферроборохрома и высокохромистого чугуна эвтектического состава, наряду с твердыми растворами, присутствуют карбиды вольфрама, ванадия, молибдена, бора и других металлов, входящих в состав исследуемых порошков. Кроме того, пористость и магнитные свойства покрытий второй группы значительно ниже, чем первой. Все это обуславливает лучшую обрабатываемость покрытий второй группы по критериям качества обработанной поверхности. Наилучшую обрабатываемость по этим критериям показали



Композиционные ферромагнитные порошки: 1) Fe-2%V; 2) Fe-10%V; 3) Fe-Ti; 4) С-300; 5) Р6М5К5; 6) Р6М5Ф3; 7) ПР Сталь 45-1% В; 8) ПЖРВ2; 9) ФБХ 6-2

Рисунок – Производительность  $Q$  (а) и параметры шероховатости обработанной поверхности  $Ra$  (б) и  $t_{50}$  (в) при шлифовании покрытий, полученных МЭУ (не заштриховано) и МЭУ с ПВД (заштриховано) КФП

покрытия из порошков ФБХ 6-2, Р6М5Ф3, Р6М5К5, имеющие наибольшую микротвердость.

### **Заключение**

Таким образом, из широкой номенклатуры покрытий наилучшие результаты, как по производительности, так и по качеству обработанной поверхности показали материалы на основе феррованадия и ферротитана.

Наилучшие показатели по качеству обработанной поверхности дали материалы из быстрорежущих сталей и ферроборохрома.

Для обработки покрытий шлифованием наиболее универсальны среднемягкие круги из электрокорундов белого и нормального зернистостью 25 – 40 мкм на керамической связке. Их можно использовать как при черновой, так и при чистовой обработке. При этом окружную скорость круга целесообразно принимать 30 – 35 м/с, окружную скорость обработанной детали до 40 м/мин, продольную подачу 1 – 2 м/мин, поперечную 0,005 – 0,01 мм/дв.ход, число проходов выхаживания 2 – 3.

Использование других видов материалов и связок нецелесообразно в связи с низкой производительностью обработки или из-за засаливания и возникновения прижогов. Приоритетное применение керамической связки обусловлено ее высокой теплостойкостью (по сравнению с вулканитовой и бакелитовой связками). Использование легированного электрокорунда и синтетических алмазов нежелательно из-за химической активности с обрабатываемыми материалами покрытий, полученных на основе железа.

### **Список использованной литературы**

1. Акулович, Л.М. Термомеханическое упрочнение деталей в электромагнитном поле / Л.М. Акулович. – Полоцк : ПГУ, 1999. – 240 с.
2. Мрочек, Ж.А. Прогрессивные технологии восстановления и упрочнения деталей машин / Ж.А. Мрочек, Л.М. Кожуро, И.П. Филонов // . – Минск : УП «Технопринт», 2000. – 268 с.
3. Кожуро, Л.М.. Шлифование металлов / Л.М. Кожуро, П.С. Чистосердов, Э.И. Ремизовский, Е.Э. Фельдштейн: Под общ. ред. Л.М. Кожуро. – Минск : Дизайн ПРО, 2000. – 352 с.