

УДК 621.923

ОСОБЕННОСТИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ С РЕГЕНЕРАЦИЕЙ КОНТУРА РЕЖУЩЕГО ИНСТРУМЕНТА ИМПУЛЬСНЫМ МАГНИТНЫМ ПОЛЕМ

*д-р техн. наук, проф. Л.М. АКУЛОВИЧ;
канд. техн. наук, доц. М.М. ДЕЧКО; О.Н. ВОРОШУХО
(Белорусский государственный аграрный технический университет, Минск)*

Рассматривается влияние регенерации контура режущего инструмента импульсным магнитным полем на качество поверхностей деталей и производительность при магнитно-абразивной обработке. Установлено положительное влияние дополнительного магнитного поля на качество и производительность магнитно-абразивной обработки. Определены оптимальные значения варьируемых факторов, обеспечивающие максимальное влияние на уменьшение шероховатости после указанной обработки с дополнительной магнитной системой.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, ферроабразивный порошок, полюсный накопчик, регенерация контура режущего инструмента, ферроабразивная щётка.

Введение. Развитие высокоэффективных технологий изготовления деталей машин все более ужесточает требования к производительности операций обработки заготовок и качеству поверхностей деталей, чертежей самих деталей как по форме, так и по точности. Это является мотивацией совершенствования финишных способов механической обработки и создания принципиально новых методов, в том числе основанных на ином характере взаимодействия инструмента с поверхностью детали.

При финишной абразивной обработке традиционными способами на отдельных участках поверхностей обрабатываемых деталей возникают погрешности формы и разброс величин шероховатости [1]. В результате параметры качества на различных участках могут значительно отличаться друг от друга, и для обеспечения требований чертежа могут потребоваться дополнительные доводочные операции, которые, как правило, выполняются вручную и являются трудоемкими.

В машиностроении широко используются детали типа тел вращения с рабочими поверхностями под посадку, к которым предъявляются особо высокие требования как по точности формы и величине шероховатости, так и по показателям физико-механических свойств поверхностного слоя. Применение магнитно-абразивной обработки (МАО) по сравнению с традиционными способами абразивной обработки способствует образованию высокого качества поверхности и структуры поверхностного слоя за счет невысокой температуры в зоне резания.

Цель работы – установить влияние регенерации контура режущего инструмента магнитным полем на качество поверхностей деталей и производительность при магнитно-абразивной обработке.

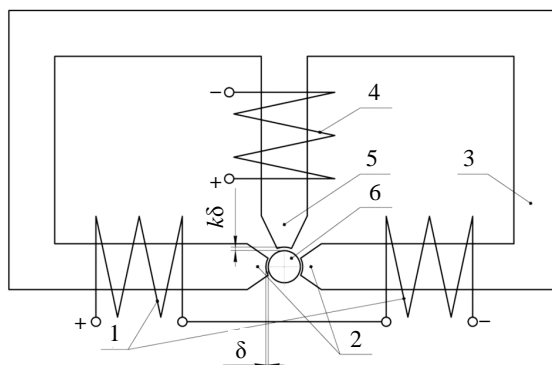
Основная часть. Достоинствами МАО, в отличие от традиционных способов финишной обработки, являются возможность регулирования плотности и жесткости обрабатываемого инструмента, сформированного из ферроабразивного порошка (ФАП), обеспечение параметров шероховатости обрабатываемых поверхностей в пределах Ra (0,01...0,63) мкм, снижения волнистости в 8...10 раз, гранности до 2 раз [2]. Указанные технологические процессы легко поддаются автоматизации, поскольку электрические и магнитные потоки энергии просты в реализации и удобны в управлении.

Вместе с тем магнитно-абразивная обработка имеет недостаток – снижает интенсивность «саморегенерации» контура режущего инструмента в рабочей зоне, что негативно сказывается на производительности и качестве обработки, физико-механических свойствах обрабатываемых поверхностей [2; 3].

Анализ известных технологических схем и конструкций устройств для МАО показал, что наибольшая производительность процесса достигается за счет сообщения осциллирующих движений частицам ФАП в рабочем зазоре. Однако при потере режущих свойств контура ферроабразивной щетки по мере её работы требуется переориентация частиц ФАП, чему препятствуют соседние частицы плотной ферроабразивной щетки. Поэтому стоит задача принудительной переориентации с регенерацией контура режущего инструмента. Один из вариантов решения поставленной задачи – использование направленных магнитных потоков от двух систем, расположенных под углом 90° друг к другу и работающих в импульсном режиме (рисунок 1) [4].

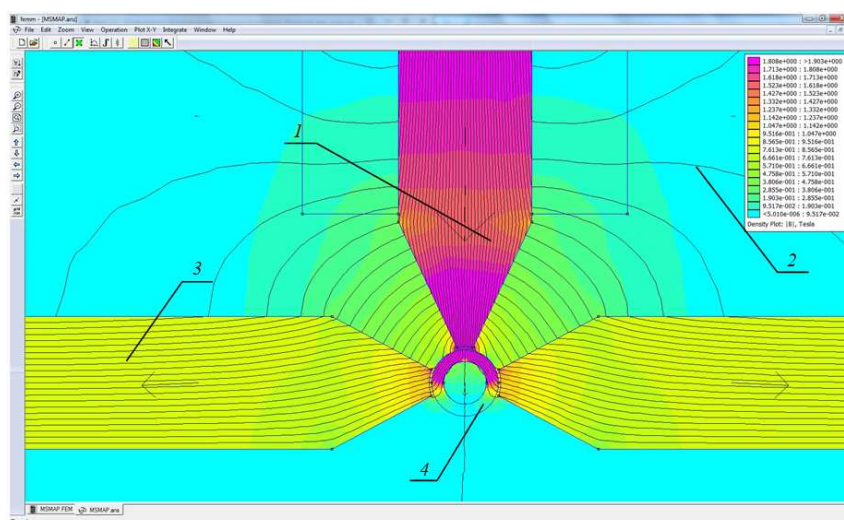
Основное магнитное поле величиной $B = 0,9$ Тл удерживает ферроабразивный порошок в рабочем зазоре и формирует ферроабразивную щётку. В это время происходит процесс микрорезания. По мере потери режущей способности частиц ФАП, находящихся в контакте с обрабатываемой заготовкой, отключается основная магнитная система (МС) и включается дополнительная. Дополнительная магнитная система генерирует в рабочем зазоре электромагнитную индукцию $B_d > 1,1$ Тл. При включении дополнительной катушки изменяется характер распределения силовых линий магнитного поля. Распределение

силовых линий магнитного поля, генерируемых в рабочем зазоре дополнительной магнитной катушкой, рассчитано методом конечных элементов при помощи программы FEMM и представлено на рисунке 2.



- 1, 2 – соответственно катушки и полюсные наконечники основной магнитной системы;
 3 – магнитопровод; 4 – катушка дополнительной магнитной системы;
 5 – наконечник дополнительной магнитной системы; 6 – обрабатываемая деталь;
 $\delta, k\delta$ – рабочий зазор основной и дополнительной магнитной системы соответственно

Рисунок 1. – Схема импульсной регенерации контура режущего инструмента



- 1 – основной поток; 2 – поток рассеивания; 3 – магнитопровод; 4 – заготовка

Рисунок 2. – Распределение силовых линий магнитного поля при работе дополнительной катушки, рассчитанное в программе FEMM

Дополнительное магнитное поле действует на ферроабразивную щётку под углом 90° и разрушает её, частицы ФАП перемещаются в рабочий зазор дополнительной магнитной системы. Одновременно импульс магнитного поля, наведённый в рабочем зазоре дополнительной магнитной системы, воздействует и на обрабатываемую заготовку.

Затем производится отключение дополнительной магнитной системы и включение основной. Ферроабразивный порошок перемещается в рабочий зазор основной магнитной системы. Формируется регенерированная ферроабразивная щётка с восстановленной режущей способностью за счёт замены и оборота ферроабразивных частиц, контактирующих с обрабатываемой заготовкой. Такое поочерёдное переключение основной и дополнительной магнитной системы позволяет производить обработку всегда острыми кромками ферроабразивных частиц.

Для подтверждения рациональности применения дополнительного магнитного поля с целью регенерации контура режущего инструмента была создана экспериментальная установка с дополнительной магнитной системой, на которой проведен ряд экспериментов.

Условия проведения эксперимента: магнитная индукция основной магнитной системы $B_0 = 0,9$ Тл; магнитная индукция дополнительной магнитной системы $B_d = 1,1 \dots 1,9$ Тл; рабочий зазор основной маг-

нитной системы $\delta_0 = 1$ мм; рабочий зазор дополнительной магнитной системы $\delta_d = 0,5$ мм; зернистость ферроабразивного порошка FeTiC $\Delta = 100 \dots 160$ мкм; скорость главного движения $V = 0,1 \dots 0,9$ м/с; время обработки $\tau = 30 \dots 90$ с; интервал включения дополнительной магнитной системы $u = 5 \dots 25$ с; продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы $\tau_d = 2 \dots 6$ с. Образцами служили поршневые пальцы $\varnothing = 25$ мм (материал – сталь 12ХН3А, твердость поверхностного слоя 58...62 HRC).

Выходные показатели: изменение шероховатости поверхностей деталей, ΔRa , мкм; производительность MAO, Δt , мг/с. Измерение шероховатости поверхности производилось на профилографе-профилометре Mitutoyo SJ-201P. Масса деталей взвешивалась на весах Massa-K BK-600 с точностью до 0,01 г.

Экспериментальные исследования влияния дополнительного импульсного магнитного поля на качество MAO. Формирование микропрофиля поверхности при MAO происходит в результате одновременно протекающих 2-х механизмов воздействия абразива: 1) срезание вершин исходного профиля; 2) прорезание новых углублений на поверхности.

Исходная поверхность, полученная после чистового точения, имеет более шероховатый профиль по сравнению с абразивной обработкой. При этом проблематично получать точное значение исходной шероховатости на всех заготовках, которые в дальнейшем подверглись MAO, так как микропрофиль при обработке формируется под воздействием большого числа случайных факторов. В результате распределение параметра шероховатости Ra в исходном состоянии имело рассеивание, показанное на гистограмме (рисунок 3).

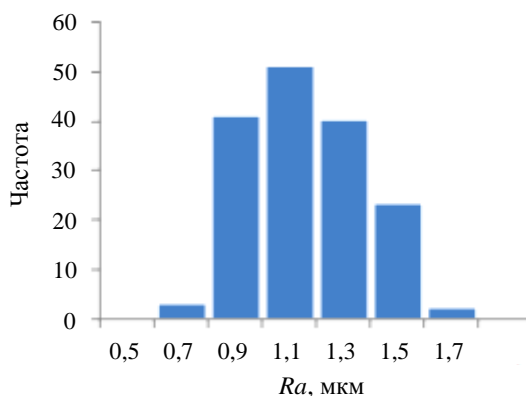


Рисунок 3. – Гистограмма распределения исходной шероховатости поверхности

Распределение исходной шероховатости близко к нормальному и имеет значительную дисперсию (среднеквадратичное отклонение Ra составило 0,21 мкм). Поэтому нельзя допустить, что в исходном состоянии все заготовки были равноценны. Очевидно, что при MAO заготовки с большей исходной шероховатостью будут в большей степени подвержены первому механизму формирования микропрофиля, и изменение параметра Ra для них может быть более значительным, чем для заготовок с малой исходной шероховатостью. Следовательно, фактор «исходная шероховатость» должен быть включен в уравнение регрессии, описывающее изменение шероховатости в результате MAO на различных режимах. В этом случае каждый дубль, выполненный при одинаковых режимах MAO, строго говоря, не является повторением, так как отличается исходной шероховатостью. Поэтому предварительная обработка данных, включающая вычисление средних и дисперсий в каждой точке плана эксперимента, не имеет смысла.

Поиск уравнения регрессии сводился к виду полиномиальной модели 2-го порядка в нормированных координатах, в которое включен также фактор $Ra_{исх}$. Расчеты выполнены с помощью программы STATISTICA, процедура GRM (General Regression Model – общая регрессионная модель).

Для выявления «выбросов» – аномально больших разностей между экспериментальным и расчетным значением параметра в точке плана – использовали оценки студентизированных удаленных остатков $S.DRes$ [5]. Результат наблюдения исключался из расчетов, если для него $|S.DRes| > 3$.

На основе полученных данных рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, статистическая значимость которых оценивалась по критерию Стьюдента на основе дисперсии, базирующейся на остаточной сумме квадратов. Незначимые коэффициенты исключались из уравнения методом обратного пошагового исключения, так как план эксперимента не ортогональный. В итоге получено уравнение вида

$$\Delta Ra = Ra_{исх} - b_0 + b_2 X_2 + b_{24} X_2 X_4 - b_{25} X_2 X_5 - b_{35} X_3 X_5 - b_{11} X_1^2,$$

которое описывает результаты эксперимента с коэффициентом множественной корреляции $r = 0,9$.

Анализ величин коэффициентов регрессии показал, что фактором, наиболее влияющим на изменение шероховатости, является исходная шероховатость. Чем она больше, тем больше изменение шероховатости в результате МАО. В среднем шероховатость после МАО уменьшается на 87% от исходной величины, минус 0,26 мкм.

Вторым по значимости является индуктивность B_d (X_2). Возрастание индуктивности наиболее значимо влияет на уменьшение шероховатости после МАО. Увеличение напряженности магнитного поля увеличивает воздействие дополнительной магнитной системы на регенерацию контура режущего инструмента, вызывая значительное изменение шероховатости (рисунок 4).

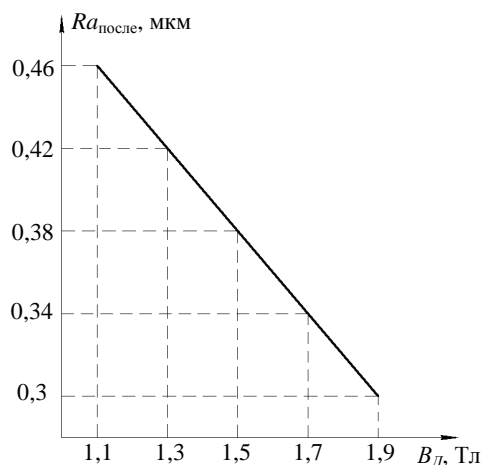


Рисунок 4. – Зависимость шероховатости после МАО от величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной катушкой B_d

В числе главных эффектов – время обработки, влияние которого нелинейно (X_1^2), при этом оптимальным является среднее значение времени в варьируемом интервале. Это можно объяснить тем, что при малом времени обработки не успевают удалиться исходные микронеровности, а при большом формируется больше новых.

Факторы X_4 и X_5 , надо признать, не оказывают статистически значимого самостоятельного влияния, их роль проявляется только во взаимодействиях с другими факторами. Взаимодействие X_2X_4 указывает на то, что изменение шероховатости при увеличении индуктивности можно увеличить одновременным увеличением числа включений дополнительного магнитного поля. Но при этом, как показывает взаимодействие факторов X_2X_5 , периоды включения дополнительного магнитного поля целесообразно принять минимальными.

Взаимодействие факторов X_3X_5 указывает на то, что дополнительное уменьшение шероховатости после МАО может быть достигнуто при большой скорости резания.

Таким образом, максимальное снижение шероховатости после МАО может быть получено на режиме обработки, приведенном в таблице 1.

Таблица 1. – Оптимальные значения факторов

Оптимальные значения факторов					Расчетное значение ΔRa , мкм
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	
0	1	1	1	-1	0,87 $Ra_{\text{исх}}$ - 0,17
τ , с	B_d , Тл	V , м/с	u , с	τ_d , с	
60	1,9	0,9	25	6	

Экспериментальные исследования влияния дополнительного магнитного поля на производительность МАО проводились на установке ЭУ-6. При этом был реализован метод 5-ти факторного математического планирования. В качестве исследуемого параметра принималась производительность МАО (Y). Варьируемыми факторами в эксперименте являлись: время обработки τ (X_1); магнитная индукция дополнительной магнитной системы B_d (X_2); скорость главного движения V (X_3); интервал включения дополнительной магнитной системы u (X_4); продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы τ_d (X_5).

Уравнение регрессии искали в виде полиномиальной модели 2-го порядка в нормированных координатах. Расчеты выполнены с помощью программы STATISTICA, процедура GRM (General Regression Model – общая регрессионная модель).

Несмотря на то, что дисперсии по точкам плана однородны, среди экспериментальных значений, включающих по 5 дублей в каждой точке плана, могут присутствовать «выбросы» – экспериментальные точки, имеющие большие отклонения относительно соответствующих расчетных значений согласно полученному уравнению регрессии. Такие точки существенно снижают точность оценки параметров регрессионного уравнения и вызывают их смещения. Для выявления подобных опытов применяются различные процедуры оценки остатков – разности между экспериментальным и расчетным значением параметра в точке плана. Мы использовали оценки студентизированных удаленных остатков S.DRes [5]. Результат наблюдения исключался из расчетов, если для него $|S.DRes| > 2,5$. На основании этих данных рассчитаны коэффициенты уравнения регрессии, статистическая значимость которых оценивалась по критерию Стьюдента. Незначимые коэффициенты исключались из уравнения методом обратного пошагового исключения, так как план эксперимента неортогонален.

В итоге получено уравнение следующего вида:

$$\Delta m = b_0 - b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 - b_{13} X_1 X_3 + b_{14} X_1 X_4 + b_{23} X_2 X_3 + b_{25} X_2 X_5 + b_{22} X_2^2 - b_{33} X_3^2.$$

В результате выполненных экспериментов установлено, что по степени влияния на производительность MAO параметры можно расположить в ряд: $V \rightarrow \tau \rightarrow V \times u \rightarrow B_d \rightarrow B_d \times \tau_d$.

Возрастание скорости $V(X_3)$ наиболее способствует увеличению производительности (рисунок 5), причём эта зависимость нелинейная, и отрицательный коэффициент при квадратичном эффекте этого же фактора указывает, что прирост производительности замедляется по мере роста скорости.

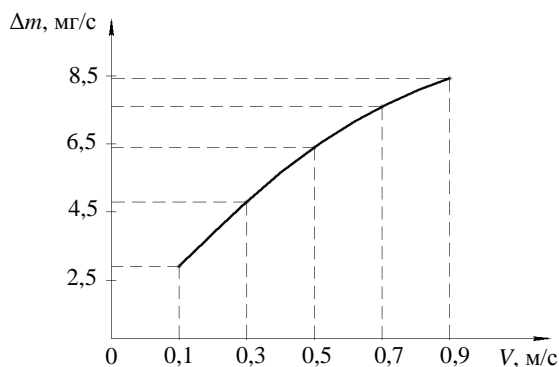


Рисунок 5. – Зависимость производительности от скорости резания V

Вторым по значимости фактором является время обработки τ (X_1). Интенсивность съёма металла с поверхности обрабатываемой детали линейно уменьшается по ходу времени, однако эффект этого фактора взаимодействует с $V(X_3)$ и $u(X_4)$. Уменьшение можно «затормозить», если при больших скоростях применять малые интервал включения дополнительной магнитной системы.

Увеличение в рабочем зазоре магнитной индукции дополнительной магнитной системы $B_d(X_2)$ нелинейно повышает производительность, причём положительный квадратичный эффект указывает на интенсивный рост (рисунок 6).

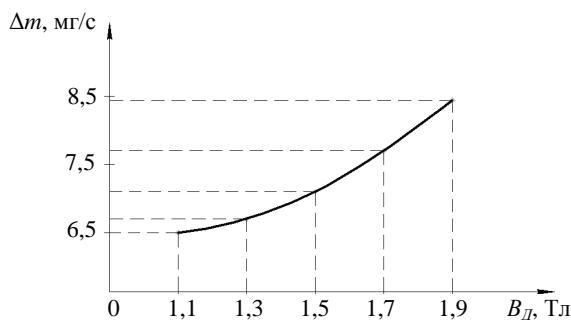


Рисунок 6. – Зависимость производительности от величины магнитной индукции, генерируемой дополнительной катушкой B_d

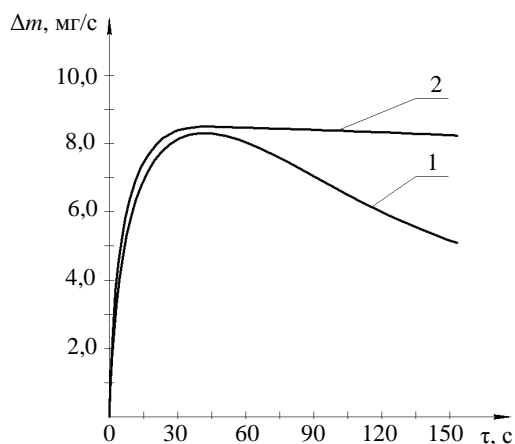
Интервал включения дополнительной магнитной системы $u(X_4)$ и продолжительность цикла работы дополнительной магнитной системы $\tau_d(X_5)$ не оказывают статистически значимого самостоятельного влияния, их роль проявляется только во взаимодействиях с другими факторами. Положительное влияние увеличения индукции B_d может быть усилено возрастанием длительности включения τ_d дополнительной магнитной системы.

Оптимизационная задача по поиску режима, обеспечивающего максимальную производительность, решена в программе MSExcel методом ОПГ (обобщённый приведенный градиент) [6]. В результате получено, что оптимальный режим находится на границе изученного факторного пространства (таблица 2).

Таблица 2. – Оптимальные значения факторов

Оптимальные значения факторов					Расчетное значение Δm
X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	8,44 мг/с
τ , с	B_d , Тл	V , м/с	u , с	τ_d , с	Экспериментальные значения Δm
30	1,9	0,9	5	6	9,33; 8,33; 7,67; 8,33

Проведённый эксперимент доказывает положительное воздействие дополнительного импульсного магнитного поля на производительность МАО. Применение дополнительного магнитного поля при МАО позволяет регенерировать ферроабразивную щётку и сохранять её режущую способность на протяжении длительного времени (рисунок 7).



1 – без регенерации ферроабразивной щётки;
2 – с регенерацией дополнительным импульсным магнитным полем

Рисунок 7. – Зависимость производительности от времени обработки

В заключение исследования можно сделать следующие **выводы**:

- в результате проведённых экспериментов установлено положительное влияние дополнительного магнитного поля на качество и производительность магнитно-абразивной обработки;
- определены оптимальные значения варьируемых факторов, обеспечивающие максимальное влияние на уменьшение шероховатости после МАО с дополнительной магнитной системой: $\tau = 60$ с; $B_d = 1,9$ Тл; $V = 0,9$ м/с; $u = 25$ с; $\tau_d = 6$ с;
- определены оптимальные значения варьируемых факторов, обеспечивающие максимальную производительность МАО с дополнительной магнитной системой: $\tau = 30$ с; $B_d = 1,9$ Тл; $V = 0,9$ м/с; $u = 5$ с; $\tau_d = 6$ с.

ЛИТЕРАТУРА

1. Акулович, Л.М. Основы магнитно-абразивной обработки металлических поверхностей / Л.М. Акулович, Л.Е. Сергеев, В.Я. Лебедев. – Минск : БГАТУ, 2012. – 316 с.

2. Сакулевич, Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск : Наука и техника, 1981. – 328 с.
3. Барон, Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л. : Машиностроение, Ленингр. отд-ние, 1986. – 176 с.
4. Акулович, Л.М. Управление обработкой поверхностей деталей машин в процессах магнитно-электрического упрочнения и магнитно-абразивной обработки / Л.М. Акулович, А.В. Миранович, О.Н. Ворошуха // Весці Нац. акад. навук Беларусі. Серыя фіз.-тэхн. навук. – 2016. – № 4. – С. 37–48.
5. Портал знаний [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://statistica.ru/glossary/general/studentizirovannye-udalennye-ostatki/>. – Дата доступа: 02.05.2016.
6. Відділення другої вищої та після дипломної освіти ННК "ІІСА" НТУУ "КПІ". – Нац. техн. ун-т України. – Київ. – [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://iasa.org.ua/lectons/iso/6/6.7.htm>. – Дата доступа 02.05.2016.

Поступила 27.06.2018

FEATURES OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING WITH CUTTING TOOL CONTOUR REGENERATION BY PULSED MAGNETIC FIELD

L. AKULOVICH, M. DECHKO, O. VOROSHUHO

The influence of the contour regeneration of the cutting tool by a pulsed magnetic field on the quality of the surfaces of parts and performance in magnetic abrasive processing is considered. The positive effect of an additional magnetic field on the quality and performance of magnetic abrasive treatment was established. The optimal values of the variable factors providing the maximum effect on the reduction of roughness after this treatment with an additional magnetic system are determined.

Keywords: *magnetic-abrasive machining, ferroabrasive powder, pole tip, cutting tool contour regeneration, ferroabrasive brush.*