

Обработка плоских поверхностей магнитно-абразивным методом торцевыми головками на постоянных магнитах

1. Влияние типа магнитно-абразивного порошка на эффективность магнитно-абразивной обработки

В. С. Майборода¹ • Д. Ю. Джулий¹ • А. И. Зелинко²

¹ Механико-машиностроительный институт, КПИ им. Игоря Сикорского, г. Киев, Украина;

² Сообщество технологии изготовления и развития в Шмалькальден, Германия

Received: 12 April 2020 / Accepted: 25 May 2020

Проблематика. В современном производстве возникает необходимость в финишной обработке поверхностей стальных деталей с нулевой и малой кривизной с целью снижения шероховатости и получения выглаженного микропрофиля. Актуальным является создание мобильного, универсального подвижно-скоординированного абразивного инструмента, обладающего широким спектром его использования на станках разных типов. Для этого необходимо провести исследование по влиянию не только типа магнитно-абразивного порошка, а и его формы и размеров на эффективность обработки плоских поверхностей головками торцевого типа с постоянными магнитами повышенной мощности, а и определить рациональные условия их эксплуатации.

Цель исследования. Целью данной работы было определение эффективности процесса магнитно-абразивной обработки торцевыми головками на постоянных магнитах плоских ферромагнитных поверхностей магнитно-абразивными порошками различных типов, с разной формой частиц и величиной рабочего зазора.

Методика реализации. Исследование выполняли на плоских образцах из стали 45 с предварительной их подготовкой торцевым фрезерованием и шлифованием. Их обработку выполняли головкой, на рабочем торце которой формируется магнитно-абразивный порошок в виде щетки, при разных рабочих зазорах.

Результаты исследования. В работе приведены результаты исследований магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей головками с постоянными высокомоментными магнитами. При исследовании возможности использования разных по типу, форме и размерам частиц магнитно-абразивных порошков показано, что целесообразным является использование порошков с оскользящей формой частиц с большим количеством режущих микрокромки на поверхности частиц и с малым радиусом их округления. Полученные результаты позволяют предположить, что процесс формирования магнитно-абразивного инструмента, непосредственно его форма и характер расположения магнитно-абразивных частиц и их групп по отношению к обрабатываемой поверхности будут оказывать существенное влияние на конечный результат обработки.

Выводы. В результате экспериментальных исследований процесса магнитно-абразивной обработки плоских стальных поверхностей порошками различных типов и зернистости, показано возможность обеспечения шероховатости поверхности с $Ra < 0,05$ мкм с одновременным удалением волнистости поверхности. Установлено, что решающим технологическим ориентиром при достижении минимальной шероховатости является величина рабочего зазора, которая должна быть не меньше 1,5 мм.

Ключевые слова: Шероховатость, магнитно-абразивная обработка, постоянный магнит, рабочий зазор, магнитно-абразивный порошок, микропрофиль.

Вступление

Для финишной обработки поверхностей с малой кривизной, плоскостей традиционно применяют ряд методов [1, 2], которые обеспечивают возможность формирования шероховатости поверхности с параметром $Ra < 0,1$ мкм. Реализация на производстве таких методов требует наличия соответствующего, специализированного оборудования, которое в большинстве случаев не является универсальным. Одним из перспективных методов финишной обработки является метод магнитно-абразивной обработки (МАО) [3, 4, 5], широкое внедрение в промышленность которое требует создания специального оборудования или специальных технологических наладок к стандартным металлообрабатывающим станкам. Как правило, подобные

✉ В. С. Майборода
maiborodavs@gmail.com

✉ Д. Ю. Джулий
dmytro.dzhulii@gmail.com

✉ А. И. Зелинко
andrii.zelinko@ovgu.de

технологические наладки включают в себя устройства для удержания и поддержания в рабочем квазистабильном состоянии магнитно-абразивного порошка, из которого в процессе обработки формируется магнитно-абразивный инструмент (МАИ). В большинстве случаев для этого используют электромагнитные системы, которые, как правило, достаточно габаритные и требуют определенных затрат для их установки на стандартное оборудование. Использование постоянных высокомоощных магнитов для формирования в зоне обработки эффективного МАИ открывает широкие возможности при создании относительно простых и мобильных рабочих головок, использование которых не ограничивается конструкцией станка.

Состояние проблемы

Исследованием процесса МАО плоских поверхностей деталей специальными головками на базе постоянных магнитов высокой мощности в настоящее время уделяется повышенное внимание. Актуальность подобных исследований объясняется, по-видимому, возможностями создания мобильного, универсального подвижно-скоординированного абразивного инструмента, обладающего широким спектром его использования на станках разных типов. В работе [6] выполненный анализ суперфинишных методов обработки поверхностей сложной формы показал, что именно МАО компактными головками с высокомоощными магнитами является одной из наиболее перспективных, но мало изученной. В [7] описаны реальные конструкции цилиндрического инструмента с постоянными магнитами для финишной обработки плоских поверхностей из медного сплава. Показана возможность достижения за 7,5 минут обработки шероховатости поверхности на уровне $Ra = 0,03$ мкм при исходной шероховатости $Ra = 0,27$ мкм. Магнитно-абразивной обработке никелевого сплава Inconel 718 посвящена работа [8]. Установлено, что наибольшее влияние на эффективность процесса МАО торцевыми головками на постоянных магнитах оказывает скорость обработки и величина рабочего зазора.

Использование электромагнитных торцевых головок при обработке листовой нержавеющей стали марки 321 позволило обеспечить не только снижение высоты микронеровностей на поверхности, а и проанализировать влияние различных технологических параметров процесса МАО на изменение поверхностной твердости [9]. Важно отметить, что в работе предложена рациональная конструкция рабочей поверхности полюсного наконечника головки в виде прямоугольных выступов на торцевой рабочей части.

В [10] представлены исследования процесса МАО деталей из стали AISI 1018 торцевыми головками на постоянных магнитах, в которых установлено влияние скорости обработки, подачи, количества абразива в рабочей зоне, его фракционного состава на изменение эффективности процесса полирования. Отмечается необходимость дополнительного изучения влияния типа использованных при МАО порошков, их размеров и формы частиц на качество обработки.

Обработке магнитно-абразивным методом деталей из алюминиевых сплавов после селективного лазерного плавления (SLM) торцевыми головками из высокомоощных Nb-Fe-B магнитов посвящена статья [11]. Показана принципиальная возможность достижения на обрабатываемых поверхностях шероховатости с параметром $Ra < 0,15$ мкм. Важно отметить, что в выше описанных исследованиях для формирования МАИ были использованы механические смеси абразивных (Al_2O_3 , SiC) и ферромагнитных (Fe) порошков, которые в процессе технологического цикла обработки сегрегируют, что приводит к снижению эффективности и качества обработки.

Для повышения эффективности обработки различных материалов торцевыми головками на постоянных магнитах предлагается использование различных типов СОТС [12]. В [13] предлагают вводить дополнительное осциллирующее движение с целью обеспечения дополнительного прижима порошка к обрабатываемой поверхности.

Выполненный краткий обзор исследований показал, что актуальным является проведение работ по изучению влияния не только типа магнитно-абразивного порошка, а и его формы и размеров на эффективность обработки плоских поверхностей головками торцевого типа с постоянными магнитами повышенной мощности, а и по определению рациональных условий их использования.

Поэтому **целью** данного этапа работы было определение эффективности процесса МАО торцевыми головками на постоянных магнитах плоских ферромагнитных поверхностей магнитно-абразивными порошками различных типов, с разной формой частиц и величиной рабочего зазора.

Материалы и оборудование для проведения исследований

Экспериментальные исследования выполняли на плоских образцах из стали 45. Предварительная обработка поверхностей перед МАО – либо фрезерование торцевой фрезой диаметром 200 мм, либо шлифование. При выбранной схеме предварительной обработки имеют место различные значения характеристик микропрофиля подготовленных под МАО поверхностей: в направлении, совпадающем с

направлением подачи торцевой фрезы и в перпендикулярном. В нашем случае в направлении подачи величина Ra составляет 1,6 – 2 мкм, а в перпендикулярном направлении 0,6 – 0,8 мкм. После подготовительной операции шлифованием были получены поверхности с $Ra = 0,15$ мкм и $Rz = 1,07$ мкм поперек направления шлифования и соответственно $Ra = 0,05$ мкм и $Rz = 0,3$ мкм – вдоль. Для MAO использовали головку, на рабочем торце которой формируется МАИ в виде щетки [14, 15].

Для обработки использовали магнитно-абразивные порошки, полученные методом диспергирования расплава [16, 17], характеристика которых приведена в табл.1.

Величину рабочего зазора – от торцевой поверхности головки до обрабатываемой поверхности изменяли в диапазоне 1,2 – 4,6 мм. Частота вращения торцевой головки и скорость подачи по результатам предыдущих исследований [14, 15] составили 900 об/мин и 10 мм/мин, соответственно.

В процессе проведения исследований на каждом этапе выполняли контроль значений Ra , Rz , характер изменения величины опорной поверхности микропрофиля на разных уровнях и рассчитывали по методике [18] высоту профиля на которой происходит переход от микровыступов к микровпадинам.

Таблица 1. Характеристики используемых магнитно-абразивных порошков

Тип порошка	Размер частиц, мкм	Форма частиц	Степень неравносности	Радиус округления режущих кромок, мкм
Ферромап	200/100	оскольчатая	равноосные, $k_f=1,5$	48,6
	315/200		равноосные, $k_f=1,4$	65,7
	400/315		равноосные, $k_f=1,3$	101,5
	630/400		равноосные, $k_f=1,4$	89
Полимам-М	400/315	округлая	неравноосные, $k_f=1,89$	115
Царамам	630/400	округлая	неравноосные, $k_f=1,88$	70,2
ДЧК	630/400	оскольчатая	равноосные, $k_f=2,96$	45
ПР Р6М5	315/200	округлая	равноосные, $k_f=1,05$	126

Результаты экспериментальных исследований

На первом этапе анализировали возможность использования разных по типу, форме и размерам частиц магнитно-абразивных порошков (табл. 1) при MAO стали 45 торцевыми головками. Полученные результаты изменения параметра Ra после MAO порошками различных типов показали, что наилучшие результаты – минимальные значения получаемой шероховатости обеспечиваются после обработки МАИ, сформированным из магнитно-абразивного порошка Ферромап с размером частиц 630/400 мкм, что подтверждает результаты исследований абразивной и полирующей способности порошков, приведенных в [17, 19]. Наименьшие значения величины параметра Ra полученные при использовании различных порошков при исходной шероховатости $Ra = 1-2$ мкм приведены в таблице 2.

Таблица 2. Достижимый минимальный уровень параметра Ra после MAO различными порошками

Тип порошка	Размер частиц, мкм	Достижимый уровень параметра Ra после MAO, мкм	$\Delta Ra = Ra_{исх.} - Ra_{кон.}$, мкм.
Ферромап	200/100	0,08	0,82
	315/200	0,1	1,33
	400/315	0,08	1,27
	630/400	0,03	1,2–1,9
ДЧК _{нов.}	630/400	0,38	1,0
ДЧК _{б/у}	630/400	0,46	0,64
Полимам-М	400/315	1,8	0,17
ПР Р6М5	315/200	0,7	0,1
Царамам	630/400	0,17	0,83

Показано, что целесообразным является использование порошков с оскользящей формой частиц с большим количеством режущих микрокромки на поверхности частиц и с малым радиусом их округления [16]. Использование округлых порошков не обеспечивает эффективного снижения шероховатости поверхности после фрезерования. При этом реализуется только их пластическое деформирование и выглаживание без необходимого диспергирования материала из поверхности (рис. 1). Следы взаимодействия отдельных частиц порошка Полимам-М с округлыми частичками с обрабатываемой поверхностью особенно активно проявляются при малом рабочем зазоре – 2 мм, в условиях образования активных зон заклинивания МАИ, в которых имеет место вдавливание отдельных частиц в поверхность образца (рис. 1а). При увеличении рабочего зазора на 0,6–1 мм и более, когда существенно нивелируются условия заклинивания МАИ в рабочем зазоре происходит пластическое деформирование и выглаживание микровыступов без их удаления. То есть следы микронеровностей поверхности, полученные на этапе фрезерования – микроволнистость не удаляются, а только несколько уменьшаются. Аналогичные результаты получены при MAO порошком ПР Р6М5.

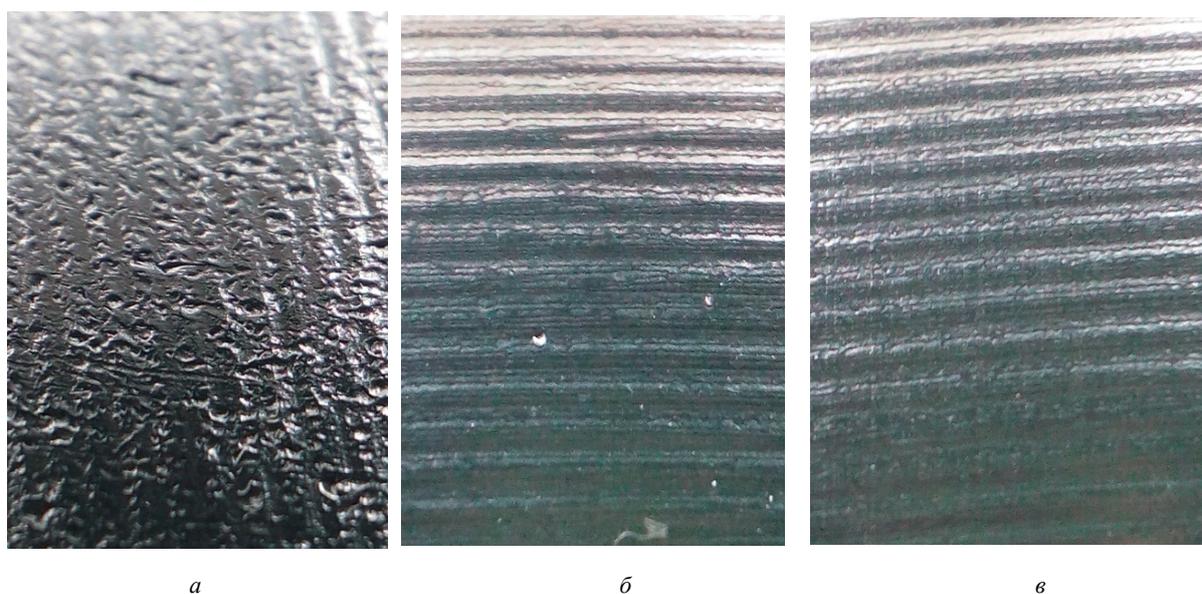


Рис. 1. Внешний вид предварительно фрезерованной поверхности детали после MAO порошком Полимам-М (400/315 мкм) с разной величиной рабочего зазора: а) 2 мм, б) 2,6 мм в) 3 мм, х20

Анализ полученных экспериментальных данных показал, что важнейшим технологическим параметром при MAO плоскостей головками торцевого типа будет величина рабочего зазора. Следует отметить и тот факт, что, несмотря на рекомендации по выбору оптимального размера порошка по данным об исходной шероховатости [19] и достижимой после MAO шероховатости, наилучшие результаты получены при использовании порошка Ферромап с размером частиц 630/400 мкм. Более подробные исследования по изменению параметра Ra порошками с оскользящей формой частиц на примере порошка Ферромап с разным размером частиц, различными рабочими зазорами и разной величиной исходной шероховатости приведены на рис. 2. Полученные результаты позволяют предположить, что процесс формирования МАИ, непосредственно его форма и характер расположения магнитно-абразивных частиц и их групп по отношению к обрабатываемой поверхности будут оказывать существенное влияние на конечный результат обработки.

Показано, что варьирование величиной рабочего зазора позволяет управлять процессом диспергирования материала с поверхности. При определении рациональных величин рабочих зазоров, необходимых для обработки, с целью получения минимальной шероховатости плоских поверхностей деталей изготовленных из стали 45 в процессе MAO торцевыми головками с использованием, описанных выше, магнитно-абразивных порошков установлена линейная зависимость вида: $h = 4,96 \lambda + 1,5$, где h – величина рабочего зазора, мм; λ – средний размер частиц магнитно-абразивного порошка в фракции, мм.

Свободный член в приведенном уравнении характеризует тот минимальный зазор, меньше которого будет проявляться активное шаржирование порошковым материалом обрабатываемой поверхности либо ее пластическое деформирование. Проведенные тестовые эксперименты на различных порошках при использовании рабочего зазора величиной $h = 1,2 - 1,4$ мм полностью подтвердили данное предположение. Фотографии обработанных поверхностей приведены на рис. 1а, рис. 3.

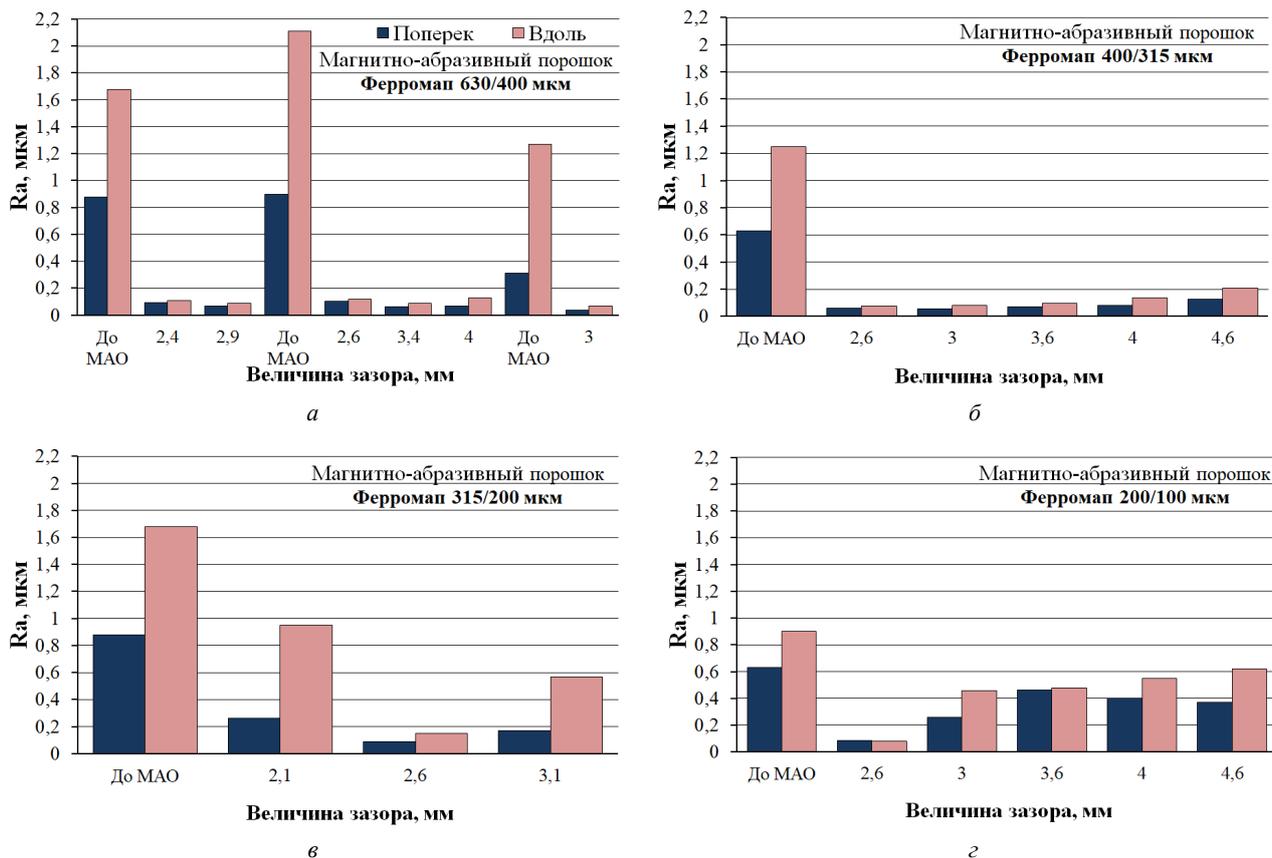


Рис. 2. Достижимая шероховатость поверхности после MAO порошком Ферромаг при различном фракционном составе и величине рабочего зазора: а) 630/400 мкм [14], б) 400/315 мкм, в) 315/200 мкм, г) 200/100 мкм

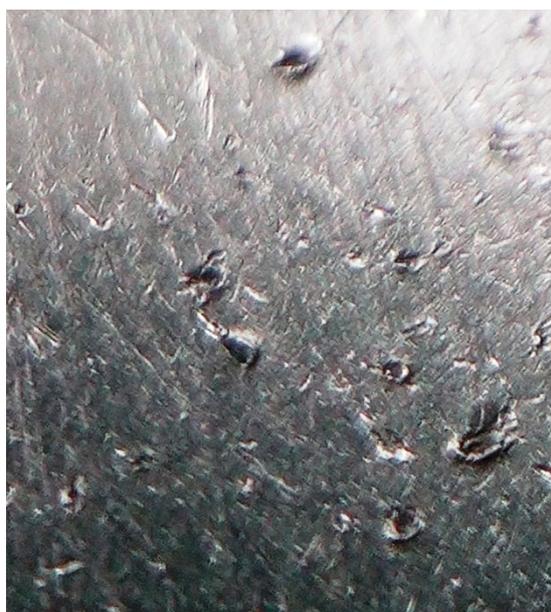


Рис. 3. Внешний вид поверхностей после MAO порошками а) – ДЧК (630/400 мкм), б) – Ферромаг (630/400 мкм) при использовании рабочих зазоров менее 1,4 мм; x20

Следует отметить, что процесс MAO с использованием порошков с округлой формой частиц (Полимам-М, ПР Р6М5) не привел не только к существенному уменьшению параметра Ra , а и к изменению формы кривых $t=f(p)$ и значит и к изменению положения зоны перехода от микропадин к микровыступам. Анализ расположения зон перехода от выступов к впадинам, и выше приведенные данные о изменении параметра Ra в результате MAO, показали, что смещение зоны перехода от микропадин к микровыступам в область значений больше чем $p=0,5$ свидетельствует о активном снижении волнистости обрабатываемой поверхности, полученной на стадии фрезерования. Подобные результаты получены при MAO оскольчатými порошками типа Ферромап [14] с рабочими зазорами h большими 3 мм для различной исходной шероховатости и применяемого магнитно-абразивного порошка (рис. 4). Отметим, что как и для ранее полученных результатов изменения параметра Ra , наиболее рациональные виды опорных поверхностей характерны для условий MAO порошком Ферромап с размером частиц 630/400 мкм, который имеет повышенную абразивную способность, определяемую реологическими характеристиками, намагниченностью и способностью к формированию достаточно устойчивых квазистабильных формирований в МАИ [17] по сравнению с более мелкими. Для МАИ, сформированного из более мелких порошков имеет место смещение зоны перехода от микровыступов к микропадинам шероховатой поверхности в область значений $p < 0,5$, что особенно хорошо проявляется при MAO порошком с размером частиц 200/100 мкм. Это связано с тем, что более мелкие порошки лучше нивелируют относительно обрабатываемой поверхности, обеспечивая располировку микропадин.

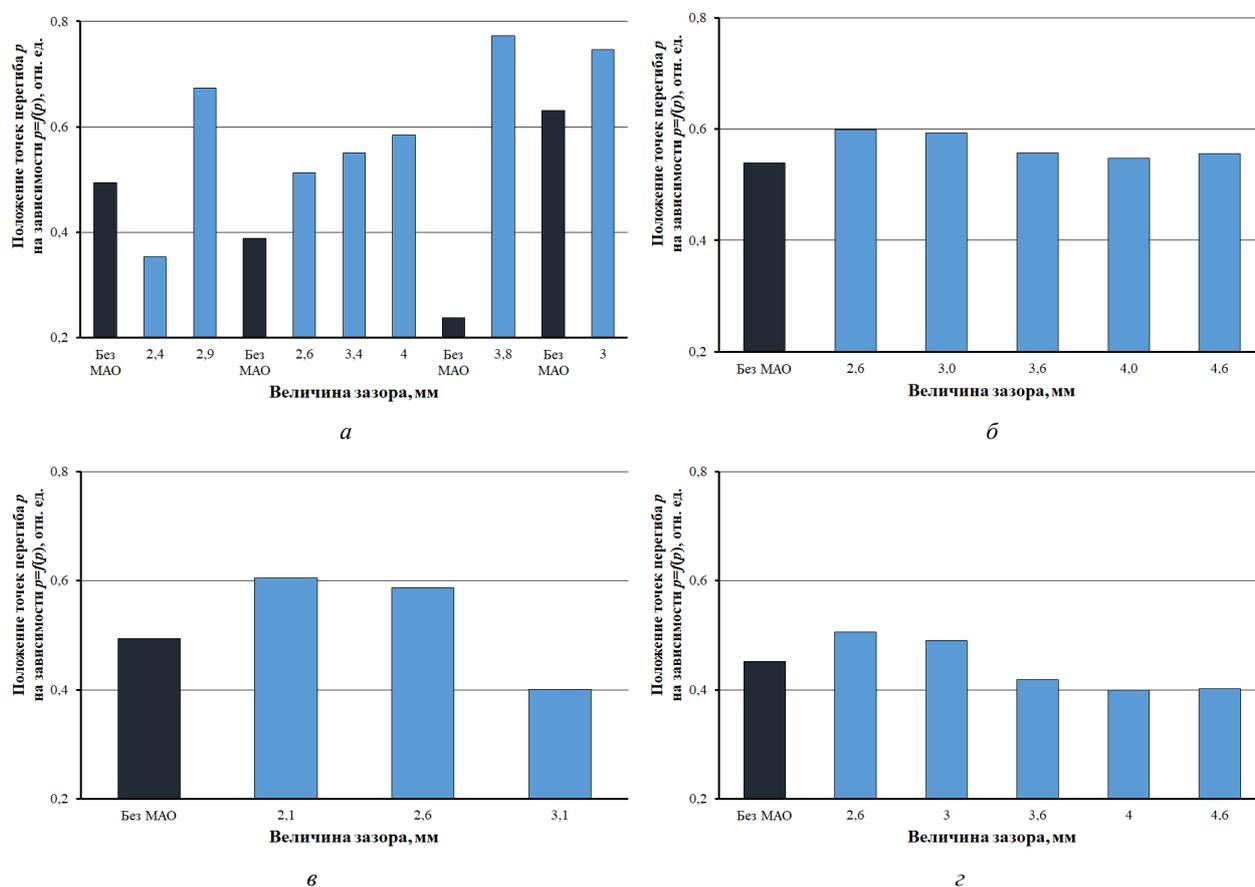


Рис. 4. Положения точек перегиба на кривых опорных поверхностей микропрофиля, полученных после MAO порошком Ферромап при различных исходных поверхностях, сформированных после фрезерования, для различных зазоров и размеров частиц порошка: а) 630/400 мкм [14], б) 400/315 мкм, в) 315/200 мкм, г) 200/100 мкм

На втором этапе исследования выполняли MAO предварительно шлифованных образцов при частотах вращения рабочей головки 900 об/мин и 1400 об/мин и величине рабочего зазора 2,8 мм порошком марки Ферромап с размерами частиц 630/400 мкм, 315/200 мкм и 200/100 мкм. Результаты показали возможность формирования микропрофиля с величиной Ra на уровне 0,031–0,047 мкм и величиной Rz на уровне 0,23–0,46 мкм при исходных 0,15 и 1,07 мкм, соответственно, в зависимости от направления шлифования. Полученные результаты представлены на рис. 5.

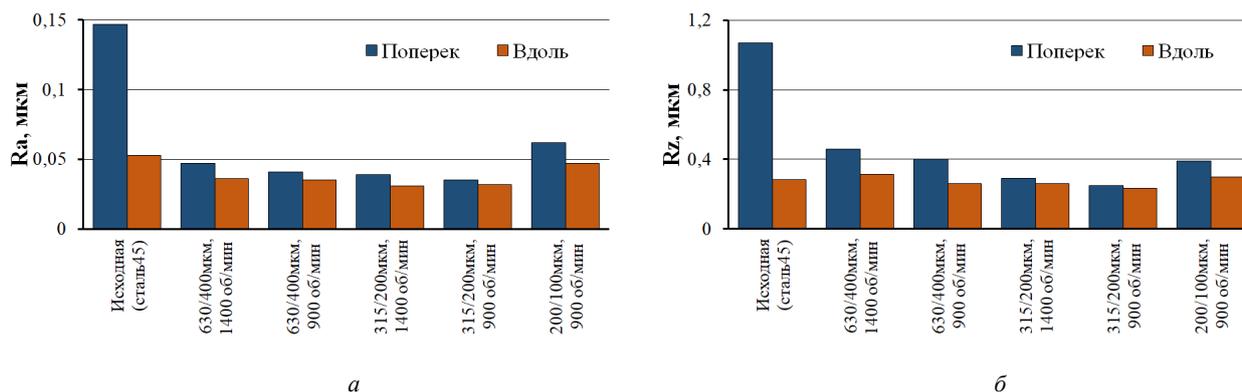


Рис. 5. Изменение параметров микропрофиля плоской поверхности после MAO различными порошками при различной частоте вращения магнитной головки

Анализ изменения величины опорной поверхности полученного микропрофиля показал, что наилучшие результаты получены при использовании порошка Ферромап с размером частиц 315/200 мкм, когда зона перехода от выступов микронеровностей к впадинам (рис. 6) располагается на относительной высоте профиля $p > 0,52$ отн. ед., что свидетельствует о наименьшем количестве микровыступов на обработанной поверхности по сравнению с использованием порошков с другими размерами зерен.

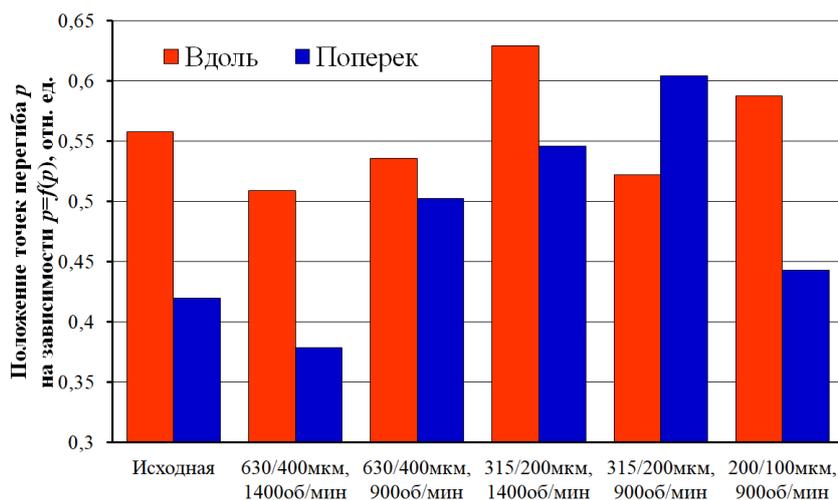


Рис. 6. Положения точек перегиба на кривых опорных поверхностей микропрофиля, полученных после MAO порошком Ферромап с различным размером частиц и частотой вращения рабочей головки

Выводы

Выполненные исследования процесса MAO плоских ферромагнитных поверхностей после операций фрезерования и шлифования торцевыми головками типа щетка на постоянных высокомоощных магнитах. Установлено особенности процесса обработки магнитно-абразивными порошками различных типов, с разными формами зерна и их размерами. Показана возможность обеспечения шероховатости поверхности с $Ra < 0,05$ мкм с одновременным удалением волнистости поверхности. Установлено, что решающим технологическим ориентиром при достижении минимальной шероховатости является величина рабочего зазора, которая должна быть не меньше 1,5 мм. Меньшие зазоры могут быть причиной шаржирования магнитно-абразивного порошка в обрабатываемую поверхность.

References

1. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / [С.А. Клименко, М.Ю. Копейкина, В.И. Лавриненко та ін.]. – Минск: Беларуская навука, 2017. – 376 с.

2. Интегрированные процессы обработки материалов резанием: учебник / [А.И. Грабченко, В.А. Залого, Ю.Н. Внуков та ін.]. – Сумы: Университетська книга, 2017. – 451 с.
3. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки / Ф.Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 327 с.
4. Барон Ю.М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М. Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
5. Майборода В.С. Магнитно-абразивная обработка деталей сложной формы / В.С. Майборода, И.В. Слободянюк, Д.Ю. Джулий. – Житомир: ПП «Рута», 2017. – 272 с.
6. Nagdeve L. Nanofinishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art / L. Nagdeve, V.K. Jain, J. Ramkumar. // *Manufacturing Rev.* – 2018. – No. 5. – P. 20. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018005>
7. Harsh K. Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool / K. Harsh, G. Vishwas. // *Precision Engineering.* – 2018. – No. 51. – P. 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.003>
8. Chaurasia A. Magnetic abrasive finishing of inconel 718 super alloy using permanent magnet / A. Chaurasia, V. Wankhede. // *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET).* – 2018. – No. 5. – P 1165–1168.
9. Mousa S.M. Improvement the Hardness of Stainless Steel 321 by Magnetic Abrasive Finishing Process / Shakir M. Mousa. // *Nahrain Journal for Engineering Sciences (NJES).* – 2017. – No. 4. – С. 838–845.
10. Uddin M.S. Interplay of Process Variables in Magnetic Abrasive Finishing of AISI 1018 Steel Using SiC and Al₂O₃ Abrasives / M.S. Uddin, V. Santos, R. Marian. // *Journal of Manufacturing and Materials Processing.* – 2019. – Vol. 2, No. 3. – P. 18. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020029>
11. Study on magnetic abrasive finishing of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting / [X. Teng, G. Zhang, Y. Zhao та ін.]. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – 2019. – No. 105. – P. 2513–2521. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04485-5>
12. Павлюкова Н.Л. Использование магнитно-абразивного полирования при отделке изделий из цветных сплавов / Н.Л. Павлюкова. // *Вестник ИГЭУ.* – 2010. – № 3. – С. 1–4.
13. Shaohui Y. Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy / Y. Shaohui, Sh. Takeo. // *International Journal of Machine Tools & Manufacture.* – 2004. – No. 44. – P. 1297–1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.023>
14. AISI 1045 Steel Flat Surfaces Machining Using the Magneto-Abrasive Method / V.S. Maiboroda, O.O. Belajev, D.Y. Dzhulii, I.V. Slobodianiuk. // *Journal of Engineering Sciences.* – 2020. – No. 7. – P. A1–A7. [doi:10.21272/jes.2020.7\(1\).a1](https://doi.org/10.21272/jes.2020.7(1).a1)
15. Вплив режимів магнітно-абразивного оброблення на шорсткість плоских поверхонь / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулій, І.В. Слободянюк, Ю.В. Коцун. // *Тези доповідей VIII міжнародної науково-практичної конференції «Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем».* – 2018. – С. 139–141.
16. Ткачук І.В. Геометричні характеристики магнітно-абразивних порошоків / І.В. Ткачук, В.С. Майборода. // *Надійність інструменту та оптимізація технологічних систем. Збірник наук. праць.* – 2014. – № 34. – С. 49–55.
17. Майборода В.С. Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь : дис. докт. техн. наук : 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович – Київ, 2001. – 404с.
18. Ульяненко Н.В. Підвищення працездатності твердосплавного інструменту шляхом застосування магнітно-абразивного оброблення та нанесення зносостійких покриттів : дис. канд. техн. наук : 05.03.01 / Ульяненко Наталія Валентинівна – Київ, 2006. – 160 с.
19. Олиker В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / В.Е. Олиker. – Москва: Металлургия, 1990. – 176 с.

Flat surfaces machining by the magneto-abrasive method with permanent magnet end-type heads

1. The influence of the type of magneto-abrasive powder on the effectiveness of the magneto-abrasive machining

Maiboroda Victor, Dzhulii Dmytro, Zelinko Andrii

Background. The modern production requires finishing surfaces of steel parts with zero and small curvature in order to reduce roughness and obtain a smoothed microprofile. Actual is the creation of a mobile, universal movably coordinated abrasive tool, which has a wide range of uses on machines of various types. For this, it is necessary to carry out studies on the influence of not only the type of magneto-abrasive powder, but also its shape and size on the effectiveness of flat surfaces machining by high-power permanent magnet end-type heads, and determine the rational conditions for their exploitation.

Objective. The aim of this work was to determine the effectiveness of the magneto-abrasive machining process by permanent magnet end heads of flat ferromagnetic surfaces by the magneto-abrasive powders of various types, with different particle shapes and the size of the working gap.

Methods. The study was carried out on flat samples of steel 45 with their preliminary preparation by face milling and grinding. Their machining was carried out by the head, on the working end of which the magneto-abrasive powder is formed in the form of a brush, with the different working gaps.

Results. The paper presents the results of studies of magneto-abrasive machining of flat surfaces by the heads with permanent high-power magnets. In the study of the possibility of using magneto-abrasive powders of different types, shapes and sizes, it was shown that it is advisable to use powders with an angular particle shape with a large number of cutting micro edges on the particle surface and with a small radius of their rounding. The obtained results suggest, that the process of formation of the magneto-abrasive tool, directly its shape and the nature of the arrangement of magneto-abrasive particles and their groups relative to the machined surface will have a significant impact on the final result of machining.

Conclusions. In the result of experimental studies of the process of magneto-abrasive machining of flat steel surfaces by powders of various types and grit, it was shown that it is possible to provide a surface roughness with $Ra < 0.05 \mu\text{m}$ with simultaneous removing surface waviness. It was established that the decisive technological guideline when achieving the minimum roughness is the size of the working gap, which should be at least 1.5 mm.

Keywords: Roughness, magneto-abrasive machining, permanent magnet, working gap, magneto-abrasive powder, microprofile.

Оброблення плоских поверхонь магнітно-абразивним методом торцевими головками на постійних магнітах

1. Вплив типу магнітно-абразивного порошку на ефективність магнітно-абразивного оброблення

Майборода Віктор Станіславович, Джулій Дмитро Юрійович, Зелінко Андрій Ігорович

Проблематика. У сучасному виробництві виникає необхідність в фінішному обробленні поверхонь сталевих деталей з нульовою і малою кривизною з метою зниження шорсткості і отримання вигладженого мікропрофілю. Актуальним є створення мобільного, універсального рухомо-скоординованого абразивного інструменту, який має широкий спектр його використання на верстатах різних типів. Для цього необхідно провести дослідження по впливу не тільки типу магнітно-абразивного порошку, а і його форми та розмірів на ефективність оброблення плоских поверхонь головками торцевого типу з постійними магнітами підвищеної потужності, а й визначити оптимальні умови їх експлуатації.

Мета дослідження. Метою даної роботи було визначення ефективності процесу магнітно-абразивного оброблення торцевими головками на постійних магнітах плоских ферромагнітних поверхонь магнітно-абразивними порошками різних типів, з різною формою частинок і величиною робочого зазору.

Методика реалізації. Дослідження виконували на плоских зразках зі сталі 45 з попереднім їх підготовленням торцевим фрезеруванням та шліфуванням. Їх оброблення виконували головкою, на робочому торці якої формується магнітно-абразивний порошок у вигляді щітки, при різних робочих зазорах.

Результати дослідження. У роботі наведені результати досліджень магнітно-абразивного оброблення плоских поверхонь головками з постійними високопотужними магнітами. При дослідженні можливості використання різних за типом, формою і розмірами частинок магнітно-абразивних порошоків показано, що доцільним є використання порошоків з осколковою формою частинок з великою кількістю різальних мікрокромок на поверхні частинок і з малим радіусом їх округлення. Отримані результати дозволяють припустити, що процес формування магнітно-абразивного інструменту, безпосередньо його форма і характер розташування магнітно-абразивних частинок і їх груп по відношенню до оброблюваної поверхні будуть мати істотний вплив на кінцевий результат оброблення.

Висновки. В результаті експериментальних досліджень процесу магнітно-абразивного оброблення плоских сталевих поверхонь порошками різних типів і зернистості, показано можливість забезпечення шорсткості поверхні з $Ra < 0,05 \mu\text{m}$ з одночасним видаленням хвилястості поверхні. Встановлено, що вирішальним технологічним орієнтиром при досягненні мінімальної шорсткості є величина робочого зазору, яка повинна бути не менше 1,5 мм.

Ключові слова: Шорсткість, магнітно-абразивне оброблення, постійний магніт, робочий зазор, магнітно-абразивний порошок, мікропрофіль.

References

1. Klimenko, S.A. and dr. (2017), *Finishnaya obrabotka poverkhnostei pri proizvodstve detalei* [Surfaces finishing in the manufacturing of parts] in Chizhik, S.A. and Kheifets, M.L. (ed), *Belaruskaya navuka*, Minsk, Belarus.
2. Grabchenko, A.I., Zaloga, V.A., Vnukov, Yu.N., Verezub, N.V., Dobroskok, V.L., Maiboroda, V.S. and dr. (2017), *Integrirovannye protsessy obrabotki materialov rezaniem: uchebnik* [Integrated machining processes of materials cutting: Student's Book] in Grabchenko, A.I., Zaloga, V.A. (ed), *Universitetskaya kniga*, Sumy, Ukraine.
3. Sakulevich, F.Yu. (1981), *Osnovy magnitno-abrazivnoi obrabotki* [Fundamentals of Magneto-abrasive machining], *Nauka i tekhnika*, Minsk, Belarus.
4. Baron, Yu.M. (1986), *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdelii i rezhushchikh instrumentov* [Magneto-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools], *Mashinostroenie*, Baron, Leningrad.
5. Maiboroda, V.S., Slobodyanyuk, I.V. and Dzhulii, D.Yu. (2017), *Magnitno-abrazivnaya obrabotka detalei slozhnoi formy* [Magneto-abrasive machining of parts with complex shape], PP "Ruta", Zhitomir, Ukraine.

6. Nagdeve, L., Jain, V.K. and Ramkumar, J. (2018), "Nanofinishing of freeform/sculptured surfaces: state-of-the-art", *Manufacturing Rev.*, vol. 5, pp. 20. <https://doi.org/10.1051/mfreview/2018005>
7. Harsh, K. and Vishwas, G. (2018), "Magnetorheological nano-finishing of diamagnetic material using permanent magnets tool", *Precision Engineering*, vol. 51, pp. 30–39. <https://doi.org/10.1016/j.precisioneng.2017.07.003>
8. Chaurasia, A. and Wankhede, V. (2018), "Magnetic abrasive finishing of inconel 718 super alloy using permanent magnet", *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, vol. 5, pp. 1165–1168.
9. Mousa, S. (2017), "Improvement the Hardness of Stainless Steel 321 by Magnetic Abrasive Finishing Process", *Al-Nahrain Journal for Engineering Sciences*, vol. 20, no. 4, pp. 838–845.
10. Uddin, M. S., Santos, V. and Marian, R. (2019), "Interplay of Process Variables in Magnetic Abrasive Finishing of AISI 1018 Steel Using SiC and Al₂O₃ Abrasives", *Journal of Manufacturing and Materials Processing*, vol. 3, no. 2, pp. 18. <https://doi.org/10.3390/jmmp3020029>
11. Teng, X., Zhang, G., Zhao, Yu., Cui, Yu., Li, L. and Jiang, L. (2019), "Study on magnetic abrasive finishing of AlSi10Mg alloy prepared by selective laser melting", *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 105, pp. 2513–2521. <https://doi.org/10.1007/s00170-019-04485-5>
12. Pavlyukova, N.L. (2010) "Using magnetic abrasive polishing while finishing non-ferrous alloys details", *Vestnik IGEU*, vol. 3, pp. 1–4.
13. Shaohui, Y. and Takeo, Sh. (2004), "Vertical vibration-assisted magnetic abrasive finishing and deburring for magnesium alloy", *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, vol. 44, pp. 1297–1303. <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2004.04.023>
14. Maiboroda, V.S., Belajev, O.O., Dzhulii, D.Yu. and Slobodianiuk, I.V. (2020), "AISI 1045 steel flat surfaces machining using the magneto-abrasive method", *Journal of Engineering Sciences*, vol. 7, no. 1, pp. A1–A7. doi: 10.21272/jes.2020.7(1).a1
15. Maiboroda, V.S., Dzhulii, D.Yu., Slobodianiuk, I.V. and Kotsun, Yu.V. (2018), "Influence of magneto-abrasive machining conditions on the roughness of flat surfaces", *Kompleksne zabezpechennja jakosti tekhnologichnykh procesiv ta system* [Complex quality assurance of technological processes and systems], Chernihiv, Ukraine, 10–12.05, pp. 139–141.
16. Tkachuk, I.V. and Maiboroda, V.S. (2014), "Geometric characteristics of magneto-abrasive powders", *Tool reliability and technological systems optimization*, vol. 34, pp. 49–55.
17. Maiboroda, V.S. (2001), *Fundamentals of creation and use of powder magneto-abrasive tool for finishing of shaped surfaces*, Dr.D., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute".
18. Ulyanenko, N.V. (2006), *Increase of efficiency hard-alloy cutting tackle by magneto-abrasive treatment application and wear-resistant coating*, Ph.D., National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute".
19. Olikier, B.E. (1990), *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoi obrabotki i iznosostoikikh pokrytii* [Powders for magneto-abrasive machining and wear resistant coatings], Metallurgy, Moscow.