

DOI: 10.53078/20778481_2022_4_5

УДК 621.923

М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко

ВЛИЯНИЕ МАГНИТНЫХ СВОЙСТВ ЭЛЕМЕНТОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ НА ЭФФЕКТИВНОСТЬ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТЕЙ

M. P. Kulgeyko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeyko

EFFECT OF MAGNETIC PROPERTIES OF TECHNOLOGICAL SYSTEM ELEMENTS ON THE EFFICIENCY OF MAGNETIC ABRASIVE MACHINING OF PLANES

Аннотация

Рассмотрены вопросы производительности магнитно-абразивной обработки плоскостей на установке с односторонним расположением магнитного индуктора. Установлена взаимосвязь удельного съема материала, факторов и параметров формирования абразивного порошкового инструмента в условиях применения элементов технологической системы – заготовок и приспособлений – с различными магнитными свойствами. Результаты исследований могут быть рекомендованы при разработке магнитных систем оборудования для обработки плоскостей инструментом, сформированным на периферии магнитного индуктора.

Ключевые слова:

магнитно-абразивная обработка, магнитная система, абразивный инструмент, параметры процесса, производительность.

Для цитирования:

Кульгейко, М. П. Влияние магнитных свойств элементов технологической системы на эффективность магнитно-абразивной обработки плоскостей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2022. – № 4 (77). – С. 5–13.

Abstract

The productivity of magnetic abrasive machining of planes on the installation with a unilateral location of a magnetic inductor was considered. The research established the interrelation of specific material removal, factors and parameters of abrasive powder tool formation in the conditions of using technological system elements – workpieces and fixtures – with different magnetic properties. The results of the research can be recommended for developing magnetic systems of equipment used for machining planes with a tool formed on the periphery of the magnetic inductor.

Keywords:

magnetic abrasive machining, magnetic system, abrasive tool, process parameters, productivity.

For citation:

Kulgeyko, M. P. Effect of magnetic properties of technological system elements on the efficiency of magnetic abrasive machining of planes / M. P. Kulgeyko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2022. – № 4 (77). – P. 5–13.

Введение

Обеспечение надежности и долговечности деталей машин является одной из важнейших проблем современного машиностроения. Ее решение в значительной степени лежит в области повышения функциональных свойств рабочих поверхностей деталей, о чем свидетельствуют эксплуатационный и технологический аспекты проблемы. С эксплуатационной точки зрения значимость обеспечения качества поверхности объясняется преобладающим фактором потери работоспособности деталей в результате износа и разрушения ее поверхностного слоя. Технологический аспект проблемы определяется в настоящее время целесообразностью и экономичностью повышения качества, надежности и долговечности изделий не за счет применения специальных дорогостоящих материалов, а путем создания более высоких характеристик тонкого поверхностного слоя. Таким образом, задача состоит в создании гетерогенного поверхностного материала, обладающего дифференцированными свойствами по отношению к объемно-прочностным свойствам детали [1].

Формирование физико-механических свойств поверхностного слоя деталей машин, оказывающих решающее влияние на эксплуатационные характеристики поверхности, в основном осуществляется на финишных операциях обработки деталей [2]. В результате поверхность, как особое состояние материала, образуется вследствие энергетического воздействия технологическими методами. С технологической точки зрения можно выделить четыре основных направления формирования поверхности [1]. Широкое распространение в области обеспечения заданных свойств поверхностного слоя находят комбинированные методы энергетического воздействия [3]. Определенное место в ряду таких технологий занимают магнитно-электрические методы,

в том числе отделочная магнитно-абразивная обработка (МАО) [4].

Постановка задачи

Магнитно-абразивная обработка реализует, согласно классификации [1], первое технологическое направление генерации поверхности, а именно образование поверхности путем удаления материала и формирования заданной микрогеометрии. Сущность МАО заключается в воздействии на обрабатываемую поверхность уплотненной в магнитном поле ферроабразивной порошковой массы, в результате которого при их относительном перемещении происходит процесс микрорезания тонких поверхностных слоев материала и сглаживание микронеровностей поверхности путем их пластического деформирования.

Метод отличается относительной простотой в осуществлении, экологической чистотой, обеспечивает высокое качество микрогеометрии поверхности, формирование остаточных сжимающих напряжений, повышение износостойкости, контактной прочности и сопротивлению коррозии [4, 5]. Метод МАО широко применяется при отделочно-зачистной обработке поверхностей различной геометрической формы: наружных и внутренних поверхностей вращения, плоскостей, фасонных поверхностей, стандартизованных специальных профилей и др. [4, 6].

Техническое обеспечение процесса МАО предполагает наличие оборудования, содержащего следующие основные системы: механическую, магнитную и электрическую. Поэтому практическая реализация технологии осуществляется как на специально разработанных станках, так и на установках на базе серийно выпускаемого промышленностью оборудования, в основном на металлорежущих станках. В этом случае станки с некоторой доработкой оснащаются в качестве инструмента маг-

нитным индуктором или подвергаются относительно небольшой модернизации, включающей в основном дооснащение магнитной системой.

В технологии обработки плоскостей применяются различные варианты технического обеспечения, т. е. имеется ряд специально спроектированных станков, а также используются установки на базе различного серийного оборудования. Возможность реализации процесса на существующих металлорежущих станках является одним из достоинств метода MAO.

Обработка плоскостей на серийно выпускаемом оборудовании осуществляется, как правило, по схемам с односторонним расположением индуктора [6]. На таких установках можно осуществлять обработку как поверхностей тонколистовых заготовок, так и плоскостей объемных деталей. Двухстороннее размещение разноименных полюсов индуктора относительно заготовки применяется при обработке листовых материалов и требует специального оборудования.

При одностороннем расположении магнитной системы относительно обрабатываемой детали применяются в основном индукторы двух типов – с торцовой или периферийной рабочей поверхностью. По второй схеме используется индуктор, состоящий из двух oppositно расположенных полюсных наконечников, между торцовыми поверхностями которых создается магнитное поле. Режущий инструмент формируется из ферромагнитного абразивного порошка на периферии индуктора в дугообразных магнитных потоках выпучивания. При обработке индуктор вращается вокруг оси, параллельной обрабатываемой поверхности, а ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и осуществляет абразивное воздействие на поверхность детали. Высокую эффективность обработки обеспечивает индуктор с полюсными наконечниками, образующими

наклонное межполюсное пространство [7, 8].

Магнитная система оборудования для MAO определяет параметры магнитного поля как одного из основных факторов процесса. Распределение магнитных потоков в рабочей зоне зависит от конструкции, размеров, конфигурации и магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе от магнитных характеристик обрабатываемых деталей и приспособлений для их установки.

Целью данной работы является исследование влияния магнитных свойств элементов технологической системы на производительность процесса обработки.

Методика исследования

Установка для магнитно-абразивной обработки плоскостей создана на базе горизонтально-фрезерного станка. Магнитная система установки (рис. 1) предполагает применение одностороннего магнитного индуктора 1. Замыкание магнитного потока, создаваемого двумя электромагнитными катушками 2, осуществляется через магнитопровод 3, включающий хобот 4 станка. При этом хобот и вал с индуктором изолированы от станины станка. Обрабатываемая деталь 5 устанавливается в приспособлении 6, также изолированном от стола станка. В результате образуется полнозамкнутая [9] через рабочий зазор индуктора магнитная система. Конструкция индуктора обеспечивает формирование кольцевого абразивного инструмента на периферии цилиндрической поверхности полюсов в области дугообразных магнитных потоков выпучивания. При вращении инструмента ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и производит абразивное воздействие на поверхность детали, осуществляя тем самым обработку поверхностного слоя путем съема обрабатываемого материала.

Особенностью применяемого индуктора является наклонное к оси вращения выполнение торцовых поверхностей полюсных наконечников. Сформированный в таком межполюсном пространстве инструмент обеспечивает увеличение ширины однопроходной обработки. Ширина же самого инструмента (абразивного кольца) регулируется за счет толщины диамагнитной прокладки, устанавливаемой в пространстве между

полюсными наконечниками. Его эффективная рабочая ширина определяется в том числе силовой характеристикой магнитного поля в рабочей зоне индуктора. Толщина абразивного слоя порошка также зависит от величины магнитного поля и распределения магнитных потоков. В зоне обработки она принимает размер рабочего зазора между периферией индуктора и обрабатываемой поверхностью.

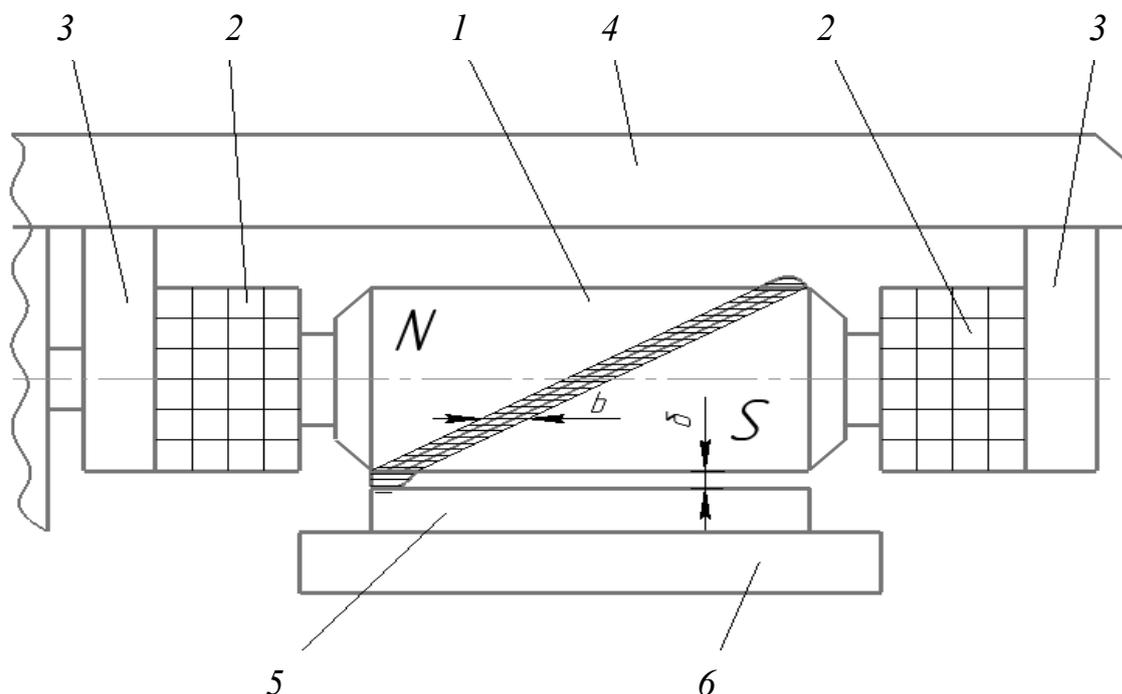


Рис. 1. Схема магнитной системы экспериментальной установки

Рассматриваемая схема МАО характеризуется кинематическим воздействием ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность [4]. Взаимодействие порошка с поверхностью изделия осуществляется как относительно продолжительное скольжение с переменным давлением, максимальная величина которого достигает в минимальном зазоре диаметральной плоскости индуктора перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Давление порошка на обрабатываемую поверхность

осуществляется за счет сил механического заклинивания и сил магнитного поля.

Важным параметром, определяющим силовую характеристику процесса и эффективность МАО, является магнитная индукция в рабочих зазорах (рабочей зоне). Общий магнитный поток, создаваемый электромагнитным индуктором (см. рис. 1), можно условно разделить на три составляющие: основной магнитный поток, пронизывающий межполюсное пространство практиче-

ски перпендикулярно торцовым поверхностям полюсов, т. е. замыкающийся по кратчайшему направлению или по пути наименьшего магнитного сопротивления; магнитный поток выпучивания, отображающийся дугообразными силовыми линиями на периферии индуктора между полюсными наконечниками и формирующий порошковый инструмент; потоки рассеивания внутри полюсных наконечников и в свободном пространстве вне сформированного инструмента. Учитывая, что формирование абразивного инструмента в данной конструкции индуктора осуществляется в потоках выпучивания, следовательно, необходимо обеспечить максимальные силовые характеристики магнитного поля в периферийной области рабочего зазора. Силы, действующие на ферромагнитный порошок, обусловлены магнитными и электрическими характеристиками магнитной среды, геометрическими и кинематическими параметрами процесса, коэффициентом заполнения зазора (рабочей зоны) порошком и другими факторами, и в конкретной точке рабочей области определяются величиной поля и его неравномерностью (градиентом магнитного поля) на границах участков с различной магнитной проницаемостью [9].

Экспериментальные исследования влияния факторов процесса на производительность МАО производились для материалов с различными магнитными свойствами при обработке с применением магнитных и немагнитных приспособлений. В качестве магнитного обрабатываемого материала использовалась сталь 45 и немагнитного – сталь X18H10T с одинаковой твердостью (НВ 200). Исходная шероховатость поверхности заготовок – Ra 1,0...1,2 мкм.

Магнитно-абразивную обработку образцов производили при следующих технологических и конструктивных параметрах процесса: межполюсное расстояние $a = 6$ мм; минимальный рабо-

чий зазор между заготовкой и периферией магнитного индуктора $\delta = 4$ мм; угол наклона торцовой поверхности полюсов $\alpha = 75^\circ$; магнитная индукция потока выпучивания в рабочем зазоре $B_e = 0,4$ Тл; зернистость порошка $\Delta = 315/200$ мкм.

Значения кинематических факторов принимались следующие: скорость подачи заготовки $S = 50$ мм/мин; скорость резания (скорость вращения индуктора) как переменный фактор принята на трех уровнях: V равна 1,5; 3,0 и 4,5 м/с.

Критерием производительности процесса принята производительность обработки Δq , мг/(см²·мин), выраженная удельным массовым (весовым) съемом материала.

Результаты исследования и их обсуждение

На рис. 2 представлены результаты предварительных исследований производительности МАО при использовании элементов технологической системы с различными магнитными свойствами, т. е. обработка деталей из различных материалов производилась при их установке в приспособления, выполненных из магнитных и немагнитных материалов. Результаты исследований свидетельствуют о более интенсивном съеме материала при закреплении заготовок на немагнитном приспособлении. Это отмечается как для магнитных, так и немагнитных обрабатываемых материалов. Значительное увеличение обрабатываемости стали X18H10T на немагнитном приспособлении объясняется не только магнитной характеристикой технологической системы, но также физико-механическими свойствами обрабатываемого материала.

Характер зависимости удельного съема материала от скорости вращения инструмента аналогичный как при магнитных, так и немагнитных материалах заготовок и приспособлений (рис. 3).

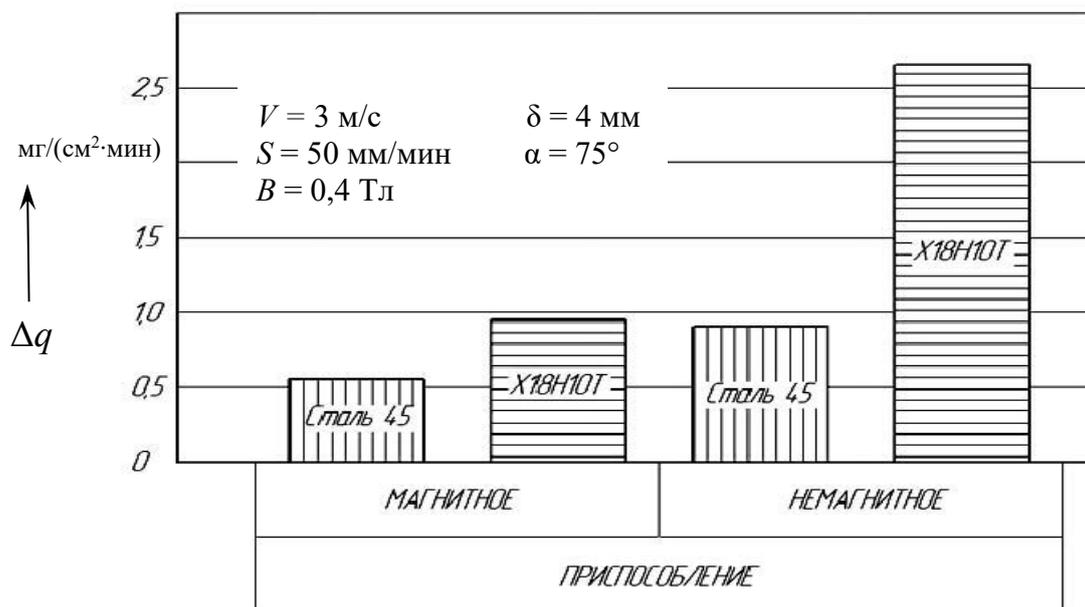


Рис. 2. Удельный съем металла в зависимости от магнитных свойств элементов технологической системы

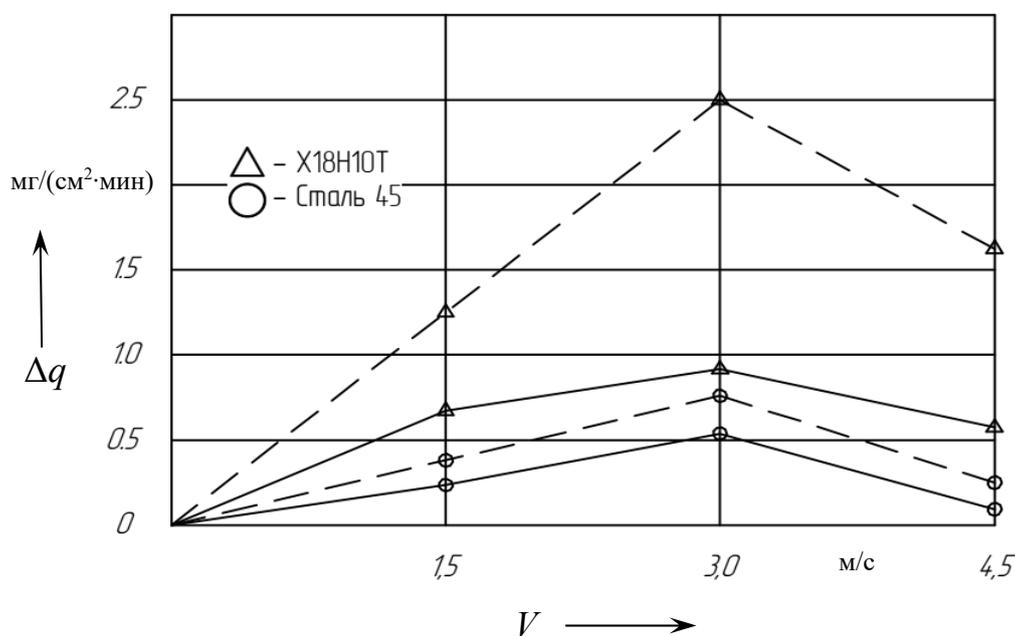


Рис. 3. Зависимость удельного съема материала от скорости вращения индуктора при различных магнитных свойствах заготовок и приспособлений: — — магнитное приспособление; - - - - немагнитное приспособление

Некоторое увеличение производительности при обработке заготовок из нержавеющей стали, закрепленных на немагнитном приспособлении, объясняется изменением условий формирования инструмента. Магнитный поток выпучивания, определяющий распределение ферроабразивного порошка в рабочей области инструмента, усиливается между полюсами индуктора за счет ослабления потоков рассеивания в пространстве вне индуктора, в том числе через немагнитные заготовку и приспособление. Вследствие этого несколько увеличивается жесткость абразивного слоя инструмента и его размеры. Известно [4–6], что жесткость инструмента и степень его силового воздействия на обрабатываемую поверхность в значительной мере определяют производительность обработки.

Нелинейный характер зависимо-

сти производительности от скорости вращения индуктора также во многом определяется условиями формирования порошкового инструмента (рис. 4). Так, представленные зависимости показывают, что при скорости до 1,5 м/с ширина абразивного слоя порошка практически не изменяется, т. к. выброс зерен порошка незначительный. При дальнейшем увеличении скорости в результате повышения интенсивности выброса порошка ширина инструмента уменьшается. Менее заметно это явление при использовании немагнитных приспособлений. Логично, что с увеличением скорости вращения инструмента увеличивается частота контактного взаимодействия отдельных зерен порошка с обрабатываемой поверхностью в единицу времени. И, как следствие, с увеличением V до 3,0 м/с удельный съем материала повышается (см. рис. 3).

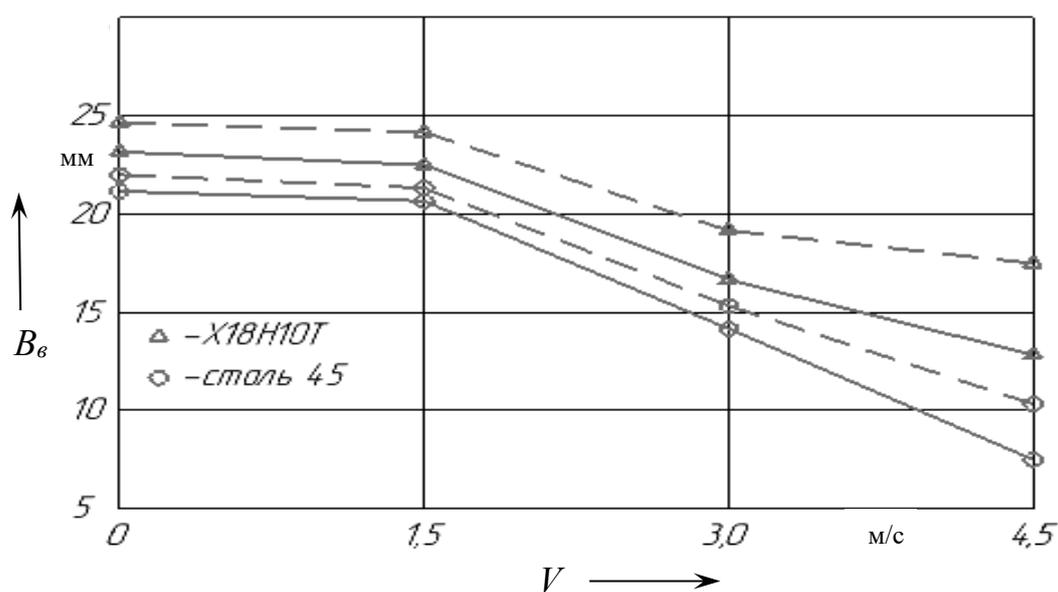


Рис. 4. Зависимость ширины абразивного слоя инструмента от скорости вращения индуктора: — магнитное приспособление; - - - немагнитное приспособление

Однако повышение скорости приводит к увеличению центробежных сил, отрывающих зерна порошка от общей массы порошкового инструмента. При этом существенно увеличивается веро-

ятность отрыва частиц порошка, расположенных дальше от торцов полюсов на периферии индуктора. С этой точки зрения в неблагоприятных условиях находятся частицы порошка по краям

ширины инструмента. В результате при достижении определенной скорости вращения (в исследуемых условиях свыше 1,5 м/с) наблюдается уменьшение ширины инструмента (см. рис. 4).

Таким образом, противоречивое действие двух факторов (увеличение скорости резания и уменьшение ширины инструмента) приводит к сложной зависимости съема материала от скорости вращения индуктора и при скорости от 3,0 до 4,5 м/с удельный съем материала уменьшается. Особенно значимо уменьшение Δq при обработке магнитных материалов, для которых наблюдается наибольший выброс порошка из рабочей зоны. То есть при V до 3,0 м/с преобладающее значение на производительность обработки имеет увеличение частоты контактного абразивного воздействия зерен порошка на обрабатываемую поверхность. При дальнейшем увеличении скорости вращения индуктора более значимо уменьшение ширины инструмента за счет выброса частиц порошка и, как следствие, наблюдается уменьшение удельного съема материала в единицу времени.

Дополнительные эксперименты позволили выявить влияние толщины заготовок из немагнитных материалов на производительность МАО. Установлено, что при их закреплении в магнитных или немагнитных приспособлениях при толщине деталей более 8 мм изменение величины съема материала практически не наблюдается.

Отсюда следует, что рассматриваемая технологическая система обеспечивает наибольшую производительность при обработке немагнитных заготовок, закрепляемых на немагнитном приспособлении, а при толщине немагнитных деталей более 8 мм, независимо от магнитных характеристик приспособления, достигается максимальный удельный съем материала. То есть в последнем случае магнитные свойства приспособлений не оказывают влияния на производительность про-

цесса обработки.

Как было отмечено выше, величина электромагнитных сил, действующих на частицы порошка, помещенные в электромагнитное поле, зависит, в том числе от плотности ферроабразивной порошковой массы. Характеристикой плотности порошкового инструмента принят коэффициент заполнения рабочей области (рабочего зазора). Давление частиц порошка за счет сил механического заклинивания зерен в узкой части рабочего зазора также в значительной степени определяется жесткостью инструмента, т. е. плотностью заполнения рабочего зазора. В связи с этим представляет интерес установление влияния плотности инструмента на производительность обработки.

Выполненные экспериментальные исследования позволили определить зависимость удельного съема материала от коэффициента заполнения рабочей зоны K_z ферроабразивным порошком. Установлено, что повышение K_z от 1,0 до 1,5...1,8 значительно влияет на съем материала, который повышается в 2–3 раза. Дальнейшее увеличение объема (порции подаваемого в рабочую зону) порошка практически не оказывает заметного влияния на производительность процесса, т. к. излишняя масса порошка выбрасывается центробежными силами из области формирования инструмента. В результате параметры инструмента достигают предельного значения, оптимального для данных условий обработки.

Заключение

Выполненные экспериментальные исследования позволили установить влияние магнитных свойств элементов технологической системы – обрабатываемых заготовок и установочных приспособлений – на производительность процесса обработки. Изменение интенсивности удельного съема материала связано с факторами и параметрами

формирования ферроабразивного порошкового инструмента, что в значительной степени определяется магнитной системой оборудования для MAO. При практической реализации технологии магнитно-абразивной обработки

следует учитывать соотношение магнитных свойств элементов технологической системы, в том числе обрабатываемого материала, и их влияние на процесс формирования порошкового инструмента.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Кульгейко, М. П.** Роль инверсионности способов магнитно-электрической обработки при создании технологических комплексов генерации поверхностей / М. П. Кульгейко, Г. В. Петришин, Н. М. Симанович // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.
2. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика и М. Л. Хейфеца. – Минск: Беларус. навука, 2017. – 376 с.
3. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца и С. А. Клименко. – Минск: Беларус. навука, 2013. – 463 с.
4. **Хомич, Н. С.** Магнитно-абразивная обработка изделий: монография / Н. С. Хомич. – Минск: БНТУ, 2006. – 218 с.
5. Обработка заготовок деталей машин / А. В. Миранович [и др.]; под ред. Ж. А. Мрочека. – Минск: Вышэйшая школа, 2014. – 171 с.
6. **Барон, Ю. М.** Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Ленинград: Машиностроение, 1986. – 176 с.
7. **Кульгейко, М. П.** Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестн. БрГТУ. Сер. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.
8. **Кульгейко, М. П.** Исследование работоспособности инструмента для магнитно-абразивной обработки плоскостей на базе обобщенной модели магнитного индуктора / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестн. Белорус.-Рос. ун-та. – 2020. – № 3 (68). – С. 56–64.
9. **Сакулевич, Ф. Ю.** Основы магнитно-абразивной обработки / Ф. Ю. Сакулевич. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.

Статья сдана в редакцию 4 ноября 2022 года

Михаил Петрович Кульгейко, канд. техн. наук, доц., Белорусский государственный университет транспорта. Тел.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Александр Парфенович Лепший, канд. техн. наук, доц., Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-029-137-11-16. E-mail: Lepshy@gstu.by.

Галина Степановна Кульгейко, ст. преподаватель, Гомельский государственный технический университет им. П. О. Сухого. Тел.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.

Mikhail Petrovich Kulgeyko, PhD (Engineering), Associate Prof., Belarusian State University of Transport. Tel.: 8-029-141-35-64. E-mail: kulgeyko82@rambler.ru.

Alexander Parfenovich Lepshiy, PhD (Engineering), Associate Prof., P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-029-137-11-16. E-mail: Lepshy@gstu.by.

Galina Stepanovna Kulgeyko, senior lecturer, P. O. Sukhoi State Technical University of Gomel. Tel.: 8-044-791-38-69. E-mail: kulgeyko@gstu.by.