

DOI: 10.24412/2077-8481-2026-3-31-41

УДК 621.923

М. П. КУЛЬГЕЙКО¹, канд. техн. наук, доц.

А. П. ЛЕПШИЙ², канд. техн. наук, доц.

Г. С. КУЛЬГЕЙКО²

¹Белорусский государственный университет транспорта (Гомель, Беларусь)

²Гомельский государственный технический университет имени П. О. Сухого (Гомель, Беларусь)

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА СЪЕМА МАТЕРИАЛА ПРИ РЕАЛИЗАЦИИ КИНЕМАТИЧЕСКОГО ПРОЦЕССА МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКИ ПЛОСКОСТЕЙ

Аннотация

Выполнен анализ механизма контактного взаимодействия абразивного порошкового инструмента с обрабатываемой поверхностью в условиях кинематического процесса магнитно-абразивной обработки. Представлены результаты экспериментальных исследований интенсивности и равномерности съема материала при обработке плоскостей инструментом, сформированным на базе магнитного индуктора с наклонным расположением торцовых поверхностей полюсных наконечников. Установлено влияние скорости главного движения, длительности абразивного воздействия и угла наклона полюсов на эффективность процесса обработки.

Ключевые слова:

магнитно-абразивная обработка, магнитный индуктор, микрорезание, интенсивность процесса, равномерность обработки.

Для цитирования:

Кульгейко, М. П. Исследование механизма съема материала при реализации кинематического процесса магнитно-абразивной обработки плоскостей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2026. – № 3 (92). – С. 31–41.

Введение

В решении задач, стоящих перед машиностроением, большое значение отводится проблеме обеспечения надежности и долговечности деталей машин. 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 выхода из строя деталей в результате износа и разрушения ее поверхностного слоя. Технологический аспект проблемы определяется в настоящее время не только применением специальных дорогостоящих материалов, но также созданием поверхностного

слоя материала, обладающего дифференцированными свойствами по отношению к объёмно-прочностным свойствам детали [1].

Формирование физико-механических и электрохимических свойств поверхностного слоя деталей машин, оказывающих решающее влияние на функциональные свойства и 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. Широкое распространение в области обеспечения сложного комплекса функциональных свойств поверхностного слоя находят комбинированные методы энергетического воздействия [3]. В ряду отделочно-

упрочняющих технологий, основанных на применении энергии электрических и магнитных полей, образующих совокупность магнитоэлектрических способов обработки [4–8], определенное место занимает технология магнитно-абразивной обработки (МАО). Несмотря на многочисленные исследования, в том числе защиты кандидатских и докторских диссертационных работ, которые продолжаются в течение многих десятилетий, интерес к изучению технологии МАО сохраняется и в настоящее время [9].

Сущность МАО заключается в том, что порошковая ферромагнитная абразивная масса под действием магнитного поля уплотняется и прижимается к обрабатываемой детали, и при их относительном перемещении осуществляет абразивное воздействие на ее поверхность, в результате которого происходит процесс микрорезания со снятием тончайших слоев металла и его окислов, а также сглаживание микронеровностей поверхностного слоя путем их пластического деформирования. Диспергирование и пластическое деформирование поверхностного слоя при МАО усиливается химическими и адсорбционными процессами, происходящими на поверхности детали в присутствии химических и поверхностно-активных веществ (ПАВ) – компонентов СОЖ. Процесс микрорезания сопровождается разрушением и удалением непрерывно образующихся на поверхности химических пленок, в основном оксидных [4, 8]. Таким образом, в основе процесса формирования поверхностного слоя при магнитно-абразивной обработке лежит механический и (или) механохимический механизм съема металла и его оксидов [1, 3, 5, 8]. Метод МАО широко применяется для отделочно-зачистной обработки поверхностей различной геометрической формы: наружных и внутренних поверхностей вращения, плоскостей, фасонных поверхностей, стандартизованных и специальных профилей и т. п. [4, 8].

Постановка задачи

Технология магнитно-абразивной обработки плоскостей предполагает применение в основном одной из двух принципиальных схем реализации процесса: обработка ферроабразивным порошком, сформированным магнитным полем в инструмент на торцовой поверхности или периферии магнитного (электромагнитного) индуктора. Реализация процесса МАО по второй схеме осуществляется с применением индуктора, состоящего из двух оппозитно расположенных полюсных наконечников, между которыми создается магнитное поле. Режущий инструмент формируется из ферроабразивного порошка на периферии индуктора в дугообразных магнитных потоках выпучивания. При обработке индуктор вращается вокруг оси, параллельной обрабатываемой поверхности, а рабочая зона охватывает близлежащую к образующей цилиндра область между индуктором и поверхностью детали. При вращении инструмента ферроабразивный порошок перемещается в сужающийся рабочий зазор и производит абразивное воздействие на поверхность детали.

Обработка плоских поверхностей на серийно выпускаемом оборудовании осуществляется, как правило, при одностороннем расположении индуктора [4]. На таких установках можно производить обработку как поверхностей тонких листовых заготовок, так и плоскостей объемных деталей. Высокую эффективность и производительность обеспечивает индуктор с полюсными наконечниками, образующими наклонное межполюсное пространство [10, 11].

Представленный на рис. 1 магнитный индуктор состоит из двух полюсных наконечников 1 и 2, разделенных диамагнитной прокладкой 3. Конструкция индуктора обеспечивает формирование кольцевого абразивного инструмента на периферии цилиндрической поверхности полюсов в области дугообразных

магнитных потоков выпучивания [10]. Его особенностью является наклонное выполнение торцовых поверхностей полюсов под углом α к оси вращения.

Соответственно, при создании магнитного поля между полюсами индуктора диаметром $D_{инд}$ формируется наклонный абразивный инструмент диаметром D_u .

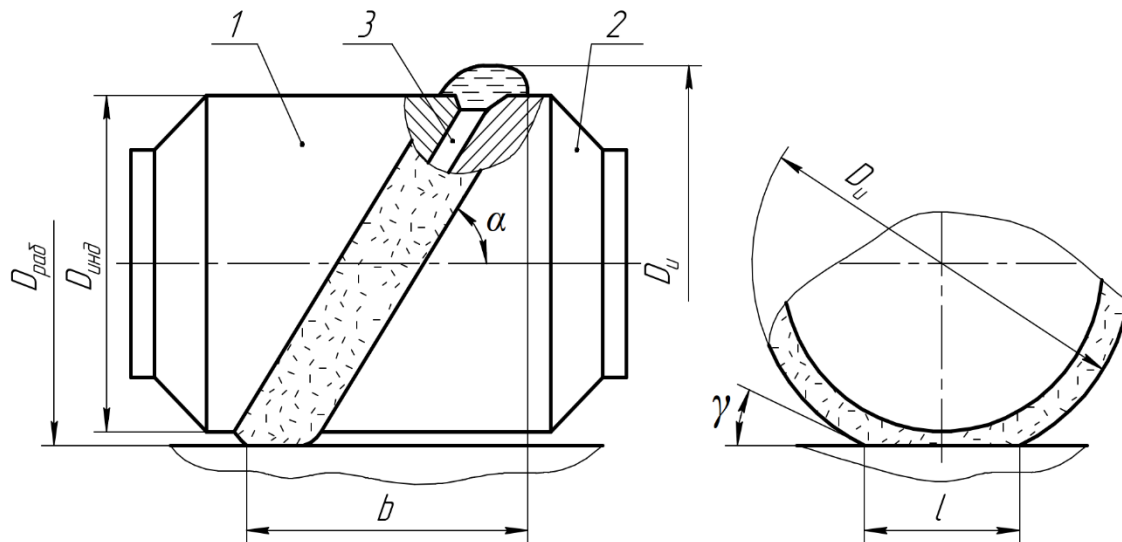


Рис. 1. Схема контактного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью

При введении инструмента в контакт с обрабатываемой поверхностью и задании инструменту и детали соответствующих движений резания обеспечивается ширина b односторонней обработки абразивным порошковым инструментом с рабочим размером (диаметром) $D_{раб}$ (см. рис. 1). Ширина же самого инструмента (абразивного кольца) регулируется за счет толщины диамагнитной прокладки, устанавливаемой в пространство 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. От сближения индуктора и детали зависит величина минимального рабо-

чего зазора, а при определенном диаметре D_u – длина l контактного взаимодействия абразивного кольца и обрабатываемой поверхности. Следовательно, охватываемая площадь обрабатываемой поверхности зависит от величины угла α наклона торцовых поверхностей полюсов и диаметра D_u абразивного инструмента.

Цель работы – экспериментальное определение интенсивности и равномерности съема материала в области кинематического контактного взаимодействия абразивного инструмента с обрабатываемой поверхностью.

Методика исследований

Экспериментальные исследования, уточняющие и подтверждающие логические выводы теоретических обоснований (рассуждений, соображений), проводились на опытно-экспериментальной установке на базе горизонтально-фре-

зерного станка. Для получения отчетливых информационных следов обработки (лунок) в качестве образцов приняты пластины из сравнительно мягкого материала – латуни Л62 – с максимальными макроотклонениями не более 10...15 мкм.

Обработка образцов выполнялась с изменением скорости главного движения ($V_G = 1,5; 3,0; 4,5$ м/с), времени обработки ($\tau_{1,2,3} = 5; 10; 15$ мин) и угла наклона полюсов ($\alpha = 75^\circ; 45^\circ$) при отсутствии движения подачи ($V_S = 0$). Профиль сечения (глубина и рельеф) лунки определялся методом профилометрии. Для получения профилограмм в плоскости сечения поверхности перпендикулярно к ней использовалась индикаторная головка с ценой деления 1 мкм. Анализ следов обработки позволяет судить об интенсивности съема материала по длине и равномерности по ширине зоны контакта абразивного порошкового инструмента с обрабатываемой поверхностью в зависимости от технологических параметров процесса.

Результаты исследований и их обсуждение

Исследование возможных механизмов взаимодействия системы «ферро-абразивный порошок – поверхность детали» позволяет выявить общие черты, характерные для отдельных видов воздействия порошка на обрабатываемую поверхность, и на их основе дифференцировать виды резания, реализуемые при МАО. Тожественность явлений, происходящих при МАО и изнашивании абразивом, позволяет в соответствии с основными видами абразивного изнашивания, по аналогии с классификацией видов трения, предложенной Г. Фляйшером [12], выделить три основных вида воздействия резания при МАО: динамическое, кинематическое и квазистатическое [13].

Анализ процессов магнитно-абразивной обработки и абразивного изна-

шивания в условиях эксплуатации и при лабораторных испытаниях [14–16] свидетельствует о значительном подобии их физической сущности. В основу такого подхода для последующего исследования положены предпосылки, вытекающие из сопоставления данных процессов [13]. В [17] отмечается аналогия факторов процессов и физических явлений абразивной доводки и абразивного изнашивания поверхностей деталей машин в процессе эксплуатации, что вполне применимо также к другим процессам отделочной абразивной обработки. Следовательно, и в отношении магнитно-абразивной обработки правомерно заключение, что физико-механической основой процесса МАО является абразивное разрушение твердых тел, а процесс абразивного изнашивания – техническая основа процесса магнитно-абразивной обработки.

Как при МАО, так и при абразивном изнашивании механическое воздействие частиц порошка на поверхность детали сопровождается механическим, химическим, физическим или тепловым разрушением материала поверхностного слоя. В реальных условиях перечисленные процессы могут протекать одновременно, смешиваясь в различных сочетаниях, определяющих долю их участия в суммарном разрушении материала. Однако, несмотря на большое число факторов, оказывающих влияние на интенсивность разрушения и удаления материала, общим для обоих процессов является механический характер удаления поверхностного слоя.

При магнитно-абразивной обработке контактное воздействие абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность сопровождается одновременной реализацией в основном двух механизмов разрушения поверхности. Первый – микрорезание – наблюдается при однократном воздействии с образованием стружки перед режущей гранью частицы порошка. На поверхности возникают канавки, ориенти-

рованные вдоль вектора скорости главного движения. При возникновении микротрещин по краю и на дне канавки при последующих проходах абразивных частиц происходит скалывание материала по краям канавок.

Реализация второго механизма осуществляется при многократном воздействии абразивных частиц порошка на один и тот же участок поверхности детали. Такие условия контактного взаимодействия имеют место в проводимых экспериментальных исследованиях. В результате многократного деформирования материала, приводящего к его малоцикловой усталости, образуются отделяемые частицы поверхностного слоя. Поэтому в данных исследованиях процесс разрушения и удаления (съем материала) сопровождается отделением стружки (микрорезанием), выкалыванием и отрыванием частиц материала, упругим и пластическим деформированием, усталостным разрушением микроразрывов поверхностного слоя и упрочнением обрабатываемой поверхности в результате пластической деформации. Таким образом, процесс механического разрушения при МАО, как и при изнашивании, содержит элементы резания (диспергирования) и элементы упруго-пластических деформаций отделяемого слоя (микростружка) и материала детали (обрабатываемая поверхность).

Реализуемая представленным индуктором (см. рис. 1) схема обработки характеризуется кинематическим воздействием ферроабразивного порошка на обрабатываемую поверхность [13]. Взаимодействие порошка с поверхностью изделия осуществляется как относительно продолжительное скольжение с переменным давлением, максимальная величина которого достигается в минимальном зазоре диаметральной плоскости индуктора, перпендикулярно обрабатываемой поверхности. Давление порошка на обрабатываемую поверхность осуществляется за счет сил механического заклинивания и сил магнит-

ного поля.

В условиях кинематического процесса МАО (как и при изнашивании абразивом) существенной частью механического процесса, определяющего съем материала, является микрорезание, т. е. отделение от материала микроскопической стружки в результате царапающего действия абразивной частицы. Критерием разделения процессов разрушения является соотношение между углом атаки γ и коэффициентом трения f абразивного зерна по обрабатываемой поверхности. Это соотношение является одним из граничных условий перехода от микрорезания к многоцикловым процессам разрушения [14].

Кинематическое взаимодействие ферропорошка с поверхностью изделия удовлетворяет условию ($\text{ctg } \gamma > f$) перехода от многоцикловых процессов разрушения к микрорезанию: $[\text{ctg } \gamma]_{\min} = 2,1 \dots 2,5 \gg f$, где γ – угол атаки, $\text{ctg } \gamma = V^r/V^n$, коэффициент трения порошка по металлу, равный $0,2 \dots 0,32$ [8]. Таким образом, для реализации процесса характерна значимость фрикционной составляющей разрушения поверхности, обусловленной скольжением частиц абразива, и незначительная роль ударной составляющей.

Наиболее значимое влияние на процесс резания и его интенсивность оказывают энергетические факторы (скорость V_T и масса частиц), а также угол атаки α . Как и при абразивном изнашивании, механизм микрорезания становится ведущим при уменьшении угла атаки от 30° до 0° . При малых углах атаки наблюдается удар со скольжением, на поверхности обработки образуются углубления, вытянутые в направлении вращения инструмента. При этом растет длина канавки, а глубина уменьшается с уменьшением угла атаки γ (см. рис. 1). Интенсивность съема материала при заданных свойствах материала и частиц порошка зависит в основном от кинематической энергии частиц и угла атаки.

На рис. 2 представлены профи-

лограммы лунок магнитно-абразивной обработки поверхности в плоскости сечения, перпендикулярной к ней вдоль вектора главного движения, в зависимости от скорости резания и времени

обработки. Показано изменение их конфигурации на длине контакта l инструмента с обрабатываемой поверхностью в условиях реализации процесса при отсутствии движения подачи.

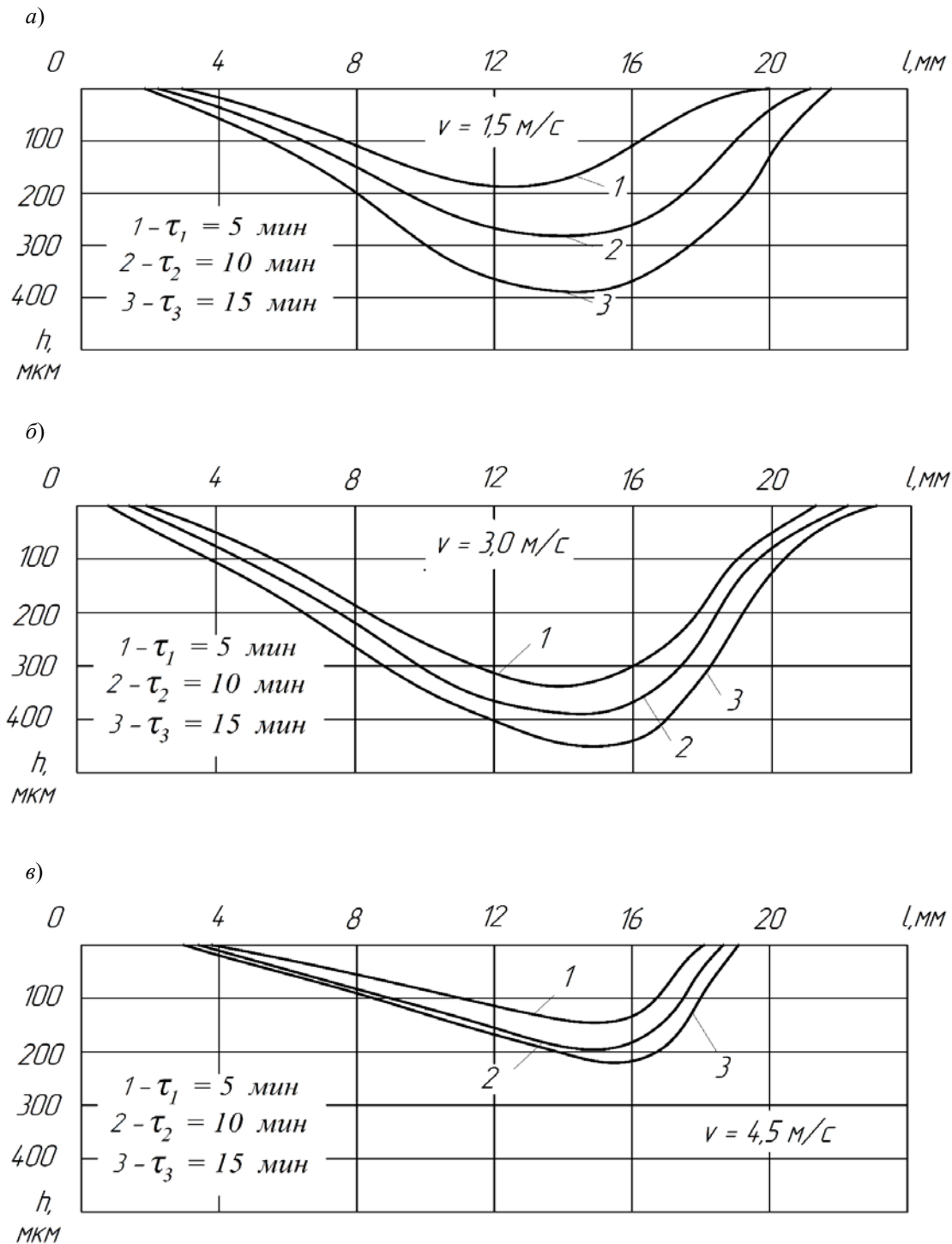


Рис. 2. Профилограммы лунок магнитно-абразивной обработки в плоскости главного движения

Прежде всего, следует обратить внимание на расположение лунок (их глубины) относительно середины длины l контактного взаимодействия, т. е. в диаметральной плоскости инструмента. Только при минимальной скорости резания ($V_T = 1,5$ м/с) и времени обработки ($\tau_1 = 5$ мин) лунки имеют симметричное расположение (см. рис. 2, а). В других условиях реализации эксперимента лунки имеют асимметричную форму относительно середины длины контакта (см. рис. 2, б, в).

В начале контактного воздействия в зоне врезания инструмента лунки имеют пологое постепенное углубление, вытянутое в направлении главного движения. Смещение лунки относительно диаметральной плоскости индуктора происходит в направлении вращения абразивного инструмента. Затем наблюдается крутой подъем кривой съема материала и плавный выход из зоны резания.

С увеличением нагрузки на абразивные частицы (давления в зоне контакта) при перемещении их в сужающийся рабочий зазор глубина внедрения в материал детали возрастает, и более глубокий слой поверхности подвергается деформированию и разрушению. В диаметральной плоскости симметрии в области минимального рабочего зазора в зоне заклинивания порошка действуют максимальные силы резания, и, соответственно, реализуется максимальное врезание зерен в обрабатываемый материал. В ходе дальнейшего силового воздействия зерен порошка на обрабатываемую поверхность происходит повышение интенсивности съема материала со смещением максимума в направлении главного движения.

С увеличением времени обработки по мере удаления припуска увеличивается рабочий зазор δ и происходит смещение области максимального давления порошка и соответствующее смещение наибольшей глубины лунки. Здесь следует отметить, что если

непрерывно (постоянно) добавлять дозу порошка в межполюсное пространство формирования инструмента, то расположение лунки характеризуется большей симметричностью относительно середины рабочей длины контакта.

В течение первых минут обработки отмечается интенсивный съем материала поверхности, а затем процесс заметно затухает. Эластичный абразивный инструмент самопроизвольно нивелируется относительно полученной лунки, а зерна порошка огибают ее форму, копируя профиль канавки. В целом затухание процесса с увеличением длительности τ обработки объясняется несколькими причинами [4], которые имеют место в условиях проводимых исследований: снижение режущей способности порции порошка из-за наполнения абразивного инструмента стружкой обрабатываемого материала; уменьшение подвижности зерен порошка и способности инструмента самозатачиваться из-за насыщения вязкими компонентами СОЖ; уменьшение количества порошка из-за постепенного выбрасывания; уменьшение сил резания из-за измельчения зерен порошка; уменьшение толщины абразивного кольцевого инструмента и увеличение рабочего зазора; образование структурно-приспосабливающегося к условиям взаимодействия с порошковой массой и оказывающего повышенное сопротивление разрушению поверхностного слоя, что особенно характерно для цветных металлов и сплавов; влияние других факторов и явлений процесса.

С увеличением скорости резания до 3 м/с возрастает съем материала по глубине лунки, а также в области врезания и выхода инструмента из контакта с обрабатываемой поверхностью. Особенно значительное увеличение наблюдается в течение первых 5 мин работы. При дальнейшей работе инструмента (до 10...15 мин) интенсивность съема замедляется.

Увеличение скорости главного движения до 4,5 м/с сопровождается

заметным снижением производительности. Происходит это вследствие выбрасывания порошка за счет увеличения центробежных сил и, как следствие, уменьшения толщины абразивного слоя и силы давления порошка в области заклинивания при перемещении его в сужающийся рабочий зазор.

Известно [4, 8], что на интенсивность съема материала при МАО влияют многие факторы: геометрические, кинематические, силовые, химические и др., а также их изменение в процессе обработки. В результате при изучении влияния на съем материала даже только скорости главного движения получаем достаточно сложную зависимость. Тем более, что кроме самой скорости на интенсивность процесса оказывает влияние температура в зоне обработки [4], которая изменяется со скоростью резания, особенно при длительном контактном воздействии на один и тот же участок обрабатываемой поверхности. Также и при изнашивании интенсивность износа представляет сложную зависимость от скорости скольжения [15]. Скорость определяет интенсивность механического контакта с обрабатываемой поверхностью и определяет температуру на контакте, а значит, влияет на образование окисных пленок и изменение физико-механических свойств материала. При этом изменяется также продолжительность контакта отдельной абразивной частицы порошка с обрабатываемой поверхностью. А с увеличением скорости главного движения растет число взаимодействий в единицу времени каждого элементарного участка поверхности с абразивным инструментом и, кроме того, увеличение скорости может влиять на физико-химические процессы в контактной зоне. По данным исследований [4], до определенного времени увеличение скорости приводит к увеличению начальной производительности процесса, но сопровождается более быстрым затуханием процесса.

Экстремальный характер зависимости съема материала от скорости резания (см. рис. 2) согласуется с результатами других процессов взаимодействия абразивного порошка с поверхностью материала. Так, например, зависимость производительности от скорости резания при обработке сварочной проволоки на станках для МАО моделей 922 и 8.013 также имеет выраженный максимум [8, 13]. Аналогичная зависимость интенсивности удаления материала от скорости относительного движения абразивных частиц отмечается, в частности, при турбо- и струйно-абразивной обработке, при ударно-абразивном изнашивании и других подобных процессах.

На рис. 3 представлена профилограмма поверхности лунки на ширине контакта b в диаметральной плоскости инструмента. Профиль сечения углубления показан для времени обработки $t_3 = 15$ мин при различной скорости вращения индуктора. Симметричное расположение профилограммы закономерно отражает идентичные условия процесса резания относительно середины инструмента. Вдоль границ контактной области инструмента с обрабатываемой поверхностью наблюдается минимальный съем материала образцов (детали). Следовательно, при односторонней обработке гарантированный съем материала обеспечивается на ширине, меньшей на 5...6 мм по сравнению с шириной абразивного инструмента.

В центральной области углубления отмечается заметное возвышение, характеризующее неравномерность съема материала по ширине обработки. Соответственно, при реализации технологии магнитно-абразивной обработки плоскостей это обуславливает возникновение погрешности в виде отклонения от плоскостности. Величина отклонения на рассматриваемом участке поверхности определяется как разность между максимальной и минимальной глубиной

профиля: $\Delta h = h_{\max} - h_{\min}$ (см. рис. 3). С увеличением скорости разность Δh уменьшается, т. е. равномерность обработки увеличивается. Таким образом,

максимальная плоскостность поверхности ($\Delta h = \min$) обеспечивается в условиях проводимых исследований при минимальном съеме материала, когда скорость резания $V_T = 4,5$ м/с.

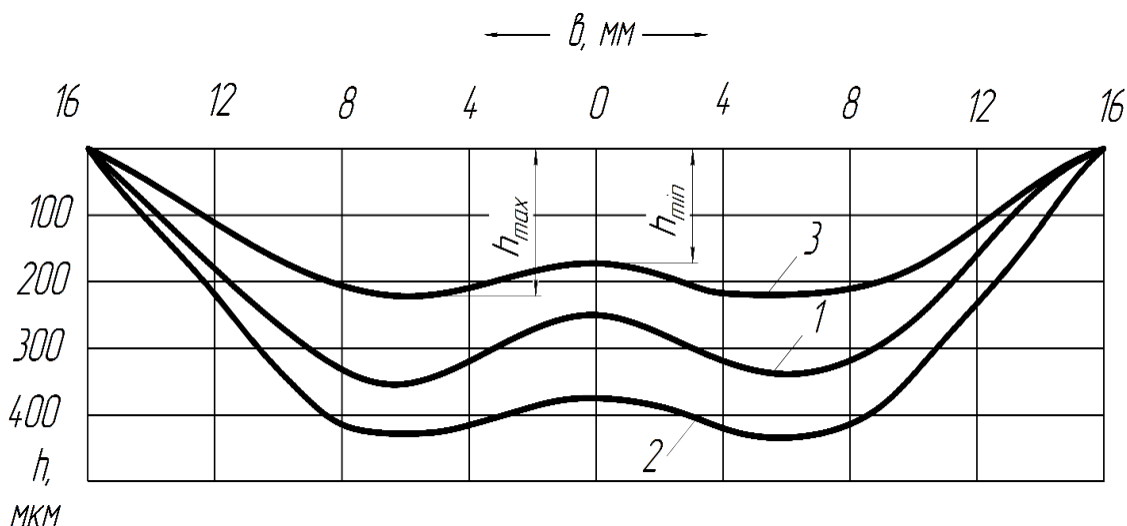


Рис. 3. Профилограмма поверхности лунок в диаметральной плоскости инструмента

Для характеристики равномерности съема материала целесообразно ввести коэффициент глубины, характеризующий соотношение между минимальной и максимальной глубиной профиля обработанной поверхности: $K_h = h_{\min}/h_{\max}$. В соответствии с такой характеристикой для индукторов с различным наклоном полюсных наконечников установлено следующее. При одном и том же диаметре $D_{\text{инд}}$ индуктор с углом $\alpha = 45^\circ$ очевидно обеспечивает большую ширину обработки b , однако при этом снижается удельный съем материала с единицы поверхности. В результате при меньшей производительности процесса достигается большая равномерность съема материала. При увеличении скорости от 1,5 до 4,5 м/с коэффициент K_h изменяется незначительно, в пределах от 0,92 до 0,98, т. е. в основном выдерживается постоянство съема материала, а следовательно, плоскостность обработки поверхности.

Индуктор с $\alpha = 75^\circ$ при том же

диаметре $D_{\text{инд}}$ обеспечивает меньшую ширину однократной обработки, но большую интенсивность съема материала. Однако при этом снижается равномерность съема материала по ширине прохода, а следовательно, плоскостность обработанной поверхности. Коэффициент глубины для данного индуктора с увеличением скорости главного движения повышается от 0,72 до 0,90, т. е. с увеличением скорости повышается равномерность обработки, но, как было отмечено выше, снижается производительность процесса.

Характер изменения профиля лунки по ширине однократной обработки индуктором с изменением угла наклона полюсных наконечников при различной скорости резания объясняется изменением жесткости и толщины абразивного слоя инструмента. Обусловлено это изменением магнитного потока выпучивания, что определяется прежде всего конструктивными параметрами индуктора [10].

Заключение

1. С позиции аналогии магнитно-абразивной обработки и абразивного изнашивания рассмотрен механизм съема материала при реализации кинематического процесса контактного взаимодействия абразивного порошкового инструмента с обрабатываемой поверхностью. Контактное воздействие абразивного инструмента на обрабатываемую поверхность сопровождается одновременной реализацией в основном двух механизмов разрушения поверхности: первый – микрорезание – при однократном воздействии с образованием стружки; второй – при многократном воздействии с малоцикловым отделением частиц поверхностного слоя.

2. Выполненные экспериментальные исследования позволили определить влияние скорости главного движения и длительности контактного воздействия на интенсивность и равномерность обработки. Показано, что в условиях реализации процесса при максимальном съеме материала (оптимальная скорость, увеличенная длительность) снижается плоскостность обработанной поверхности.

3. Установлено влияние наклона полюсных наконечников на равномерность съема материала. Отмечено, что при меньшем угле наклона, наряду с увеличением ширины однократной обработки, снижается интенсивность удельного съема материала, но повышается его равномерность и стабильность.

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 // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 4 (69). – С. 21–30.
2. Финишная обработка поверхностей при производстве деталей / С. А. Клименко [и др.]; под общ. ред. С. А. Чижика, М. Л. Хейфеца. – Мн. : Бел. наука, 2017. – 376 с.
3. Обработка и упрочнение поверхностей при изготовлении и восстановлении деталей / В. И. Бородавко [и др.]; под общ. ред. М. Л. Хейфеца, С. А. Клименко. – Мн. : Бел. наука, 2013. – 463 с.
4. Барон, Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
5. Алмазно-абразивная обработка и упрочнение изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Мн. : Наука и техника, 1988. – 270 с.
6. Кожуро, Л. М. Обработка деталей машин в магнитном поле / Л. М. Кожуро, Б. П. Чемисов. – Мн. : Наука і тэхніка, 1995. – 232 с.
7. Технологические основы обработки изделий в магнитном поле / П. И. Ящерицын [и др.]. – Мн. : ФТИ НАНБ, 1997. – 415 с.
8. Хомич, Н. С. Магнитно-абразивная обработка изделий : монография / Н. С. Хомич. – Мн. : БНТУ, 2006. – 218 с.
9. Иконников, А. М. Теоретические основы обеспечения качества и повышения производительности магнитно-абразивной обработки сложнопрофильных поверхностей : дис. ... д-ра техн. наук : 05.02.07 / Иконников А. М. – Барнаул, 2022. – 281 л.
10. Кульгейко, М. П. Анализ обобщенной модели индуктора для магнитно-абразивной обработки плоских поверхностей / М. П. Кульгейко, А. П. Лепший, Г. С. Кульгейко // Вестник Брестского государственного технического университета. Машиностроение. – 2019. – № 4 (117). – С. 100–103.
11. 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 // Вестник Белорусско-Российского университета. – 2020. – № 3 (68). – С. 56–64.
12. Fleischer G. Terminologie für Reibungs- und verschleis-vorgänge. Abschnitt A. – 1.1 im RSV-Katalog.
13. Кульгейко, М. П. Разработка процессов и оборудования для магнитно-абразивной обработки проволоки : дис. ... канд. техн. наук : 05.03.01 ; 05.02.08 / Кульгейко М. П. – Мн., 1989. – 217 л.
14. Тененбаум, М. М. Соппротивление абразивному изнашиванию / М. М. Тененбаум. – М. : Машиностроение, 1976. – 271 с.

15. Крагельский, И. В. Трение и износ / И. В. Крагельский. – М. : Машиностроение, 1968. – 480 с.
16. Хрущев, М. М. Абразивное изнашивание / М. М. Хрущев, М. А. Бабичев. – М. : Наука, 1970. – 252 с.
17. Доводка прецизионных деталей машин / П. Н. Орлов [и др.] ; под ред. Г. М. Ипполитова. – М. : Машиностроение, 1978. – 256 с.

Статья сдана в редакцию 29 апреля 2026 г.

Контакты:

kulgeyko82@rambler.ru (Кульгейко Михаил Петрович);

Lepshy@gstu.by (Лепший Александр Парфенович);

kulgeyko@gstu.by (Кульгейко Галина Степановна).

M. P. KULGEYKO, A. P. LEPSHIY, G. S. KULGEYKO

STUDY OF MATERIAL REMOVAL MECHANISM IN THE KINEMATIC PROCESS OF MAGNETIC-ABRASIVE MACHINING OF FLAT SURFACES

Abstract

The analysis of the mechanism of contact interaction between an abrasive powder tool and the treated surface under the kinematic conditions of magnetic-abrasive machining has been performed. The paper presents the results of experimental studies of the intensity and uniformity of material removal during the machining of flat surfaces with a tool formed on the basis of a magnetic inductor with an inclined arrangement of the end surfaces of the pole tips. The influence of primary motion speed, the duration of the abrasive action and the pole inclination angle on the efficiency of the machining process, has been established.

Keywords:

magnetic-abrasive machining, magnetic inductor, micro-cutting, process intensity, uniformity of machining.

For citation:

Kulgeyko, M. P. Study of material removal mechanism in the kinematic process of magnetic-abrasive machining of flat surfaces / M. P. Kulgeyko, A. P. Lepshiy, G. S. Kulgeyko // Belarusian-Russian University Bulletin. – 2026. – № 3 (92). – P. 31–41.