

ВОЗМУЩЕНИЯ В МАГНИТНО-АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ

Майборода В. С., Ткачук И. В.

Исследованы особенности образования и переформирования уплотненной зоны переддвигающейся деталью в кольцевой рабочей зоне при МАО деталей диаметром 4, 8, 16 мм различными типами порошков при разной величине магнитной индукции. Установлено экспоненциальную зависимость, которая описывает характер изменения фронта возмущений в МАИ. Для равноосных осколочных частиц величина фронта возмущений в МАИ переддвигающейся деталью возрастает с увеличением размера частиц, что связано с большей способностью намагничиваться. Показано, что важное влияние на механизм восстановления структуры МАИ имеют веретенообразные формирования и их способность растягиваться в процессе МАО и формировать уплотненную зону из порошка переддвигающейся деталью не приводя к деформации и разрушению квазистабильных конусообразных формирований расположенных своими основаниями на поверхности полюсных наконечников, которые формируют кольцевую рабочую зону.

Досліджено особливості утворення та переформування ущільненої зони перед деталлю, що рухається в кільцевій робочій зоні при МАО деталей діаметром 4, 8, 16 мм різними типами порошків при різній величині магнітної індукції. Встановлено експоненціальну залежність, яка описує характер зміни фронту збурень в МАІ. Для рівновісних осколкових частинок величина фронту збурень в МАІ перед деталлю, що рухається зростає із збільшенням розміру частинок, що пов'язано з більшою здатністю намагнічуватися. Показано, що важливий вплив на механізм відновлення структури МАІ мають веретеноподібні формування та їх здатність розтягуватися в процесі МАО і формувати ущільнену зону з порошку перед деталлю, що рухається не приводячи до деформації і руйнування квазистабільних конусоподібних формувань розташованих своїми основами на поверхні полюсних наконечників, які формують кільцеву робочу зону.

The peculiarities of formation and reformation of the compacted zone before moving workpiece in the ring-type working area at magneto-abrasive machining (MAM) of the workpieces with a diameter of 4, 8, 16 mm by different types of powders at different value of magnetic induction were investigated. An exponential dependence, which describes the behavior of the disturbance front in the magneto-abrasive tool (MAT) was determined. For equiaxed fragmentation particles the size of the disturbance front in the MAT before moving workpiece increases with increasing particles size, which is connected with a greater ability to be magnetized. It is shown, that an important influence on the recovery mechanism of the structures of MAT have the spindle-shaped formations and their ability to stretch during the MAM and to form a compacted zone from the powder before moving workpiece without causing deformation and destruction of quasi-stable cone-shaped formations located by their bases on surface of the pole pieces, which form ring-type working area.

Майборода В. С.

д-р техн. наук, проф. НТУУ «КПІ»
maiborodavs@mail.ru

Ткачук И. В.

аспирант НТУУ «КПІ»

НТУУ «КПІ» – Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт», г. Киев.

УДК 621.923

Майборода В. С., Ткачук И. В.

ВОЗМУЩЕНИЯ В МАГНИТНО-АБРАЗИВНОМ ИНСТРУМЕНТЕ ПРИ ОБРАБОТКЕ ДЛИННОМЕРНЫХ ДЕТАЛЕЙ В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ

Эффективность процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) изделий в условиях кольцевой ванны в значительной степени определяется силами, которые обеспечивают прижим магнитно-абразивного порошка (МАП) к обрабатываемым поверхностям. В общем виде величина указанных сил – сил прижима – определяется скоростью перемещения обрабатываемого изделия вокруг оси кольцевой ванны, траекторией движения в зоне обработки – динамическими силами, а также силами магнитного поля, выполняющего роль регулируемой виртуальной связи магнитно-абразивного инструмента (МАИ), формирующегося в рабочих зазорах в процессе обработки. По данным, приведенным в [1] преобладание сил прижима МАП к обрабатываемым поверхностям, обусловленных динамическими факторами по сравнению с силами магнитного происхождения составляет 2–3 раза и более. Аналогические результаты получены в [2–4]. Такое преобладание динамической составляющей определяется и зависит от условий непосредственного формирования МАИ при МАО реальных деталей – уплотнением МАП, его перемешиванием и характером движения отдельных макрообъемов порошка в составе МАИ. Комплексные исследования особенностей переформования МАИ в зонах обработки позволили определить характер изменения плотности МАИ как перед движущейся деталью [5], так и по всему объему рабочей камеры кольцевого типа [1–3, 6, 7], установить основные закономерности движения и структурирования МАП в МАИ при МАО деталей с учетом различных технологических факторов, триботехнических и реологических характеристик МАП. Данные, полученные при анализе поведения отдельных групп частиц МАИ в уплотненной зоне, перед двигающейся деталью, носят ограниченный характер и позволяют определить либо форму уплотненной зоны вблизи обрабатываемой поверхности [8], либо амплитуду распространения уплотненного фронта [5]. Не исследованными являются процессы формирования и особенности распространения уплотненной зоны, образующейся перед двигающейся деталью, демпфирования возмущений в МАИ, создаваемых обрабатываемой деталью, в зависимости от характеристик частиц МАП, условий структурирования МАИ при изменении габаритов деталей, а значит и изменения величины зазоров между обрабатываемой поверхностью и поверхностью полюсных наконечников, формирующих кольцевую ванну. Ранее выполнены исследования по изменению силы давления МАИ на поверхность детали в зависимости от размера частиц МАП приведенные в [1] показали, что наибольшее давление имеет место при использовании в МАО порошков с размером частиц 300–400 мкм. Наличие подобного экстремума автор объясняет уменьшением числа реальных пятен контакта частиц МАИ с единицей площади обрабатываемой поверхности, что подтверждено прямыми измерениями в [2]. Однако результаты по измерению сил сопротивления МАИ обрабатываемым деталям приведенные в [6] не согласуются с данными [1]. Указанные различия объясняется тем фактом, что экспериментальные исследования были выполнены в различных условиях проведения МАО, а именно в условиях малых и больших зазоров [2, 3, 6], при различных режимах обработки и при использовании МАП различных типов. Особенно это относится к форме частиц, используемых при формировании МАИ, определяемой способом получения порошков и, как следствие, к морфологии поверхности отдельных частичек. Не учитывалась специфика структурообразования МАИ из порошковых магнитно-абразивных материалов с различной формой, размерами, магнитными и реологическими свойствами при магнитной индукции в зонах обработки, не превышающей 0,4 Тл.

Целью работы было исследование особенностей образования уплотненной зоны, которая формируется в МАИ переддвигающейся деталью при МАО, ее характеристик в зависимости от типа МАП, его свойств, размеров деталей и величины магнитной индукции в зоне обработки.

Исследования проводили на установке с кольцевым расположением магнитных зазоров шириной 35 мм при изменении величины магнитной индукции в диапазоне 0,1–0,25 Тл. Обработке подвергали цилиндрические детали стержневого типа диаметром 4, 10 и 16 мм, консольно располагаемые в рабочих зазорах параллельно оси кольцевой ванны. Использовали порошки, полученные методом распыления из расплавов с различной формой и размером частиц: оскольчатые равноосные порошки Ферромап с размером частиц 630/400 и 200/100 мкм, полученных из расплава с последующим размолотом на щековых дробилках и классификацией; округлые неравноосные порошки Полимам М с размером частиц 400/315 мкм и Царамам 630/400 мкм, полученных путем диспергирования расплава без последующего размолотом. Для дальнейшего анализа полученных результатов необходимо иметь конкретную информацию о магнитных характеристиках МАИ, сформированного при МАО из выбранных порошков в магнитной системе станка, на котором выполнялись экспериментальные работы. По методике, предложенной в [2] были выполнены измерения и получены зависимости изменения величины относительной магнитной проницаемости МАИ – $\mu_{отн}$ от напряженности магнитного поля – H в зонах обработки. Экспериментальные зависимости представлены на рис. 1.

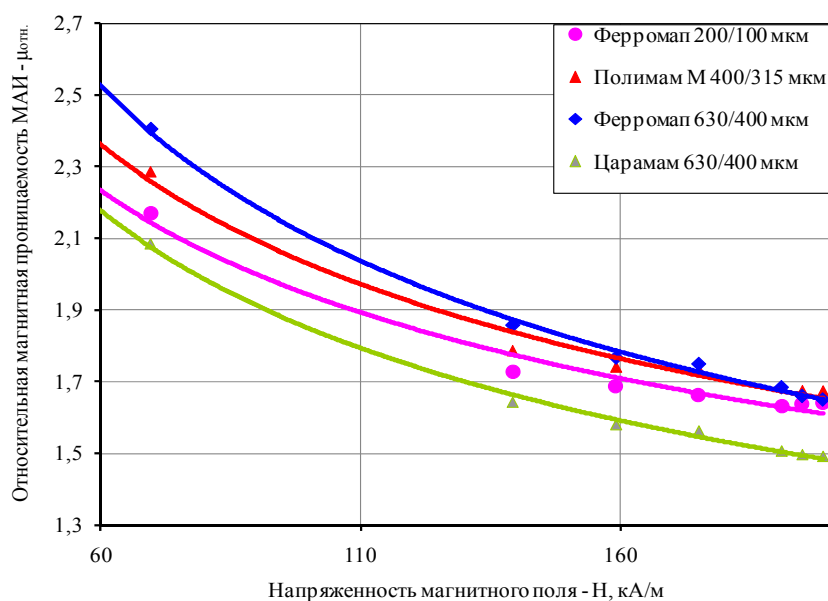


Рис. 1. Изменения величины $\mu_{отн}$ МАИ в зависимости от H в зонах обработки заполненных разными типами МАП.

Если различие в величинах $\mu_{отн}$ МАИ, сформированных из разных порошков можно объяснить отличиями в химическом и фазовом составе [2, 3], то различие между $\mu_{отн}$ МАИ из порошков Ферромап разных размеров объясняется исключительно особенностями структурирования частиц в специфические квазистабильные формирования в виде конусоподобных столбиков и веретенообразных уплотнений [2, 5]. Более высокие значения $\mu_{отн}$ в МАИ из Ферромап 630/400 мкм объясняется, прежде всего, тем фактом, что отдельные частички более крупных размеров лучше намагничиваются, а также тем, что реальная плотность у такого МАИ выше. Таким образом, можно предположить, что силы магнитного поля для МАИ, который формируется из частичек 630/400 мкм будут выше, чем у МАИ, сформированного из мелких частиц – 200/100 мкм. Особенности формирования уплотненной зоны переддвигающейся деталью и соответственно управление силами нормального давления

на обрабатываемую поверхность не возможно без информации о специфике переформирования и уплотнения МАИ. Подобную информацию можно получить из анализа смещений отдельных макрообъемов МАИ в зоне обработки. По методике контрольных флажков [8] было проанализировано поле и характер смещений макрообъемов МАИ перед двигающейся деталью. Характерный вид поля смещений в МАИ сформированного из МАП Ферромап с размером частиц 200/100 мкм при МАО деталей различных размеров и при разных магнитных индукциях в зонах обработки представлен на рис. 2. Полученные поверхности смещений для МАИ, сформированных из разных МАП аппроксимированы полиномами вида:

$$\psi(L, H) = \sum_{i=0}^4 \sum_{j=0}^3 a_{ij} \cdot L^i \cdot H^j \quad (1)$$

где L – координата рабочей зоны в направлении движения детали, H – ширина рабочей зоны, a_{ij} – коэффициенты полинома для функции $\psi(L, H)$.

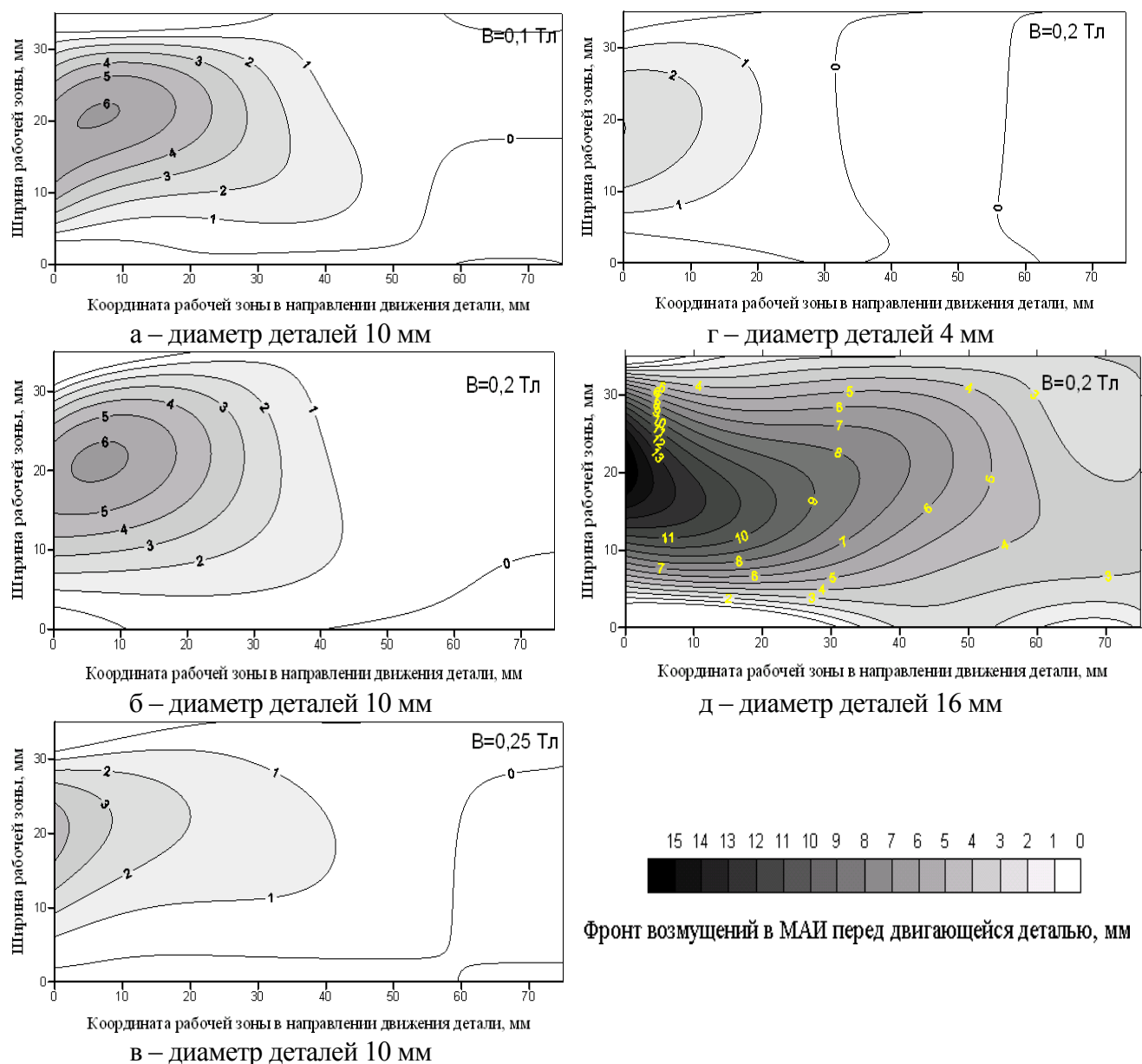


Рис. 2. Топограммы полей смещений макрообъемов МАИ в плоскости кольцевой ванны при МАО цилиндрических деталей различных диаметров при разных магнитных индукциях

Значения коэффициентов a_{ij} в (1) и среднеквадратичной ошибки аппроксимации – Δ приведены в табл.1 для МАО стержневых деталей диаметром 10 мм порошком Ферромап с размером частиц 200/100 мкм при разных величинах магнитной индукции в рабочих зазорах. По полиномам (1) было рассчитано величину поля смещения макрообъемов МАИ как:

$$S = \int_0^H \int_0^L \Psi(L, H) dL dH. \quad (2)$$

Значения величины площади фронта возмущений в МАИ в плоскости кольцевой ванны перед двигающейся деталью в процессе перемещения деталей различных размеров в рабочем кольцевом зазоре шириной 35 мм при разных условиях МАО различными порошками приведены в табл. 2. Анализ полученных результатов расчетов и измерений показал, что если с увеличением размера обрабатываемых деталей имеет место монотонный рост объема переформируемого в процессе МАО МАИ перед двигающейся деталью, то возрастание магнитной индукции в рабочей зоне не является причиной для аналогичного роста величины фронта возмущений. Установлено, что для МАИ из равноосных осколочных порошковых материалов имеет место уменьшение величины фронта возмущений перед деталью при магнитной индукции в пустых рабочих зонах 0,25 Тл, в то время как для порошков с округлой формой частиц наименьшее количество смещаемого порошка имеет место при магнитной индукции 0,18–0,2 Тл.

Таблица 1

Значения коэффициентов a_{ij} и среднеквадратичной ошибки аппроксимации

Коэффициенты, a_{ij}	В, Тл		
	0,1	0,2	0,25
I	2	3	4
a_{00}	-3,41	-1,26	-0,24
a_{01}	1,17	0,42	$7,84 \cdot 10^{-2}$
a_{02}	$-4,06 \cdot 10^{-2}$	$1,26 \cdot 10^{-2}$	$2,6 \cdot 10^{-2}$
a_{03}	$2,42 \cdot 10^{-4}$	$8,03 \cdot 10^{-4}$	$-9,12 \cdot 10^{-4}$
a_{10}	$4,29 \cdot 10^{-1}$	$1,73 \cdot 10^{-1}$	$2,11 \cdot 10^{-2}$
a_{11}	$-1,83 \cdot 10^{-1}$	$-4,71 \cdot 10^{-2}$	$-1,73 \cdot 10^{-2}$
a_{12}	$1,36 \cdot 10^{-2}$	$3,36 \cdot 10^{-3}$	$-6,42 \cdot 10^{-4}$
a_{13}	$-2,59 \cdot 10^{-4}$	$-5 \cdot 10^{-5}$	$4,32 \cdot 10^{-5}$
a_{20}	$-1,92 \cdot 10^{-2}$	$-6,08 \cdot 10^{-3}$	$-2,69 \cdot 10^{-3}$
a_{21}	$9,37 \cdot 10^{-3}$	$2,24 \cdot 10^{-3}$	$1,51 \cdot 10^{-3}$
a_{22}	$-7,67 \cdot 10^{-4}$	$-2,23 \cdot 10^{-4}$	$-3,97 \cdot 10^{-5}$
a_{23}	$1,54 \cdot 10^{-5}$	$4,63 \cdot 10^{-6}$	$-4,4 \cdot 10^{-7}$
a_{30}	$3,33 \cdot 10^{-4}$	$7,56 \cdot 10^{-5}$	$6,92 \cdot 10^{-5}$
a_{31}	$-1,75 \cdot 10^{-4}$	$-3,87 \cdot 10^{-5}$	$-3,45 \cdot 10^{-5}$
a_{32}	$1,45 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$1,27 \cdot 10^{-6}$
a_{33}	$-2,92 \cdot 10^{-7}$	$-9,2 \cdot 10^{-8}$	$-3,4 \cdot 10^{-9}$

Продолжение табл. 1

<i>l</i>	2	3	4
a_{40}	$-1,93 \cdot 10^{-6}$	$-3,01 \cdot 10^{-7}$	$-4,84 \cdot 10^{-7}$
a_{41}	$1,05 \cdot 10^{-6}$	$2,16 \cdot 10^{-7}$	$2,29 \cdot 10^{-7}$
a_{42}	$-8,69 \cdot 10^{-8}$	$-2,55 \cdot 10^{-7}$	$-9,07 \cdot 10^{-9}$
a_{43}	$1,75 \cdot 10^{-9}$	$5,43 \cdot 10^{-10}$	$4,96 \cdot 10^{-11}$
Ошибка аппроксимации, Δ	$2,58 \cdot 10^{-2}$	$2,81 \cdot 10^{-2}$	$1,52 \cdot 10^{-2}$

Такое anomальное изменение величины зоны возмущений может быть объяснено исключительно особенностями структурирования МАИ при МАО в исследуемом диапазоне магнитных индукций в зонах обработки. Неравноосные МАП формируются в МАИ в виде более вытянутых столбиков и веретенообразных формирований, чем равноосные частицы [2]. Образование подобных квазистабильных формирований с явной анизотропией свойств будет определять как характер демпфирования возмущений в МАИ перед двигающейся деталью в направлении движения деталей, и способность к расширению фронта смещений в перпендикулярном направлении – по направлению к полюсным наконечникам, так и характер распределения нормальных и тангенциальных составляющих сил, действующих на обрабатываемую поверхность. Оценить соотношение нормальной составляющей указанных сил, возникающих в МАИ к тангенциальной по всему объему уплотняемого порошка перед двигающейся деталью можно по величине f – соотношению максимального смещения к полуширине фронта смещения на различном удалении от обрабатываемой поверхности [5, 8]. Данное соотношение будет показывать насколько нормальное давление для различных МАП будет преобладать над тангенциальной составляющей, а с физической точки зрения – характеризовать способность демпфировать ударную волну в МАИ, создаваемую двигающейся деталью.

Таблица 2

Величина площади фронта возмущений в МАИ перед двигающейся деталью

Тип порошка	Размер частиц, мкм	Величина B в рабочих зонах, Тл	Диаметр обрабатываемой детали, мм	Величина площади фронта возмущений в МАИ, мм ²
<i>l</i>	2	3	4	5
Ферромаг	200/100	0,2	4	622
		0,1	10	1568
		0,2		1671
		0,25		1227
		0,2	16	2861
	630/400	0,2	4	441
		0,1	10	2016
		0,2		1881
		0,25		1801
		0,2	16	2842
Царамам	630/400	0,2	4	540
		0,1	10	1500
		0,2		1080
		0,25		1123
		0,2	16	2319

Продолжение табл. 2

1	2	3	4	5
Полимам М	400/315	0,2	4	360
		0,1	10	653
		0,2		1044
		0,25		1034
		0,2	16	2006

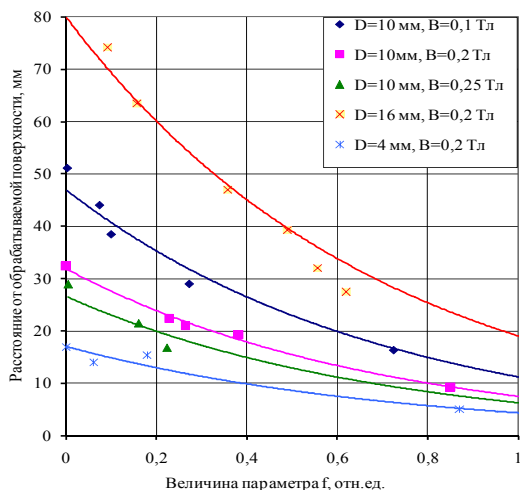
Эта способность будет зависеть от специфики структурирования МАИ, его плотности, намагниченности отдельных объемов МАИ, габаритов и магнитных свойств обрабатываемых деталей и ширины зон обработки, т. е. вероятности нахождения обрабатываемых поверхностей вблизи полюсных наконечников – области рабочих зазоров, где возможно скопление малоподвижных объемов МАИ, которые называют мертвой зоной [5]. Характер изменения величины распространения в плоскости кольцевой ванны в процессе MAO образующегося перед двигающейся деталью фронта возмущений в МАИ в зависимости от параметра f можно описать экспоненциальной зависимостью вида (3).

$$L = L_0 \cdot e^{(-\delta \cdot f)} \quad (3)$$

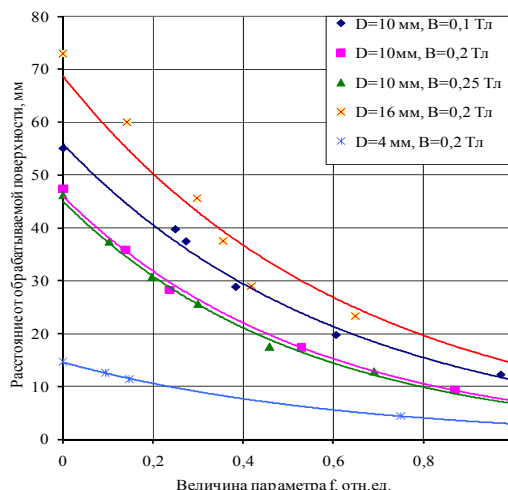
где L – расстояние от обрабатываемой поверхности детали, являющейся источником возмущений в МАИ в процессе MAO в направлении ее движения, L_0 – расстояние от обрабатываемой поверхности детали, на котором смещения отдельных макрообъемов порошка в МАИ отсутствуют, δ – коэффициент, который характеризует процесс затухания возмущений в МАИ, вызванный в порошке движением образца. Характерный вид полученных зависимостей для используемых в исследованиях порошков при обработке деталей указанных выше размеров, при разных значениях магнитных индукций в рабочих зазорах при MAO приведен на рис. 3, а значения величин L_0 и δ в табл. 3. Анализ полученных результатов (рис. 3, табл. 3) показал, что для равноосных оскользящих порошков большее расстояние, на которое распространяются возмущения в МАИ перед двигающейся деталью – L_0 характерно для случая использования порошковых феррообразов с крупными частицами, что связано, прежде всего, с большей способностью их к намагничиванию и повышенной величиной $\mu_{отн}$ МАИ (рис. 1).

Величина L_0 определенная для разных МАП и различных значений напряженности магнитного поля хорошо коррелирует с параметром $\mu_{отн}$ при MAO деталей диаметром 4 и 10 мм. При MAO деталей диаметром 16 мм указанная корреляция не имеет места. Это объясняется тем, что при обработке деталей диаметром 4 и 10 мм в процессе их движения в порошке, формируемом магнитным полем в МАИ, фронт распространения возмущений не затрагивает малоподвижных объемов порошка вблизи поверхности полюсных наконечников – так называемой мертвой зоны [5, 7, 8], и связан преимущественно с удлинением и последующим разрушением квазистабильных конусообразных столбиков и веретенообразных формирований в МАИ.

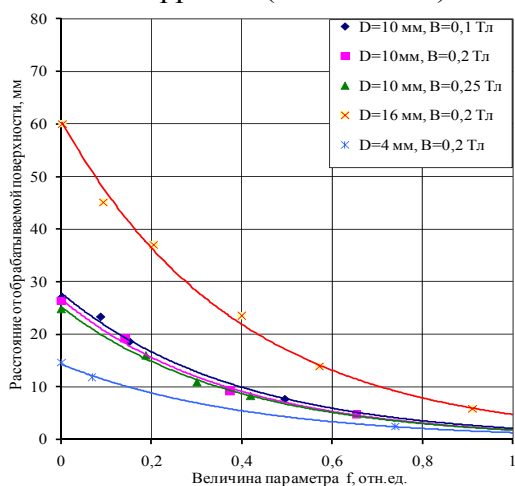
MAO образцов диаметром 16 мм вызывает в МАИ возмущения, которые приводят к смещению оснований конусообразных столбиков относительно поверхности полюсных наконечников. При этом создаются условия, которые по своему действию аналогичны механизмам образования зон заклинивания при MAO в условиях малых рабочих зазоров [1, 7]. Образование зон заклинивания нарушает «регулярную» структуру в МАИ и приводит к аномальному росту нормального давления МАИ на поверхность детали вблизи полюсных наконечников. В результате такого всплеска давления происходит нарушение оптимального соотношения между нормальными и тангенциальными составляющими сил, что является причиной возможного шаржирования порошка в поверхность детали, образования «комет» на обрабатываемой поверхности [1].



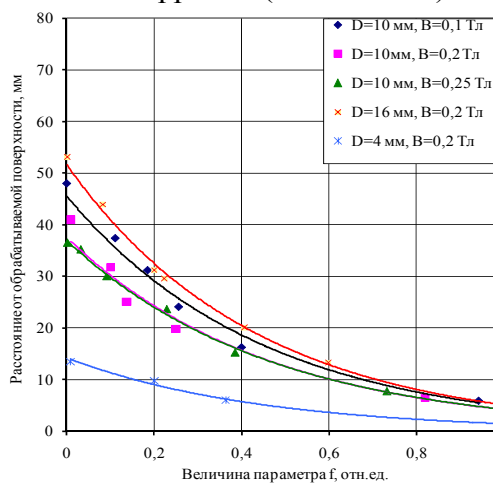
а – Ферромап (200/100 мкм)



б – Ферромап (630/400 мкм)



в – Полимам М (400/315 мкм)



г – Царамам (630/400 мкм)

Рис. 3. Зависимости изменения величины распространения в плоскости кольцевой ванны фронта возмущений в МАИ сформированного из разных порошков от значений параметра f при MAO деталей различных диаметров и различной магнитной индукции в рабочих зазорах.

Таблица 3

Значения коэффициентов L_0 и δ

Тип порошка	Размер частиц, мкм	Величина магнитной индукции в рабочих зонах, Тл	Диаметр обрабатываемой детали, мм	L_0	δ
1	2	3	4	5	6
Ферромап	200/100	0,2	4	17,1	1,37
		0,1	10	47,02	1,43
		0,2		31,91	1,45
		0,25		26,63	1,44
		0,2		80,1	1,44
	630/400	0,2	4	14,6	1,6
		0,1	10	55,92	1,6
		0,2		46,04	1,84
		0,25		45,08	1,89
		0,2		16	68,68

Продолжение табл. 3

1	2	3	4	5	6
Церамам	630/400	0,2	4	14,23	2,27
		0,1	10	45,57	2,24
		0,2		37,6	2,19
		0,25		36,99	2,16
		0,2	16	51,65	2,31
Полимам М	400/315	0,2	4	14,3	2,41
		0,1	10	27,87	2,58
		0,2		26,72	2,69
		0,25		25,21	2,66
		0,2	16	60,71	2,55

Максимальная амплитуда распространения фронта возмущений в МАИ при МАО будет зависеть от степени неравноосности частиц МАП и способности веретеноподобных и конусообразных квазистабильных формирований к растяжению без их разрыва и разрушения. Подобная способность к формированию структурных элементов МАИ хорошо коррелирует с коэффициентом δ – характеризующим способность МАИ демпфировать возмущения без нарушения регулярной структуры. Полученные значения показывают, что для неравноосных порошков величина δ не менее чем в 1,5 раза выше, чем для равноосных, а значит и существенно выше демпфирующая способность МАИ, его способность сохранять регулярную структуру, форму и свойства МАИ в процессе МАО. Это можно объяснить преобладающим влиянием магнитного поля, обеспечивающего повышенную степень «армирования» МАИ.

Величина нормальной составляющей давления МАИ на обрабатываемую поверхность с учетом скорости движения деталей будет зависеть от массы порошка, с некоторой степенью точности, определяется как $F_n = mV^2 / R$, где V – линейная скорость движения детали в МАИ, R – величина радиуса кольцевой ванны, m – масса порошка, которая находится в возмущенной зоне. Выполненные расчеты на примере МАИ из Ферромап с размером частиц 200/100 мкм при магнитных индукциях 0,1, 0,2 Тл, полученные в [8] показали, что величина массы порошка, который переформируется и уплотняется перед деталью практически не меняется и составляет, для наших условий МАО, величину порядка 120 г. При величине магнитной индукции 0,25 Тл, активно взаимодействующая с деталью масса порошка, снижается практически в два раза. Такое различие в массах порошка в уплотненной зоне перед двигающейся деталью связано с тем, что при индукциях больших 0,25 Тл происходит смещение порошка в малоподвижную область с повышенной величиной магнитной индукции вблизи полюсных наконечников – в область мертвой зоны. При этом снижается нормальное давление на деталь и будет возрастать тангенциальная составляющая, возникающая в результате проявления эффекта заклинивания МАП в пространстве между полюсным наконечником и обрабатываемой поверхностью.

ВЫВОДЫ

Исследованы особенности образования уплотненной зоны, которая формируется в МАИ перед двигающейся деталью при МАО. Установлены ее характеристики в зависимости от типа МАП, его свойств, размеров деталей и величины магнитной индукции в зоне обработки. Показано, что с увеличением размера обрабатываемой детали объем переформируемого МАИ, с различных МАП, монотонно растет (увеличивается). Для МАИ из равноосных осколочных МАП имеет место уменьшение величины фронта возмущений перед деталью

при $V = 0,25$ Тл, а для округлых при $V = 0,18-0,2$ Тл. Установлено экспоненциальную зависимость, которая описывает характер изменения величины фронта возмущений в МАИ. Для равноосных осколочных частиц величина фронта возмущений в МАИ перед двигающейся деталью возрастает с увеличением размера частиц, что связано с большой способностью намагничивания. Установлено, что для порошка Ферромап с размером частиц 200/100 мкм при $V = 0,1-0,2$ Тл масса, которая переформируется и уплотняется перед деталью составляет 120 г, а при $V = 0,25$ Тл она снижается практически в два раза, что связано со смещением порошка в зону вблизи полюсных наконечников. Показано, что определяющее значение в механизме восстановления структуры МАИ имеют веретенообразные формирования и их способность растягиваться в процессе МАО и формировать уплотненный фронт из порошка перед двигающейся деталью не приводя к деформации и разрушению квазистабильных конусообразных формирований расположенных своими основаниями на поверхности полюсных наконечников, которые формируют кольцевую рабочую зону.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов. / Ю. М. Барон. – Л. : Машиностроение, 1986. – 176 с.
2. Майборода В. С. Основи створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Майборода Віктор Станіславович. – К., 2001. – 404 с.
3. Степанов О. В. Исследование процесса формирования магнитно-абразивного порошкового инструмента для обработки деталей сложной формы. дис. канд. техн. наук. : 05.16.06 / О. В. Степанов – К., 1997. – 145 с.
4. Гейчук В. М. Синтез кінематики процесу магнітно-абразивної обробки в кільцевій ванні: дис. докт. техн. наук: 05.03.01 / Володимир Миколайович Гейчук. – К. 2012. – 472 с.
5. Майборода В. С. Структурно-фізическа модель формування магнітно-абразивного інструмента в великих робочих зазорах кільцевого типу при обробці стержневих изделий / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий, И. В. Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія : Машинобудування і машинознавство. – Донецьк : ДонНТУ, 2013. – Випуск 1 (10). – С. 36–46.
6. Майборода В. С. Магнитно-абразивная обработка специальных деталей (на примере лопаток компрессоров ГТД): автореф. дис. канд. техн. наук. / В. С. Майборода – Киев, 1988. – 19 с.
7. Крымский М. Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка / М. Д. Крымский // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – К. : ИПМ АНУССР, 1980. – С. 92–97.
8. Ткачук И. В. Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке в условиях больших рабочих зазоров кольцевого типа / И. В. Ткачук, В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий // Вісник Кременчуцького національного університету ім. М. Остроградського – КрНУ, 2014. – Вип. 2 (85). – С. 132–137.
9. Майборода В. С. Аналіз умов магнітно-абразивного оброблення багатограничних непереточуваних твердосплавних пластин при їх довільному розташуванні в робочих зонах установки типу кільцева ванна. / В. С. Майборода, Д. Ю. Джулий // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету ім. М. Остроградського. 2008. – № 1 (48), частина 2. – С. 22–28.