

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

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: maiborodavs@mail.ru

Исследовано процесс уплотнения и переформирования магнитно-абразивного инструмента и отдельных его элементов при магнитно-абразивной обработке деталей изготовленных с немагнитных материалов цилиндрической формы различных размеров. Показано, что в процессе обработки консольно-закрепленных деталей в рабочем зазоре кольцевого типа перед ними в объеме магнитно-абразивного инструмента формируется три зоны, для которых образуются специфические условия и особенности уплотнения и структурирования порошкового материала в магнитно-абразивный инструмент. Установлено и идентифицировано форму уплотненных зон, которые зависят от магнитной и динамической составляющих сил, возникающих в порошковой среде при обработке. Показано, что даже при малых скоростях магнитно-абразивной обработки в больших рабочих зазорах кольцевого типа в условиях слабых магнитных полей преобладающее влияние имеют силы динамического происхождения, которые определяются скоростью и траекторией перемещения обрабатываемых деталей.

Ключевые слова: магнитно-абразивная обработка, магнитно-абразивный инструмент, напряженность, магнитная индукция, уплотненная зона.

ОСОБЛИВОСТІ ФОРМУВАННЯ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОГО ІНСТРУМЕНТУ ПРИ МАГНІТНО-АБРАЗИВНОМУ ОБРОБЛЕННІ В УМОВАХ ВЕЛИКИХ РОБОЧИХ ЗАЗОРІВ КІЛЬЦЕВОГО ТИПУ

І. В. Ткачук, В. С. Майборода, Д. Ю. Джулій

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: maiborodavs@mail.ru

Досліджено процес ущільнення та переформування магнітно-абразивного інструменту та окремих його елементів при магнітно-абразивному обробленні деталей виготовлених з немагнітних матеріалів циліндричної форми різних розмірів. Показано, що в процесі оброблення консольно-закріплених деталей в робочому зазорі кільцевого типу перед ними в об'ємі магнітно-абразивного інструменту формується три зони, для яких утворюються специфічні умови і особливості ущільнення та структуривання порошкового матеріалу в магнітно-абразивний інструмент. Встановлено та ідентифіковано форму ущільнених зон, які залежать від магнітної та динамічної складових сил, що виникають в порошковому середовищі при обробленні. Показано, що навіть при малих швидкостях магнітно-абразивного оброблення у великих робочих зазорах кільцевого типу в умовах слабких магнітних полів переважаючий вплив мають сили динамічного походження, які визначаються швидкістю та траєкторією переміщення оброблювальних деталей.

Ключові слова: магнітно-абразивне оброблення, магнітно-абразивний інструмент, напруженість, магнітна індукція, ущільнена зона.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Обеспечение прогнозируемого процесса магнитно-абразивной обработки (МАО) в условиях больших рабочих зазоров кольцевого типа и слабых магнитных полей невозможно без исчерпывающей информации об особенностях формирования магнитно-абразивного инструмента (МАИ) в зонах обработки, условиях его взаимодействия с обрабатываемыми деталями, специфическими процессами, протекающими в порошковой среде в процессе МАО. Особенно это важно при обработке деталей сложной пространственной конфигурации, имеющих полузакрытые полости, такие как, например, сверла, концевые фрезы, развертки, турбинные лопатки и другие. Исследования, выполненные в последние годы в данном направлении, показали, что целенаправленное воздействие на технологические факторы процесса МАО [1], условия формирования МАИ, конструктивные особенности рабочих зазоров установок [1–3], введение в зоны обработки дополнительных формообразующих МАИ элементов [4, 5] позволяет не только повысить эффективность и качество финишной обработки в магнитном поле, но и реализовать процесс МАО на

более высоком техническом уровне – выполнять размерную обработку на микроуровне [1]. Для этого необходим полный учет свойств МАИ, условий и особенностей его движения в процессе обработки, образования уплотненных и разреженных микро- и макрообъемов, формирующихся из отдельных групп частиц магнитно-абразивного порошка в различных участках рабочих зон обработки установок для МАО.

Исследования изменения степени относительного уплотнения МАИ перед обрабатываемыми деталями [6] в различных зонах магнитных зазоров при обработке стержневых немагнитных цилиндрических образцов диаметром 8 мм при напряженности магнитного поля 80, 140 и 200 кА/м показали, что магнитно-абразивный порошок формирует уплотненные области не только в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности, но и на определенном расстоянии перед деталью. При этом степень уплотнения МАИ в различных участках магнитных зазоров будет различной в зависимости от напряженности магнитного поля в магнитной системе установки [1, 6, 7], градиента магнитной индукции в рабочих зонах, скорости перемещения и

умовий базирования деталей в зонах обработки. Установлено, что при напряженности магнитного поля 80 кА/м имеет место преимущественное уплотнение МАИ в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности в зонах, расположенных возле полюсных наконечников, т.е. в зонах с повышенной магнитной индукцией в рабочих зазорах. При этом, в сравнении большей напряженностью магнитного поля, степень уплотнения наиболее значительна и достигает 0,2 на поверхности полюсов. Формирование уплотненных зон вблизи поверхности полюсных наконечников можно объяснить тем, что веерообразные формирования [1, 6], образующиеся в средней части рабочих магнитных зазоров – в области с пониженной магнитной индукцией [8, 9], не достаточно прочные и устойчивые. При напряженности магнитного потока меньшей 80 кА/м указанные формирования разрываются, их части смещаются в зону с повышенной магнитной индукцией, осуществляя достраивание, уплотнение и восстановление формы конусообразных столбиков, своими основаниями, расположенными на полюсных наконечниках [1, 6]. При напряженностях больших 80–100 кА/м прочность к разрыву веерообразных формирований достаточна для того, чтобы формировать относительно устойчивую, уплотненную зону в МАИ перед двигающейся деталью. Необходимо отметить, что с ростом напряженности до 200 кА/м и более величина (протяженность) уплотненной зоны увеличивается, как и степень уплотнения. Однако анализ поведения МАИ в рабочих зонах магнитных зазоров, выполненный по изменению степени уплотнения в отдельных участках зон обработки не достаточен и не позволяет выявить особенности образования, формирования и движения магнитно-абразивного порошка перед деталью, образования уплотненной зоны, фронта и характера ее распространения.

Поэтому целью работы является исследование процессов уплотнения и переформирования МАИ и отдельных его элементов при МАО деталей различных размеров.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИСЛЕДОВАНИЙ. Экспериментальные исследования были выполнены при обработке цилиндрических образцов диаметром 4, 8, 16 и 20 мм, изготовленных из немагнитных материалов (сплавы Д16Т, ВТ 3–1, Х18Н10Т) в условиях сплошной кольцевой рабочей зоны шириной 35 мм. МАО выполняли магнитно-абразивным порошком с размером частиц 200/100 мкм с осколочной формой частиц. Величина магнитной индукции в рабочих зазорах варьировалась от 0,1 до 0,25 Тл, скорость перемещения деталей от 0,01 до 4 м/с. Исследования выполняли при угле наклона оси деталей к плоскости кольцевой ванны 90° – при их вертикальном расположении. Для контроля характера формирования, распространения и движения уплотненной зоны, образующейся перед двигающейся деталью в процессе МАО, использовали метод флажков, расположенных в магнитно-абразивном порошке до начала процесса обработки поперек магнитного зазора на расстоянии 3,5 мм друг от друга и вдоль кольцевой зоны на расстоянии 10 мм. Контроль распространения уплотненного фронта, образующегося в МАИ при МАО, выполняли с помощью скоростной киносъемки – по началу (моменту) отклонения отдельных флажков либо от начального (исходного), либо от вертикального положения. Для контроля реальной скорости перемещения образцов в контрольной зоне магнитного зазора использовали специально разработанные бесконтактные фотооптические датчики, расположенные на неподвижной части шпинделя станка. Место расположения датчиков строго согласовывалось с положением контрольной зоны. По разнице между сигналами от датчиков, записываемых на ЭВМ, определяли действительную скорость перемещения образцов в контрольной зоне при обработке.

На первом этапе экспериментальных исследований скорость перемещения образцов в МАИ была минимальна и составляла 0,01 м/с. Характер изменения положения флажков перед двигающимися образцами различных диаметров, представлен на фотографиях, полученных в процессе МАО (рис.1).

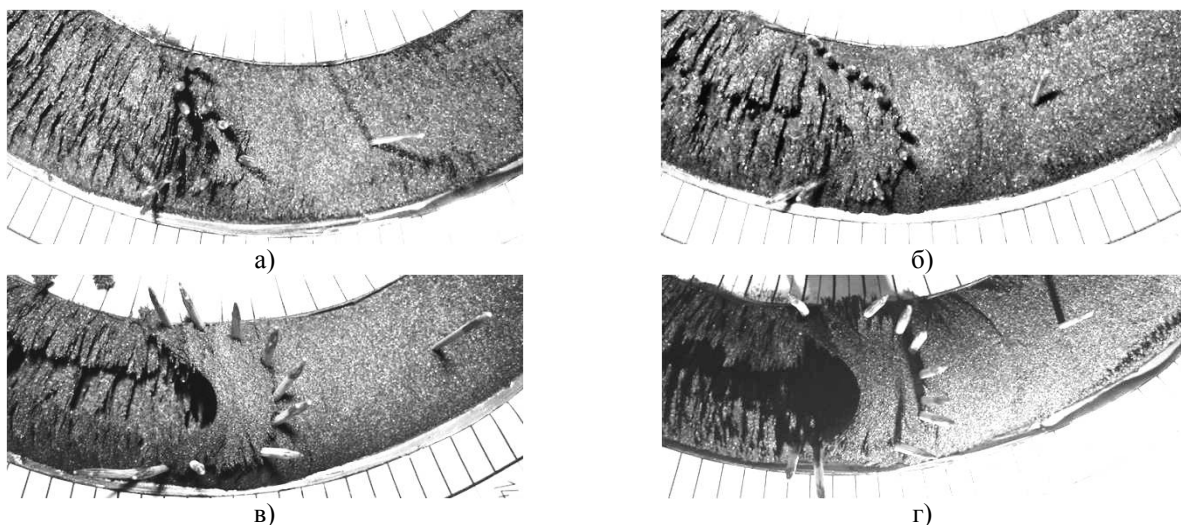


Рисунок 1 – Характер изменения положения флажков перед двигающимися образцами различных диаметров: а) $d=4$ мм, б) $d=8$ мм, в) $d=16$ мм, г) $d=20$ мм

Анализ полученных изображений позволяет идентифицировать в МАИ, который формируется перед двигающимися образцами три зоны связанные с перестройкой (изменением текстуры) первоначально сформированного магнитно-абразивного порошка в рабочих зазорах. Первая зона – часть МАИ, расположенная в непосредственной близости от обрабатываемой поверхности. В данной зоне происходит активный контакт отдельных формирований МАИ с деталью и активная обработка. Именно для этой зоны характерным является наибольшее уплотнение, возникающее в МАИ. Вторая зона, расположенная перед первой, имеет незначительное уплотнение порошкового инструмента. Особенностью поведения порошка в данной зоне является частичное его вытеснение из области магнитных зазоров и наличие сформировавшейся вдоль магнитных линий регулярной структуры МАИ [6]. Третья зона – зона предварительного переформирова-

ния, в которой не установлено существенного уплотнения МАИ, но процесс перестройки и начального движения элементов порошковой среды имеет место. Подобный процесс перестройки связан с распространением в порошковой среде волны возмущения, источником которой является передняя поверхность двигающихся деталей.

Детальный анализ первой, наиболее уплотненной зоны в МАИ показал, что фронт распространения возмущений в порошковой среде может быть определен по результатам измерений координат положения флажков в рабочем зазоре на этапе прохождения центра детали через линию их исходного положения в первоначально сформированном порошке, на начальном этапе обработки. Характерное изменение положения флажков, полученное в результате измерений их смещения, на примере МАО деталей диаметром 8 мм представлено на рис. 2.

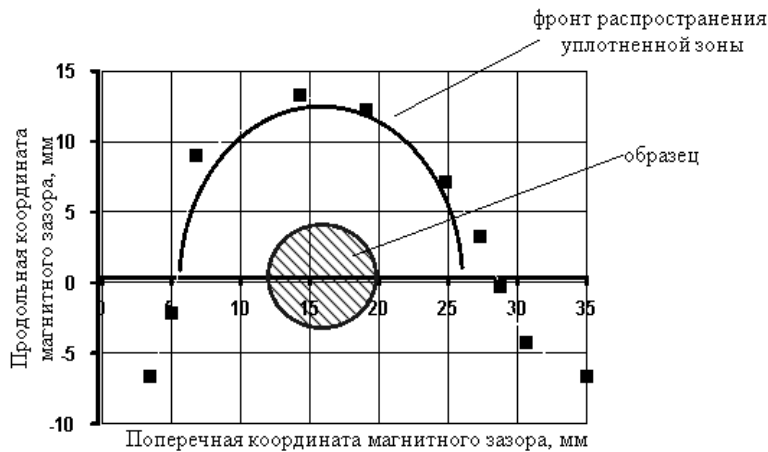


Рисунок 2 – Характер распространения фронта уплотненной зоны в МАИ при МАО вертикально расположенных цилиндрических деталей $\varnothing 8$ мм

Для образцов разных диаметров функциональное представление фронта распространения первой зоны – участка наиболее активной обработки поверхности образцов, в которой реализуются условия обеспечения эффективного МАО (имеет место наличие соответствующих нормальной и тангенциальной составляющих скорости относительного перемещения магнитно-абразивного порошка по обрабатываемой поверхности), для случая, когда начало координат по оси X расположено на поверхности внутреннего полюсного наконечника кольцевой ванны, а по оси Y – совпадает с центром обрабатываемой детали, может быть описано уравнением (1) вида:

$$\frac{y^2}{\left(\frac{d}{2} + a\right)^2} + \frac{(x - c)^2}{\left(\frac{d}{2} + b\right)^2} = 1 \quad (1)$$

где, y – координата смещения положения флажка от исходного положения в направлении движения обрабатываемых деталей вдоль рабочей зоны; x – координата смещения положения флажка от исходного положения в направлении перпендикулярном движению обрабатываемых деталей вдоль рабочей

зоны – поперек рабочей зоны; d – диаметр обрабатываемой детали; c – координата расположения центра детали относительно края поверхности внутреннего полюсного наконечника; a – максимальная величина амплитуды фронта распространения волны возмущения МАИ в направлении движения детали вдоль оси Y в первой зоне; b – полуширина фронта волны возмущения по оси X , при условии что $Y=0$.

Значения коэффициентов a, b, c, d представлены в табл. 1.

Таблица 1 – Значения коэффициентов

d , мм	a , мм	b , мм	c , мм
4	5,6	4,07	15,3
8	8,48	5,9	16
16	11,6	6,91	15,5
20	14,46	7,41	16,5

Фактически перед двигающейся деталью стержневого типа формируется наиболее уплотненная зона в виде цилиндра с поперечным сечением в виде полуэллипса, у которого коэффициент a равен мак-

симальної товщині ущільненого еліптичного фронту, а коефіцієнт b визначає ширину еліпса в напрямленні перпендикулярно вектору руху. Аналіз зміни коефіцієнтів a і b в залежності від діаметра вертикально розташованих оброблюваних деталей – d показав, що їх величини практично лінійно збільшуються з ростом діаметра деталі. В зв'язі з цим рівняння фронту ущільнення в першій зоні можна при МАО в зазорі шириною 35 мм для досліджуваного діапазону діаметрів зразків можна представити в вигляді (2):

$$\frac{y^2}{(d+k)^2} + \frac{(x-c)^2}{(0,7d+k)^2} = 1 \quad (2)$$

де $k = 3,8$ мм – характерний розмір стійких квазістабільних формувань з частинок іспов'язаного магнітно-абразивного порошку в складі структури МАІ [1, 6], приймаючий активне участь в обробці в складі веерообразних формувань і конусообразних стовпчиків.

Аналіз отриманих даних по розповсюдженню фронту ущільненої зони в МАІ в непрямує близькості від оброблюваної поверхні показав хорошу кореляцію отриманих результатів з даними зміни ступеня ущільнення в МАІ, представлених в [6]. Можна утверждати, що для першої зони характерна ступень відносного ущільнення МАІ, яка не менше величини 0,1–0,2. Характер зміни відстані між оброблюваною поверхнею і розповсюдженням фронту в першій ущільненій зоні дозволяє передположити, що різниця інтенсивності процесу обробки буде практично лінійно визначатися величиною ущільненої зони. Це підтверджується результатами зміни тиску МАІ на оброблювану поверхню в процесі МАО в роботах [3, 8], і особливостями обробки лопаток ГТД і їх кромок, описаних в [1]. Для умов обробки в великих робочих зазорах можна вважати, що коефіцієнт a буде характеризувати переважно динамічну складову сил виникаючих

при ущільненні порошку в робочому зазорі, а коефіцієнт b – сили, визначуємі магнітним полем. Соотношение сил магнітного і динамічного походження, може бути охарактеризовано числом магнітного тиску – R_H [1], яке при малій швидкості в робочому зазорі шириною 35 мм змінюється від 0,5 до 0,73, зменшуючись з збільшенням діаметра оброблюваного зразка. Це свідчить про те, що навіть при малих швидкостях руху деталей при МАО в великих робочих зазорах в умовах слабких магнітних полів (магнітної індукції в робочих зонах до 0,25 Тл) переважає вплив сил динамічного походження, визначуємі швидкістю і траєкторією переміщення виробів.

Величина розповсюдження возмущення в МАІ в напрямленні руху во другій зоні, в якій величина відносного ущільнення менше 0,1, при обробці зразків різних діаметрів практично однакова і становить 16–17 мм. Іменно в цій зоні починається процес витиснення порошку з міжполюсного простору робочих зазорів області з пониженою напруженістю магнітного поля і пониженою інтенсивністю обробки. Третя зона, в якій розповсюджується возмущення в МАІ від рухомої деталі і починається попереднє переформування МАІ, по своїм розмірам близька до розмірам другої зони. Розміри другої і третьої зон будуть в багатьох випадках залежати від напруженості магнітного поля і швидкості переміщення зразків в зонах обробки, т.е. від відношення сил магнітного і динамічного походження.

Контроль розповсюдження возмущення в порошкової середі в процесі обробки виконували в моменті відхилення або зміщення флажків, визначуємі по результатам фіксації процесу, виконаного з допомогою швидкісної кінофотозйомки. Приклад зміщення контрольних флажків наведено на рис. 3.

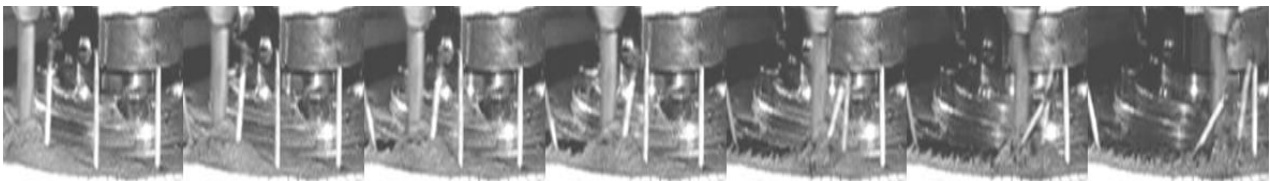


Рисунок 3 – Зміна положення флажків перед рухомими зразками діаметром 8 мм, швидкість МАО 0,5 м/с

дослідження, виконані при магнітних індукціях в зонах обробки 0,1 і 0,25 Тл при різних миттєво виміряних швидкостях руху зразків показали, що величина максимальної амплітуди фронту розповсюдження возмущення в МАІ, що відповідає кінцю третьої зони, при малих полях ($B=0,1$ Тл) з збільшенням швидкості обробки в діапазоні 0,5–3,5 м/с зростає практично лінійно, в той час як при $B=0,25$ Тл при швидкостях великих 1,8–2 м/с має місце зменше-

ння зони возмущення (рис. 4). Це може бути пов'язано або з дією відбитих від поверхні хвиль возмущення і стабілізації структури МАІ в напрямленні дії магнітного поля, або з результатом дії пондеромоторних сил, що сприяють демпфированню возмущення в МАІ [1], або з ефектом руйнування веерообразних формувань під дією динамічних сил – їх розривом, при умові перевищення порогових швидкостей обробки [6]. Уточнення механізму

взаимодействия поверхности обрабатываемых деталей с МАИ требует проведения дополнительных исследований с полным анализом поля возмущений в порошке перед движущейся деталью.

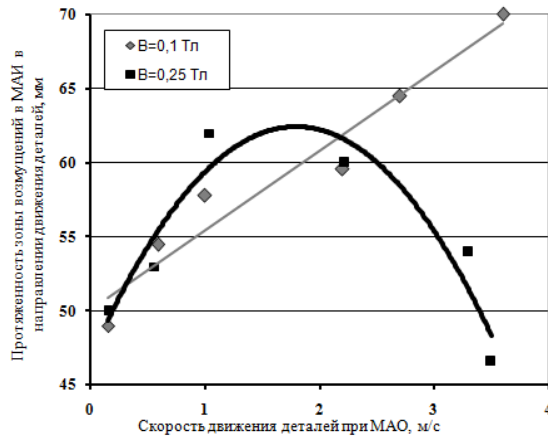


Рисунок 4 – Изменение протяженности зоны возмущений в МАИ в зависимости от скорости движения деталей при МАО при различных значениях магнитной индукции в рабочих зазорах

ВЫВОДЫ. Исследования особенностей перестроения магнитно-абразивного порошка в рабочих зазорах кольцевого типа показали, что при обработке в условиях больших магнитных зазоров деталей стержневого типа при их консольном расположении передняя поверхность образцов инициирует в МАИ возмущения, которое состоит из трех зон – зоны непосредственно контактирующей с обрабатываемой поверхностью и обеспечивающей процесс обработки, зоны промежуточной – в которой реализуется активное перестроение МАИ, сопровождающееся частичным вытеснением порошка из рабочего пространства магнитного зазора и зоны распространения динамического возмущения. Характеристики формы фронта распространения зоны в МАИ, имеющей непосредственный контакт с обрабатываемой поверхностью показали, что он имеет форму полуэллипса, по параметрам которого можно идентифицировать магнитную и динамическую составляющие, возникающие при обработке и установить характерные размеры квазистабильных формирований в МАИ. Анализ фронта распространения динамического возмущения, создаваемого деталью, в процессе обработки показал, что при скоростях МАО больших 1,8–2 м/с в МАИ происходят процессы, приводящие к уменьшению максимальной величины его распространения, свя-

занные с действием специфических сил и процессов, требующих дополнительных исследований.

ЛИТЕРАТУРА

1. Майборода В.С. Основы створення і використання порошкового магнітно-абразивного інструменту для фінішної обробки фасонних поверхонь: дис. ... докт. техн. наук: спец 05.03.01. – К., 2002. – 404 с.
2. Deutsches Patent- und Markenamt DE 10 2009 015 158 A1 2009.09.30 B24B31/112. Werkzeugenmaschine zur magnetabrasiven Bearbeitung / O. Byelyayev, V. Geichuk, V. Maiboroda; заявка 10 2009 015.158.3 від 26.03.2009.
3. Сакулевич Ф.Ю. Основы магнитно-абразивной обработки. – Минск: Наука и техника, 1981. – 328 с.
4. Особенности формирования магнитно-абразивного инструмента при магнитно-абразивной обработке длинномерных деталей в кольцевой рабочей зоне / В.С. Майборода, Д.Ю. Джулий, И.В. Ткачук // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2011. – № 8 (190). – С. 49–56.
5. Магнітно-абразивне оброблення кільцевого різального інструменту в умовах великих магнітних щільностей з використанням відновлювальних елементів / В. Майборода, Д. Джулій, І. Ткачук, О. Беляєв // Вісник ТНТУ. – 2012. – № 4(68). – С. 133–141.
6. Структурно-фізическа модель формування магнітно-абразивного інструмента в більших робочих зазорах кільцевого типу при обробці стержневих изделий / В.С. Майборода, И.В. Ткачук, Д.Ю. Джулий // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: Машинобудування і машинознавство. – Донецьк: ДонНТУ, 2013. – Вип. 1(10). – С. 36–46.
7. Крымский М.Д. Распределение и уплотнение магнитно-абразивного порошка в рабочем зазоре станка // Магнитно-абразивные материалы и методы их испытания. – К.: ИПМ АНУССР, 1980. – С. 92–97.
8. Барон Ю. М. Магнитно-абразивная и магнитная обработка изделий и режущих инструментов / Ю.М.Барон. – Л.: Машиностроение, 1986. – 176 с.
9. Оликер В.Е. Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / Оликер В.Е. – М.: Металлургия, 1990. – 176 с.

SHAPING CHARACTERISTICS OF A MAGNETIC ABRASIVE TOOL DURING THE MAGNETIC ABRASIVE MACHINING IN THE CASE OF LARGE RING-TYPE WORKING GAPS

I. Tkachuk, V. Maiboroda, D. Dzhulii

National Technical University of Ukraine «Kiev Polytechnic Institute»

prosp. Peremogy 37, Kyiv, 03056, Ukraine. E-mail: maiborodavs@mail.ru

Within the research it was investigated the processes of compaction and reformation of a magnetic abrasive tool and its single elements during the magnetic abrasive machining of the articles of cylindrical shape and various sizes that were produced from nonmagnetic materials. It is shown that when machining the cantilevered parts, in a ring-type working gap in front of them three zones are created throughout a magnetic abrasive tool. Generation of specific condi-

tions and considerations for compaction and structuring of powder materials into the magnetic abrasive tool are followed by these zones' creation. It was determined and identified the shapes of compacted zones, which depend on magnetic and dynamic components of the forces resulting in a powder material under the machining. It is shown the domination of dynamic forces even at low speeds of the magnetic abrasive machining in large ring-type working gaps and under conditions of weak magnetic fields. Such forces depend on speed and trajectory of the movement of the parts machined.

Key words: magnetic-abrasive machining, magnetic-abrasive tool, voltage, magnetic induction, compacted area.

REFERENCES

1. Maiboroda, V.S. (2002), "The basics of creation and application of the powder magnetic-abrasive tool for a shaped surface finishing", Dissertation DSc. (Engineering.), 05.03.01, Kiev, Ukraine.
2. Byelyayev, O., Geichuk, V., Maiboroda V. (2009), "Machine tool for magnetic-abrasive machining", German Patent and Trademark Office DE 10 2009 015 158 A1 2009.09.30 B24B31/112. Patent application 10 2009 015.158.3 of 26 March 2009.
3. Sakulevich, F.Yu. (1981), *Osnovy magnitno-abrazivnoy obrabotki* [Fundamentals of magnetic-abrasive machining], Nauka i tekhnika, Minsk, Belarus.
4. Maiboroda, V., Dzhulii, D., Tkachuk, I. (2011), "Features of formation of a magnetic – abrasive tool at magnetic – abrasive processing of long-sized details in a ring-type working area", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Mashynobuduvannya i mashynoznavstvo*, vol. 8, no. 190, pp. 49–56.
5. Maiboroda, V., Dzhulii, D., Tkachuk, I., Byelyayev, O. (2012), "Magnetic-abrasive machining of end-cutting tool in a large magnetic gaps with using the restore elements", *Scientific journal of the Ternopil State Technical University*, vol. 4, no. 68, pp. 133–141.
6. Maiboroda, V., Tkachuk, I., Dzhulii, D., (2013), "Structural-physical model of forming of magnetic-abrasive tool in large ring-type working areas at the machining of shaft-type details", *Naukovi pratsi Donetskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu. Seriya: Mashynobuduvannya i mashynoznavstvo*, vol. 1 no. 10, pp. 36–46.
7. Krymskiy, M.D. (1980) "Distribution and compaction of magnetic-abrasive powder in the working gap of machine", *Magnitno-abrazivnyye materialy i metody ikh ispytaniya*, Kiev: IPM ANUSSR, pp. 92–97.
8. Baron, Yu.M. (1986), *Magnitno-abrazivnaya i magnitnaya obrabotka izdeliy i rezhushchikh instrumentov* [Magnetic-abrasive and magnetic machining of products and cutting tools], Mashinostroyeniye, Leningrad, Russia
9. Oliker, V.E. (1990) *Poroshki dlya magnitno-abrazivnoy obrabotki i iznosostoykikh pokrytiy*. [Powders for magnetic-abrasive machining and wear-resistant coatings], Metallurgiya, Moscow, Russia.

Стаття надійшла 20.01.2014.