

А.Ю. Гаврушкевич, инженер

В.Н. Гейчук, д.т.н., доц.

В.С. Майборода, д.т.н., проф.

Д.Ю. Джулий, инженер

НТУ Украины «Киевский политехнический институт»

ИССЛЕДОВАНИЕ МЕХАНИЗМА ФОРМИРОВАНИЯ КРОМОК ПРИ МАГНИТНО-АБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ В КОЛЬЦЕВОЙ ВАННЕ

Проведены исследования механизма формирования кромок при магнитно-абразивной обработке в кольцевой ванне на примере образцов из закаленной стали и деформированной бронзы. Обработке подвергались образцы в форме параллелепипеда при фиксированных углах наклона. Исследование размеров, формы поперечного сечения и параметров шероховатости кромки проводилось с помощью профилометра-профилографа, установки MicroCAD, электронного микроскопа и программы AutoCAD. В результате исследований предложена схема срезания материала на кромке, которая предполагает, что съём материала на вершине кромки происходит в основном за счет уплотненного первичного потока под углом атаки к обрабатываемой грани. Для построения математической модели кинематики процесса магнитно-абразивной обработки кромок приняты два основных положения: движение частицы порошка вдоль кромки не принимает участия в формировании кромки; форма кромки в нормальном сечении к теоретической линии кромки в заданной точке зависит от отношений проекций суммарной скорости резания на нормаль и бинормаль, и образуется как ломаная. Ломаная является результатом пересечения траекторий абразивных частиц, которые движутся под углами атаки к поверхностям, образующим кромку, и внедряются в обрабатываемые поверхности на величину, зависящую от механических свойств материала.

***Ключевые слова:** К-фактор; магнитно-абразивная обработка; крацевание.*

Вступление. Постановка проблемы. К геометрическим показателям качества обработки кромки относятся:

- шероховатость поверхностей [2, 5, 9, 10, 32 и др.] (шероховатость поверхностей, сечение которых образуют кромку, теоретически являющейся линией);

- собственная шероховатость кромки: поперечная, которая является результатом вибраций и сколов в процессе заточки лезвия [2, 22, 32], и продольная, которая является результатом наложения друг на

друга микропрофилей поверхностей, образующих кромку [2, 22, 32]. Продольную шероховатость авторы [22, 32] называют «зазубренностью», измеряемую параметром R_t (R_{\max} согласно ГОСТ 2789-73);

- величина радиуса округления [2, 5] и равномерность его распределения вдоль кромки [2, 5, 9, 10, 22, 32 и др.]. Геометрически кромка является результатом пересечения двух поверхностей и пространственной линией. При изготовлении добиться точного выполнения линии невозможно и кромка является переходной поверхностью неправильной геометрической формы. Большинство известных математических моделей эту поверхность принимают в виде поверхности, имеющей в поперечном сечении форму дуги окружности некоторого радиуса ρ [2, 20, 31, 32]. Фактически подразумевается радиус модели округления физически полученной кромки, которая образуется при заточке лезвия. Насколько эта модель соответствует реальной форме кромки, зависит от условий изготовления и шероховатости поверхностей, образующих кромку;

- К-фактор (каппа-фактор) [24, 32], характеризующий архитектуру кромки и измеряемый в плоскости, перпендикулярной линии пересечения передней и задней поверхностей в заданной точке. Он представляет собой отношение удлинений линий пересечения передней и задней поверхностей с нормальной поверхностью к вершине кромки. Дополнительный параметр Δr выражает расстояние от острой кромки до высшей точки округленной кромки. Экспериментально определена зависимость сил резания, трения, отжима и подачи, температуры в зоне резания от К-фактора. С увеличением S_α , S_α и Δr увеличивается сила резания и сила подачи. Сила подачи возрастает, как правило, больше, чем сила резания. Фактор формы К имеет большее влияние на характеристику износа. Несимметричная форма кромки имеет преимущества в зависимости от типа процесса резания, в котором используется инструмент с изготовленными кромками. Резание с $K = 1$ показывает постоянно хорошие результаты независимо от типа процесса [32].

Анализ предыдущих исследований. В работе [12] утверждается, что в настоящее время не существует технологий, позволяющих обеспечить равномерный радиус округления вдоль кромки. Колебания величины вдоль кромки могут составить до 30 %. Процесс формирования кромок при магнитно-абразивной обработке (МАО) в кольцевой ванне с торцевой загрузкой в условиях больших рабочих зазоров исследовался в [3, 4, 9, 10, 22, 23, 27, 29]. Формированию кромок при МАО в кольцевой вращающейся ванне с радиальной

загрузкой посвящены работы [5, 22]. Эти работы в основном направлены на экспериментальные исследования влияния технологических параметров процесса МАО на качество обработки режущих инструментов различных типов (осевых, концевых, многогранных неперетачиваемых пластин) и на округление режущих кромок в частности. А именно, в работе [22] выполнены сравнительные исследования процессов формирования режущих кромок спиральных сверл с быстрорежущей стали методами: гидроструйным, крацевания и двумя способами МАО – в кольцевой ванне и вращающейся кольцевой ванне на постоянных магнитах (или, иначе, в магнитной головке) [8, 28, 32]. Отмечается, что зазубренность кромок, обработанных гидроструйным способом, вдвое меньше, чем в исходном состоянии, но вдвое больше, чем после МАО. Крацевание вообще не повлияло на зазубренность кромок. Самая низкая зазубренность получена после обработки в кольцевой ванне. Продолжительность обработки оказывает незначительное влияние на зазубренность кромок. Более 3-кратного уменьшения зазубренности достигают после 60 с обработки сверла. Дисперсия значений невелика. На величину зазубренности и на радиус округления существенно влияют тип и размер порошка. ФЕРОМАП дает 1,4–1,6-кратное увеличение радиусов, в то время как ПОЛИМАМ-М увеличивает радиусы округления на 10–20 %. Это вызвано в большей степени режущим свойством порошка ФЕРОМАП, что подтверждается работами [9, 10, 29]. Обработка МАО магнитной головкой дает большие радиусы округления, нежели в «кольцевой ванне» даже при продолжительности обработки в 3–5 раз меньшей. Особенно большие радиусы, получаемые в магнитной головке на перемычке: 112–114 мкм против 12–17 мкм в кольцевой ванне. Это подтверждается и в [32], где указано, что при обработке в магнитной головке величины радиусов округления находятся в пределах 30–50 мкм. Автор [22] справедливо указывает, что это связано с особенностями кинематики установок. Этот вывод сделан и в работе [5]. В ней отмечается, что обработка стружечных канавок неравномерная – снятие материала от 1,2 до 20 мкм; шероховатость колеблется в пределах $Ra = 0,03–0,6$ мкм. Кроме того, нужно учесть разницу в величинах магнитной индукции в рабочих зонах: 0,25–0,7 Тл в кольцевой ванне и 0,8–1,2 в магнитной головке.

Теоретических исследований, в частности кинематики процесса МАО, направленных на прогнозирование формы кромки, в этих и других работах не обнаружено. Поэтому исследования кинематики

процесса MAO формирования кромок для обеспечения идентичности условий обработки являются актуальными.

Целью работы является исследование механизма формирования кромок при MAO в кольцевой ванне в условиях больших рабочих зазоров.

Результаты исследований. По результатам анализа предыдущих исследований процесса резания свободным абразивом [6, 13, 17, 26, 30 и др.] и формирования кромок были приняты следующие основные допущения:

- режущие элементы моделей абразивных зерен имеют форму конуса с закругленной вершиной. Радиус округления определяется микрогеометрическими характеристиками поверхности абразивных частиц, а не их макрогеометрией;

- все зерна имеют одинаковые размеры и одну режущую кромку, которая остается острой в течение всего времени обработки;

- абразивное зерно является абсолютно твердым и контактирует с пластически деформированным материалом, а рабочая поверхность является гладким полупространством;

- никаких деформаций гранулы и взаимного смещения абразивных зерен не происходит, во время обработки они не разрушаются;

- напряженность магнитного поля в постоянном рабочем зазоре однородная;

- зерно выполняет постепенное врезание;

- движение зерна вдоль кромки не принимает участия в формировании кромки;

- форма кромки в нормальном сечении к теоретической линии кромки в заданной точке зависит от отношений проекций суммарной скорости резания на нормаль и бинормаль, и образовывается как ломаная, образующаяся в результате пересечения траекторий перемещения частиц порошка под углами атаки, внедренных в обрабатываемые поверхности максимум на величину h_{\max} .

Для проверки корректности принятых допущений были выполнены экспериментальные исследования по следующей методике:

1. Изготовление двух партий образцов из бронзы БРАЖ9-4 и закаленной инструментальной стали У10А. Образцы имеют форму параллелепипеда длиной 21 мм и сечением 12x12 мм. В одной из квадратных граней выполнено резьбовое отверстие для крепления на оправке.

2. Заточка алмазным кругом по двум смежным граням – прямоугольной и квадратной с образованием кромки. Доводка кромки.

3. Измерение после заточки и доводки:

а) шероховатости смежных граней вдоль кромки на профилометре-профилографе 252;

б) радиуса округления кромки на установке MicroCAD premium;

в) запись геометрии кромок в плоскостях, перпендикулярных теоретическим линиям кромок, и их объемных изображений на установке MicroCAD premium;

г) фотографирование форм кромок на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И при 200–2500-кратном увеличении.

4. MAO образцов на роторном станке с использованием режимов [4]: магнитно-абразивный порошок (МАП) ПОЛИМАМ-Т зернистостью 200/100 мкм; магнитная индукция в рабочей зоне при отсутствии МАП - $B = 0,25$ Тл; время обработки $t = 180$ с; скорость главного движения $V_p = 3$ м/с, СОТС - Асфол:

а) прямоугольной грани в режиме «стекания»: $\xi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ, 75^\circ$; угол наклона восстановительного элемента [4] $\beta = 40^\circ$;

б) квадратной грани в режиме «натекания»: $\xi = 15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$; без восстановительного элемента.

4. Измерение обработанных образцов:

а) радиуса округления кромки, К-фактора, Δr , ее зазубренности (минимальные, максимальные величины и среднеквадратическое отклонение) на установке MicroCAD premium;

б) запись геометрии кромки в плоскости перпендикулярной кромке и их объемные изображения на установке MicroCAD premium;

в) фотографирование формы кромки на растровом электронном микроскопе РЭМ-106И при 200–2500-кратном увеличении.

Полученные заточкой алмазным кругом и доводкой начальные средние радиусы округления $\rho_0 = 4,0$ мкм на образцах из бронзы БРАЖ9-4 и $\rho_0 = 3,8-4,1$ мкм на образцах из стали У10А соответствуют результатам, приведенным в [12] при $\rho_0 = 5,0$ мкм при заточке алмазным кругом. Анализ результатов измерений показывает, что кромка не имеет постоянного радиуса округления по всей ее длине даже после заточки, что подтверждает результаты ранее проведенных исследований [12]. Разброс значений радиусов округления на стальных образцах составляет 15–25 %, а на бронзовых 18–45 %.

После MAO разброс значений радиусов зависит от материала и угла наклона образца. Для бронзовых образцов максимальный разброс остается на прежнем уровне, минимальный – уменьшается до 12 %. Для стальных образцов разброс увеличивается до 19–69 %. Для

бронзовых образцов, обработанных в режиме стекания, наблюдается незначительное колебание разброса радиуса вдоль кромки – от 30 до 40 %. При обработке в режиме натекания при углах $\xi > 45^\circ$ разброс уменьшается до 12–30 %.

Максимальные значения радиусов округления значительно возрастают у бронзовых образцов с 4,1–6,2 мкм до 50–60 мкм при обработке в режиме натекания. В режиме натекания максимум радиусов округления до 16 мкм получен при углах наклона $\xi = 75^\circ$. При этом наибольшие изменения радиуса наблюдаются при углах наклона $\xi > 45^\circ$. Хотя для стали, наоборот, в режиме натекания при этих углах наблюдается уменьшение максимальных значений радиусов. Зависимости средних радиусов округления кромки от угла наклона образца (рис. 1) имеют тот же характер, что и максимальные значения.

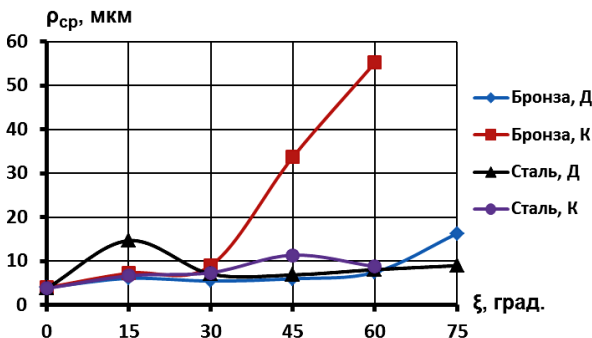


Рис. 1. Зависимости средних радиусов округления кромки от угла наклона образца (Д – обработанные в режиме стекания; К – обработанные в режиме натекания)

Профили кромки после МАО, записанные с помощью программы ODSCAD в формате *.bmp, обрабатывались в программе AutoCAD следующим образом (рис. 2):

1. Изображение вставлялось в файл AutoCAD.
2. Изображение масштабировалось по значению радиуса округления кромки, которое приводится в нижнем правом углу изображения.
3. На расстоянии 240 мкм от верхней точки кромки проводилась горизонтальная линия, которая пересекается с изображением обработанной грани в точке P_t.

4. Через изображение необработанной грани проводилась прямая, к которой через точку Pt проводится перпендикулярная прямая изображению необработанной грани. В вершине прямого угла строился круг с исходным радиусом кромки.

5. Контур между исходным и обработанным контуром обводился замкнутой полилинией. Площадь контура будет условной площадью S поперечного сечения удаленного материала.

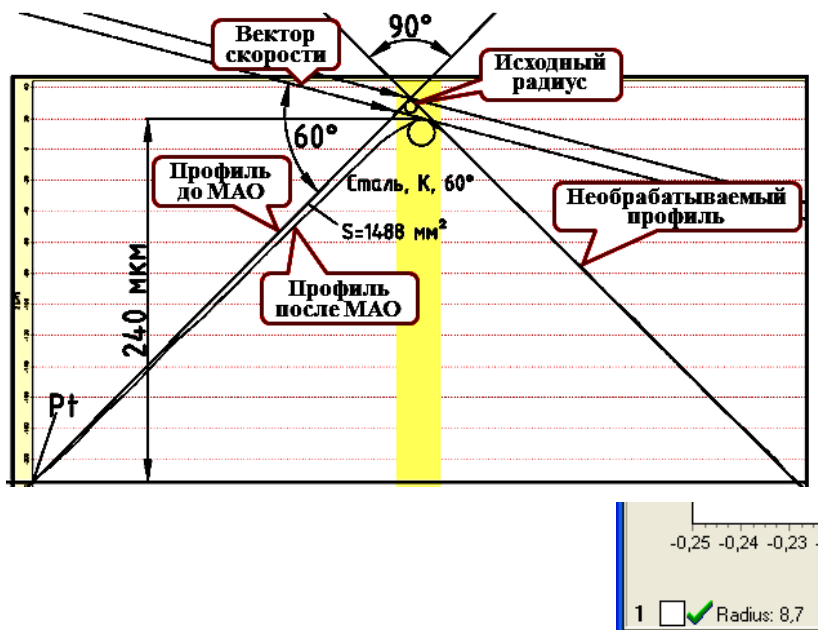


Рис. 2. Обработка изображения профиля кромки

Поперечные профили кромок обработанных образцов с восстановленными начальными профилями (рис. 2) дает количественную характеристику – величину удаленного материала. Если разность площадей начального и конечного контуров в среднем сечении умножить на длину кромки и плотность материала образца, то получим вес удаленного материала. Однако в данном случае нас интересует зависимость относительной величины удаленного материала (съем) и качественная зависимость профиля от угла наклона образцов (рис. 3). Здесь за единицу принята наименьшая площадь S, полученная для стального образца, обработанного в режиме натекания

при угле наклона $\xi = 60^\circ$. Для образцов из бронзы зависимости имеют ярко выраженный максимум. Для стальных образцов они несколько сглажены. Максимумы относительного съема для образцов из обоих материалов, обработанных в режимах стекания и натекания, не совпадают. Причина этого явления – разные условия обработки в названных режимах. В режиме стекания обработке подвергалась длинная сторона образца, которая вместе с частью оправки погружалась в магнитно-абразивный инструмент (МАИ). Это способствовало тому, что значительная часть порошка сползала по поверхности оправки и длинной грани, обрабатывая ее, и скапливалась в плотную массу в зоне обрабатываемой кромки, то есть в средней части по высоте рабочей зоны.

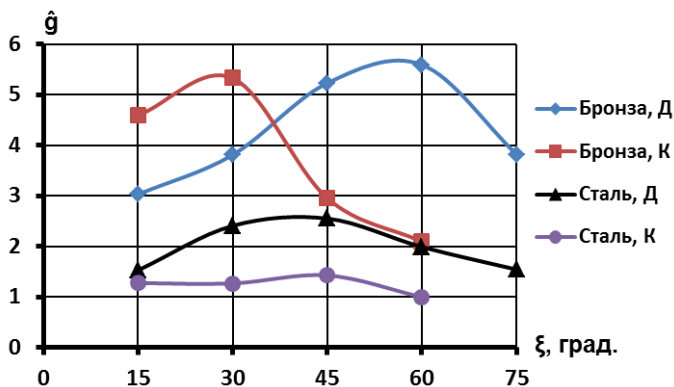


Рис. 3. Зависимости значений относительной площади поперечного сечения, удаленного в процессе МАО, от угла наклона образца (Д – обработанные в режиме стекания; К – обработанные в режиме натекания)

Поэтому для восстановления плотности МАП по высоте рабочей зоны использовалось восстанавливающее устройство [4]. При обработке в режиме натекания порошок скользил только по короткой грани образца. Он незначительно опускался по ней вниз и частично поднимался вверх по необрабатываемой длинной грани. Это способствовало сохранению первоначального распределения МАП по высоте рабочей зоны. Поэтому в режиме натекания обработка велась без восстанавливающего устройства (рис. 2, 4). Но, вместе с тем, это приводило к меньшей величине удаленного материала (рис. 3, 4).

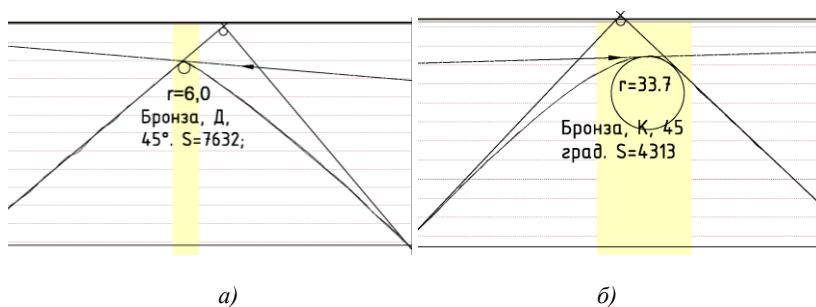


Рис. 4. Поперечные профили кромок образцов из бронзы после МАО ($\xi = 45^\circ$):

- а) обработанные в режиме стекания;
- б) обработанные в режиме натекания

Для стальных образцов, у которых длинная грань имеет повышенную шероховатость, максимальные значения зазубренности кромки до МАО (минимальные значения равны нулю) одного порядка с начальными радиусами округления кромок (рис. 5).

После МАО эти образцы имеют значения параметра зазубренности, близкие к другим образцам, в которых шероховатость длинной грани была значительно ниже. Этот результат, по нашему мнению, подтверждает допущение о том, что при значительной высоте микронеровностей обрабатываемой поверхности зерно опирается на вершины микронеровностей своими макровыступами и выполняет резание микровыступами зерен.

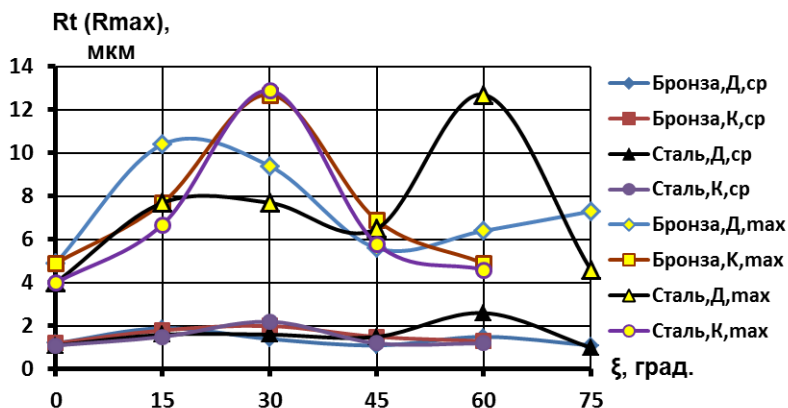
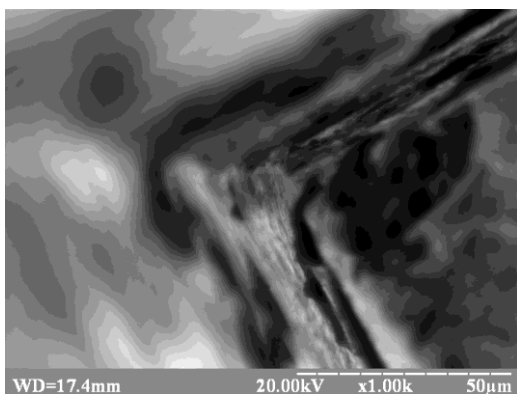


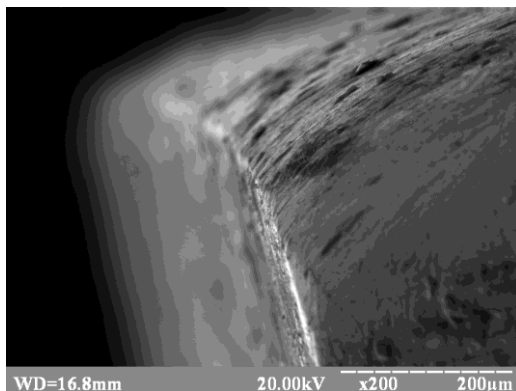
Рис. 5. Зависимости средних и максимальных значений зазубренности от угла наклона образца (*Д* – обработанные в режиме стекания; *К* – обработанные в режиме натекания)

Сравнение фотографий кромок, полученных на электронном микроскопе РЕМ-106И при 200–1000-кратном увеличении (рис. 6) с профилем, полученным с помощью оптического MicroCAD premium, позволяет сделать вывод, что после заточки на самом деле нет никакого радиуса округления. То, что при 250-кратном увеличении напоминает округленную форму, при 1000-кратном увеличении является кривой случайной формы, полученной пересечением двух шероховатых поверхностей (рис. 6, *а*). Это подтверждает выводы, сделанные в работах [2, 22, 31, 32].

После МАО, если сравнить рисунки 4, *б* и 6, радиусов округления на снимке нет – кромка является пересечением криволинейной обработанной поверхности с необработанной плоской. Образован тупой угол (около 135°), а программное обеспечение ODSCAD вписало в этот угол достаточно большой радиус, средняя величина которого составляет 33,7 мкм при небольшом разбросе ($r = 27,6\text{--}39,5$ мкм) и зазубренности ($Rt_{cp} = 1,5$ мкм; $Rt = 0\text{--}6,9$ мкм). Аналогичные результаты получены на бронзовых и стальных образцах при других углах наклона. При этом средняя величина радиуса составляет 11,4 мкм (наибольшая в режиме натекания) при значительном разбросе ($r = 7,7\text{--}24,9$ мкм) и незначительной зазубренности ($Rt = 0\text{--}5,8$ мкм; $Rt_{cp} = 1,2$ мкм).



а)



б)

Рис. 6. Фото кромки образцов из бронзы: а) после заточки;

б) после МАО в режиме натекания ($\xi = 45^\circ$)

Основываясь на результатах проведенного анализа, предложена схема снятия материала в основном в трех зонах вблизи кромки (рис. 7):

- вершины режущей кромки площадью S_1 срезаются в основном за счет уплотненного первичного потока под углом атаки $\chi(\xi)$ [4] к обрабатываемой грани;

- материал вдоль обрабатываемой грани срезается под действием двух потоков: первичного – под углом атаки $\chi(\xi)$ и вторичного потока, нарастающего и сползающего вдоль обрабатываемой грани к кромке, с уплотнением в зоне кромки. Об адекватности этого предположения говорит форма поперечного сечения обработанной грани - постепенное увеличение площади S_2 при движении к кромке;

- за вершиной режущей кромки площадью S_3 за счет вторичных потоков и возмущений [9].

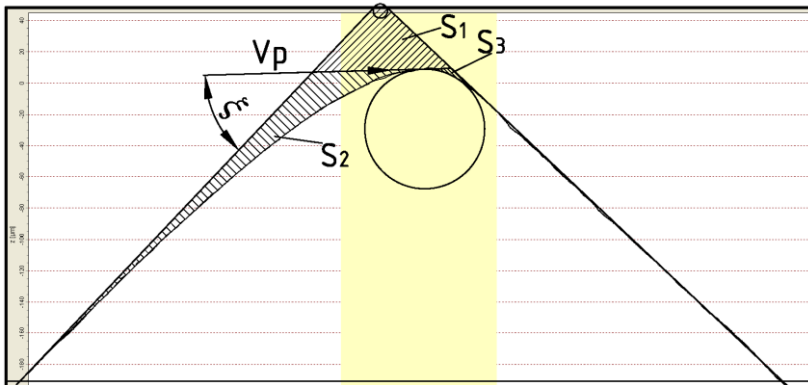


Рис. 7. Схема срезания материала у вершины кромок при МАО образцов

Кроме того, было выполнено фотографирование на микроскопе РЭМ-106И при 50–2500-кратном увеличении выделенных в работе [19] после МАО бронзовых образцов осколочными МАП (неравноосном СП-17 и равноосном ФЕРОМАП зернистостью 630/400) микростружки и чешуек материала. После измерений определено, что толщина стружки и чешуек составляет 9–16 мкм, ширина стружки – 9–44 мкм, длина – 160–300 мкм. Два больших размера чешуек составляет 70–130 мкм. Эти результаты одного порядка с результатами, полученными в [16, 25], но по толщине стружки на порядок больше, чем указанные в [1, 15], и на порядок превышают высоту микронеровностей зерна порошка [11, 14, 21]. То есть эти результаты противоречат утверждению, что резание определяется микрогеометрическими характеристиками поверхности абразивных частиц (субмикровиступы), а не их макрогеометрией [7, 14, 15]. Хотя это, как уже упоминалось, может быть справедливым для начальной стадии резания (при больших значениях высот шероховатости) и при малых силах нормальных составляющих сил резания.

Выполнен расчет максимальных глубин внедрения по (18) (рис. 8):

$$h_{\max} = 2 \cdot V_{ef} \cdot R \cdot \sin(\chi) \cdot \sqrt{\frac{\rho_c}{3k_s c \sigma_s}},$$

где V_{ef} – эффективная скорость частиц (определяются особенностями конкретного метода обработки); $k_s = 1$ – коэффициент, учитывающий

влияние шероховатости обрабатываемой поверхности на фактическую площадь контакта.

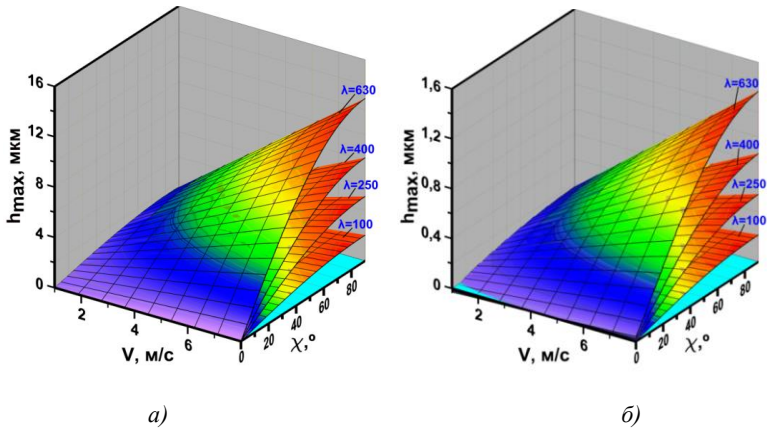


Рис. 8. Максимальные глубины внедрения зерен порошка при МАО в кольцевой ванне в условиях больших рабочих зазоров:
 а) в бронзу БрАЖ9-4 деформированную, $\sigma_{\tau} = 345$ МПа, коэффициент несущей способности контактной поверхности $c = 1$;
 б) в сталь P18 закаленную, $\sigma_{\tau} = 3,06$ ГПа, $c = 10$

Расчетные величины максимальных глубин внедрения для бронзы одного порядка с экспериментально определенными толщинами стружки 9–16 мкм.

Выводы:

1. Кромка не имеет постоянного радиуса округления на всей ее протяженности даже после заточки. Разброс значений начальных радиусов округления на стальных образцах составляет 15–25 %, а на бронзовых – 18–45 %.

2. После МАО разброс значений радиусов зависит от материала и угла наклона обрабатываемой поверхности. Для бронзовых образцов максимальный разброс остается на прежнем уровне, минимальный – уменьшается до 12 %. Для стальных образцов разброс увеличивается до 19–69 %. После МАО в режиме стекания для бронзовых образцов колебание разброса радиуса вдоль кромки – от 30 до 40 %. В режиме натекания при углах $\zeta > 45^\circ$ разброс уменьшается до 12–30 %.

3. Снятие материала на кромке происходит в основном в трех зонах:

- вершины режущей кромки срезаются в основном за счет уплотненного первичного потока под углом атаки к обрабатываемой

грани;

- материал вдоль обрабатываемой грани срезается под действием двух потоков: первичного – под углом атаки и вторичного, нарастающего и сползающего вдоль обрабатываемой грани к кромке, с уплотнением в зоне кромки;

- за вершиной режущей кромки за счет вторичных потоков и возмущений

4. Математическая модель кинематики процесса МАО кромок должна базироваться на двух основных положениях:

- движение зерна вдоль кромки не принимает участия в формировании кромки;

- форма кромки в нормальном сечении к теоретической линии кромки в заданной точке зависит от отношений проекций суммарной скорости резания на нормаль и бинормаль, и образуется как ломаная в результате пересечения траекторий перемещения частиц порошка под углами атаки, внедренных в обрабатываемые поверхности максимум на величину h_{\max} .

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. *Барон Ю.М.* Влияние состояния кромок лезвий на эффективность режущих инструментов / *Ю.М. Барон* // Инструмент и технологии. – Спб., 1997. – Вып. 5. – С. 1–11.
3. Влияние струйно-абразивной и магнитно-абразивной обработок на состояние рабочих поверхностей и режущих кромок сверл из быстрорежущей стали / *А.А. Беляев, Б.Карпушевский, Л.Г. Дюбнер* и др. // Вестн. двигателестроения. – 2007. – № 2. – С. 90–94.
4. *Гейчук В.Н.* Синтез кинематики процесса магнитно-абразивной обработки в кольцевой ванне (на укр. языке) : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.03.01 / *Гейчук Владимир Николаевич.* – К., 2012. – 472 с.
5. *Ефремов В.Д.* Технологическое обеспечение качества рабочих кромок инструмента и деталей / *В.Д. Ефремов, П.И. Яцерицын.* – Мн. : БАТУ, 1997. – 251 с.
6. *Зверовицков А.В.* Совершенствование технологии шпиндельной обработки деталей при уплотнении шлифовального материала внешним давлением : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *А.В. Зверовицков.* – Пенза, 2004. – 274 с.

7. *Зверовицков В.З.* Технологическое обеспечение качественных показателей поверхностей деталей на основе центробежной обработки дискретным шлифовальным материалом : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.08, 05.03.01 / *Зверовицков Владимир Зиновьевич.* – Пенза, 2005. – 517 с.
8. *Литвиненко В.А.* Финишная обработка фасонных поверхностей с высокими требованиями к качеству методом МАП с вращающейся рабочей зоной : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *Литвиненко Валентина Алексеевна.* – Ленинград, 1985. – 259 с.
9. Кинетика формирования кромок концевого режущего инструмента при магнитно-абразивной обработке в магнитной системе типа «кольцевая ванна» (на укр. языке) / *В.С. Майборода, В.Н. Гейчук, Е.С. Клышта* и др. // Процеси механічної обробки в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Житомир : ЖДГУ, 2009. – Вып. 7. – С. 131–160.
10. *Майборода В.С.* Кинетика формирования режущих кромок концевого инструмента при магнитно-абразивной обработке в условиях больших магнитных зазоров (на укр. языке) / *В.С. Майборода, В.Н. Гейчук, О.А. Пливак* // Надежность инструмента и оптимизация технологических систем : сб. науч. работ. – Краматорск, 2008. – Вып. 23. – С. 40–53.
11. *Мартынов А.Н.* Основы метода обработки деталей свободным абразивом, уплотненным инерционными силами / *А.Н. Мартынов.* – Саратов : Изд-во Саратовского политех. ин-та, 1981. – 212 с.
12. *Некрасов С.С.* Повышение ресурса твердосплавных концевых фрез при обработке литейных сталей аустенитного класса : дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *Некрасов Сергей Сергеевич.* – Сумы, 2012. – 167 с.
13. *Оликер В.Е.* Порошки для магнитно-абразивной обработки и износостойких покрытий / *В.Е. Оликер.* – М. : Металлургия, 1990. – 176 с.
14. *Рыбаков Ю.В.* Повышение эффективности отделочной обработки деталей типа дисков и кулачков уплотненной абразивной средой : дисс. ... канд. техн. наук : 05.02.08 / *Рыбаков Юрий Владимирович.* – Пенза, 2002. – 218 с.
15. *Сакулевич Ф.Ю.* Основы магнитно-абразивной обработки / *Ф.Ю. Сакулевич.* – Мн. : Наука и техника, 1981. – 328 с.
16. *Скворчевский Н.Я.* Эффективность магнитно-абразивной обработки / *Н.Я. Скворчевский, Э.Н. Федорович, П.И. Яцерицын.* – Мн. : Навука і техника, 1991. – 215 с.

17. *Тамаркин М.А.* Технологические основы оптимизации процессов обработки деталей свободными абразивами : дисс. ... д-ра техн. наук : 05.02.08 / *Тамаркин Михаил Аркадьевич.* – Ростов н/Д., 1995. – 310 с.
18. *Тамаркин М.А.* Математическое моделирование процессов обработки деталей поверхностным пластическим деформированием в гибких гранулированных рабочих средах / *М.А. Тамаркин, Э.Э. Тищенко* // *Инновации в машиностроении : сб. трудов II Междунар. научно-практ. конф.* – Кемерово : КузГТУ, 2011. – С. 434–438.
19. *Ульяненко Н.В.* Повышение работоспособности твердосплавного инструмента путем применения магнитно-абразивной обработки и нанесения износостойких покрытий (на укр. языке) : дисс. ... канд. техн. наук : 05.03.01 / *Н.В. Ульяненко.* – К., 2006. – 167 с.
20. *Хавин Г.Л.* Разрушение и изнашивание режущих кромок инструмента при механической обработке полимерных композиционных материалов / *Г.Л. Хавин* // *Вестник Нац. тех. ун-та «ХПИ» / Серия : Технологии в машиностроении.* – Х. : НТУ «ХПИ», 2012. – № 53 (959). – С. 66–71.
21. *Чернышева О.В.* Определение толщины смазочной пленки в зоне контакта абразивных зерен при обработке деталей уплотненным абразивом / *О.В. Чернышева, Ю.П. Перелыгин, В.А. Скрябин* // *Успехи современного естествознания.* – 2005. – № 9. – С. 13–16.
22. *Byelyayev O.* Erhöhung der Leistungsfähigkeit von HSS-Spiralbohrern durch Einsatz der magnetabrasiven Bearbeitung / *O.Byelyayev* // *Dissertation.* – Magdeburg, 2008.
23. Einige Aspekte der Schneidkantenverrundung an bohrwerkzeugen / *O.Byelyayev, D.Hoffmann, J.Pfrommer* at al. // *Науч. работы Донецкого нац. тех. ун-та ; Серия : Машиностроение и машиноведение.* – 2011. – Вып. 8 (190). – Донецк : ДонНТУ. – С. 72–77.
24. *Byrne G.* Advanced cutting technology / *G.Byrne, D.Dornfeld, B.Denkens* // *CIRP.* – 2003. – Annals 52, issue 2. – S. 483–507.
25. *Dhirendra K. Singh* Experimental investigations into forces acting during a magnetic abrasive finishing process / *Dhirendra K. Singh, V.K. Jain, V.Raghuram* // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology.* – October. – 2006. – Vol. 30, Issue 7–8. – Pp. 652–662.
26. *Jayswal S.C.* Modeling and simulation of magnetic abrasive finishing process / *S.C. Jayswal V.K. Jain P.M. Dixit* // *Int J Adv Manuf Technol* (2005) 26: 477–490 DOI 10.1007/s00170-004-2180-x.

27. *Klymov O.* Magnet-Abrasive-Bearbeitung von Werkzeugen aus WC-Hartmetall / *O.Klymov* // Dissertation. – Magdeburg, 2014.
28. *Lahmann Heinz-Wolfgang.* Anforderungen und Erfahrungen aus Sicht einer Werkzeugforschungseinrichtung / *Heinz-Wolfgang Lahmann, Petra Preiß* // XIII. Internationales Oberflächenkolloquium, 1. Treffen «Industry meets standardization and science». – IMSAS12.-14. Marz 2012, Chemnitz. – S. 87–94.
29. *Maiboroda V.* Schneidkantenmikro-Gestalt von Hartmetall-Wendeschnidplatten bei der Magnetabrasiven Bearbeitung / *V.Maiboroda, O.Byelyayev* // Forum der Schneidwerkzeug- & Schleiftechnik. – № 3, Sept. – 2012. – S. 84–91.
30. *Raghuram M.G.V.S.* Modeling of Polishing Mechanism in Magnetic Abrasive Polishing / *M.G.V.S. Raghuram Suhas S. Joshi* // The 12th International Conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG) 1–6 October, 2008, Goa, India. – Pp. 344–352.
31. *Stepien Piotr.* Micro-geometrical characteristics of the cutting edge as the intersection of two rough surfaces / *Stepien Piotr.* // *Wear.* – Vol. 269, Is. 3–4. – 18 June. – 2010.– Pp. 249–261 [Электронный ресурс]. – Режим доступа : <http://dx.doi.org/10.1016/j.wear.2010.04.005>.
32. *Tikal F.* Schneidkantenpräparation Ziele, Verfahren und Messmethoden. Berichte aus Industrie und Forschung / *F.Tikal, R.Bienemann, L.Heckmann* // Kassel University Press GmbH, Kassel. – 2009. – 193 Seiten.

ГАВРУШКЕВИЧ Андрей Юрьевич – инженер ассистент кафедры конструирования станков и машин Национального технического университета Украины «КПИ», механико-строительный институт.

Научные интересы:

- проектирование и исследование станков;
- магнитно-абразивная обработка.

ГЕЙЧУК Владимир Николаевич – профессор доктор технических наук, доцент Национального технического университета Украины «КПИ», механико-машиностроительный институт.

Научные интересы:

- проектирования станков;
- технология машиностроения;
- магнитно-абразивная обработка.

МАЙБОРОДА Виктор Станиславович – профессор, доктор технических наук, профессор кафедры интегрированных технологий в

машиностроении Национального технического университета Украины «КПИ».

Научные интересы:

- укрепление материалов;
- технология машиностроения;
- магнитно-абразивная обработка.

ДЖУЛИЙ Дмитрий Юрьевич – инженер, аспирант кафедры интегрированных технологий в машиностроении Национального технического университета Украины «КПИ», механико-машиностроительный институт.

Научные интересы:

- магнитно-абразивная обработка.

Статья поступила в редакцию 25.06.2015