

УДК 621.924.93

А. Ф. Саленко*, **В. Т. Щетинин,**

А. Н. Федотьев (г. Кременчуг)

*salenko2006@ukr.net

Повышение точности контурного гидроабразивного резания пластин из твердых сплавов и сверхтвердых материалов

Рассмотрены вопросы перспективности применения гидроабразивного резания для обработки инструментальных композитов: твердых сплавов, режущей керамики, сверхтвердых материалов на основе кубического нитрида бора. Проанализированы проблемы, сопровождающие этот процесс. Показана целесообразность использования многопроходной обработки для получения точных профильных резов твердосплавных материалов с применением изменяемой рабочей подачи. Установлены перспективные направления дальнейших исследований для получения закономерностей качества обработанной поверхности в зависимости от режимов резания, а также типа используемого абразива.

***Ключевые слова:** гидроабразивное резание, твердые сплавы, сверхтвердые материалы, точность обработки, модель процесса, многопроходная обработка.*

АКТУАЛЬНОСТЬ ИССЛЕДОВАНИЙ

Гидроабразивное резание – один из наиболее прогрессивных методов контурной обработки листовых и призматических заготовок, обеспечивающий как высокую производительность, так и практически полное отсутствие термического нагружения обрабатываемой поверхности [1]. Сущность процесса заключается в том, что в сверхзвуковую струю малого (0,12–0,25 мм) диаметра d_c вводится мелкодисперсный (фракции 25/50, 50/100, 100/200) абразив преимущественно природного происхождения. Образованная таким образом струя после перераспределения кинетической энергии между частицами и потоком воды спрямляется калибрующей трубкой диаметром $D_k = 0,6–1,2$ мм и натекает на обрабатываемую поверхность.

В настоящее время гидроабразивное резание используется для обработки различных конструкционных материалов, в том числе композитов, горных пород, строительных материалов. Как правило, этим методом выполняют контурное резание листовых или призматических заготовок; имеется опыт использования гидроабразивного резания и для выполнения крепежных элементов в изделиях из твердых сплавов, сверхтвердых материалов и керамики. Проведенные в лаборатории Кременчугского национального университета им. М. Остроградского совместно с ведущими специалистами Института сверхтвердых материалов им. В. Н. Бакуля НАН Украины исследования показали, что контурное гидроабразивное резание пластин из сверхтвердых материалов достаточно перспективно, хотя и требует поиска рациональных приемов его выполнения [2].

© А. Ф. САЛЕНКО, В. Т. ЩЕТИНИН, А. Н. ФЕДОТЬЕВ, 2014

Низкая "жесткость" струи и ее способность выборочно обтекать препятствие приводят к тому, что резание деталей толщиной, превышающей диаметр струи, сопровождается возникновением ряда дефектов, прежде всего, макро-скопического характера (рис. 1). Дефекты проявляются в виде сколов на поверхности (как со стороны натекания потока, так и с обратной стороны), а также отклонения от заданной геометрической формы, как на макро-, так и на микроуровне [3, 4]. При этом физико-механические свойства оказывают непосредственное влияние на точность обработки, и не всегда подбором режимов резания удастся достичь требуемого результата.

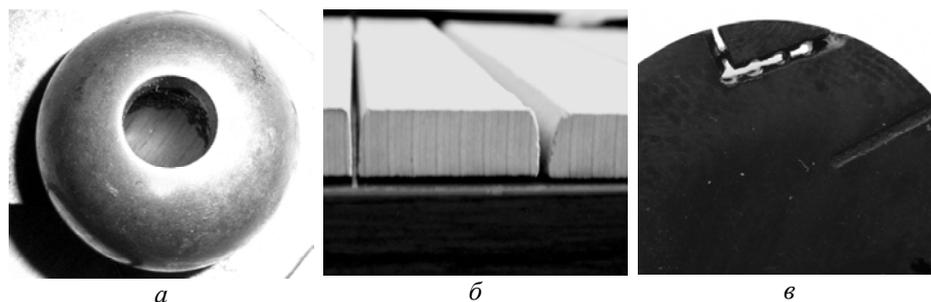


Рис. 1. Дефекты гидроабразивного резания макроскопического характера: отклонение от заданной геометрической формы при выполнении отверстия диаметром 8,2 мм в шаре из закаленной стали ШХ15 (а), отклонение от перпендикулярности кромки при контурном резании керамической пластины струей диаметром 1,25 мм (б), неполное прорезание пластинки из CBN при вырезании углового сегмента (в).

Проведенными экспериментальными исследованиями установлено, что повышение качества обработки и ее эффективности возможно при многопроходном резании, что коррелирует с результатами, полученными М. Hashish в [5, 6]. Однако остается невыясненным, существует ли закономерность между условиями натекания и движения струи относительно обрабатываемой поверхности и достижимой точностью воспроизведения контура, и каковы эти условия для обработки труднообрабатываемых высокопрочных материалов, в частности твердых сплавов.

Решение поставленной научно-технической задачи позволит более эффективно применять гидроабразивное резание для конечного формирования изделий из твердых сплавов.

Таким образом, цель работы – повышение точности воспроизведения контура при гидроабразивном резании заготовок из твердых сплавов на основе установления закономерностей формирования отклонений при многопроходной обработке.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Анализ явлений, протекающих в зоне резания, а также существующих математических описаний показал, что модели, построенные на основе энергетического баланса, могут быть использованы для прогнозирования формообразования в зоне резания.

Так, взаимодействие гидроабразивного потока с обрабатываемым материалом приводит к тому, что энергия потока E_{Σ} может превратиться в работу разрушения A_p , работу изменения A_n состояния поверхностного слоя в прилегающей области и частично рассеяться в окружающую среду в виде излучений различного вида: звуковых и электромагнитных (преимущественно в

виде тепла). Часть энергии потока E_{Π} при сквозном прорезании заготовки будет попросту потеряна вследствие того, что поток, за исключением внешней части, обращенной к фронту гидрорезания, будет просто стекать в приемный резервуар.

Таким образом, уравнение баланса энергии имеет вид

$$E_{\Sigma} = A_p + A_n + E_{\Pi}. \quad (1)$$

При этом большинство исследователей ограничиваются определением усредненных энергетических параметров потока, в частности, средней скорости на срезе калибрующей трубки v_p установившегося массового расхода абразива M_a . Однако в таком случае оценить форму и интенсивность гидроэрозии достаточно сложно. Задача решается, если кинетическую энергию струи определить как

$$E_{\Sigma} = \frac{M_{ij} v_{ij}^2}{2} - E_c, \quad (2)$$

где M_{ij} – распределение масс рабочей среды на площадке контакта струи, кг; v_{ij} – распределение скоростей движения рабочей среды в поперечном сечении, м/с; E_c – потери энергии в струе при ее формировании в калибрующей трубке, Дж, и после перейти к рассмотрению распределения масс абразивных зерен и их скоростей по сечению струи.

Потери энергии при гидроабразивном резании весьма существенны, что и приводит к низкому коэффициенту полезного действия процесса. Одновременно с этим, согласно исследованиям М. Галимзянова и С. Лепихина [7], основанным на гипотезах акад. Э. Галимова [8], в струе возможно образование областей с импульсным сверхвысоким давлением и с температурами свыше 1500–2000 К, приводящих к их свечению. Полученные авторами результаты показали, что такие области создаются не сразу за срезом канала сопла, а в промежутке между торцом калибрующей трубки и обрабатываемой поверхностью, где происходит резкое торможение струи и изменение направления ее движения, что можно наблюдать при обработке сверхтвердых материалов и твердых сплавов.

Для анализа возможных способов повышения точности воспроизведения контура при гидроабразивном резании рассматривали взаимодействие струи с преградой, представляющей собой перпендикулярно ориентированную пластинку (для случая получения начального отверстия) и наклонную полусферическую поверхность (при прорезании паза с контурной подачей).

Принято ряд допущений:

- скорости абразивных частицы жидкости в момент контакта с обрабатываемой поверхностью совпадают, поскольку калибрующая трубка уравнивает количество движения отдельных фаз и формирует единую абразивно-водяную струю;
- все частицы имеют одинаковую режуще-деформирующую способность, а их размеры примерно равны;
- потери энергии струи возникают, в основном, при преодолении сил сопротивления среды, преодолении сил трения на поверхности контакта (вследствие возникновения гидравлической “подушки”) и при турбулизации струи после ее истечения из трубки;
- работу разрушения совершают только абразивные частицы, работа водного разрушения пренебрежимо мала (вследствие высокой прочности обра-

батываемого материала T_m и относительно малых скоростей движения жидкости v_{ij}), однако создаваемое потоком нагружение может быть существенным.

В этом случае кинетическая энергия элементарного объема струи массой $dm_a + dm_b$ на выходе из калибрующей трубки составит

$$dK = \frac{dm_a + dm_b}{2} v_i^2 - (e_c + e_t), \quad (3)$$

где e_c – потери энергии на преодоление сил сопротивления среды истечения; e_t – потери энергии на преодоление гидродинамической подушки и вследствие турбулизации струи в точке ее натекания.

С учетом сформулированного Ю. Клапцовым [9] предположения о равномерности распределения абразивных частиц по всему сечению калибрующей трубки, скорость потока v_i определяется как

$$v_i \approx \bar{v} = \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b\rho} + \frac{M_a}{f_k}}, \quad (4)$$

где f_k – площадь контакта струи с преградой, $f_k = \frac{\pi d_c^2}{4}$; M_a – массовый расход абразива; p_b – давление перед струйным соплом; ρ – плотность жидкости; μ – коэффициент расхода сопла.

Принимая во внимание изменение эффективного диаметра струи в безразмерном виде по [5], снижение скорости движения элементарного объема струи относительно усредненной скорости на срезе калибрующей трубки составит

$$v_c(X_c) = C \left(\frac{L}{X_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b\rho} + \frac{M_a}{f_k}}, \quad (5)$$

где L – длина калибрующей трубки; X_c – расстояние от среза сопла до поверхности обработки, $X_c = L + \Delta$; C – коэффициент пропорциональности, который учитывает соотношение диаметров сопла и калибрующей трубки, а также расход и дисперсность применяемого абразива.

Для перехода к анализу интенсивности эрозии обрабатываемого материала по сечению струи при ее натекании на преграду воспользовались подходом прогнозирования потока масс обрабатывающей среды, предложенным в [10] и базирующимся на вероятностной модели распределения частиц по сечению потока, что позволяет оценивать не только вероятность попадания частицы на определенную площадку поверхности, но и спрогнозировать интенсивность разрушения.

Проведенные исследования распределения частиц потока по сечению струи и результаты микроэлектронного исследования показали, что наиболее адекватно вероятность попадания частицы на поверхность описывает композиционный закон распределения:

$$f(x, y) = \frac{1}{2\lambda\sigma_x\sigma_y} \left[F\left(\frac{x-a_0}{\sigma_0}\right) - F\left(\frac{x-a_0-2\lambda_a\sigma_0}{\sigma_0}\right) \right] \left[F\left(\frac{y-a_0}{\sigma_0}\right) - F\left(\frac{y-a_0-2\lambda_a\sigma_0}{\sigma_0}\right) \right], \quad (6)$$

где a_0 – центр рассеивания (математическое ожидание) приложения струйно-го воздействия; σ_x, σ_y – среднеквадратические отклонения; x, y – текущие координаты относительно центра воздействия.

Тогда поток массы рабочей среды, попавший на поверхность площадью f за определенный промежуток времени t для случая перпендикулярного расположения поверхности обработки определится как

$$M_c = \frac{f}{(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)} \int_0^t M_a P(D(x, y)) dt, \quad (7)$$

где $P(D(x, y)) = \int_{x_i}^{x_{i+1}} \int_{y_i}^{y_{i+1}} f(x, y) dx dy$ – вероятность попадания частицы абразива на площадку контакта (рис. 2); M_a – массовый расход абразива при условии,

что только абразивные зерна выполняют работу разрушения.

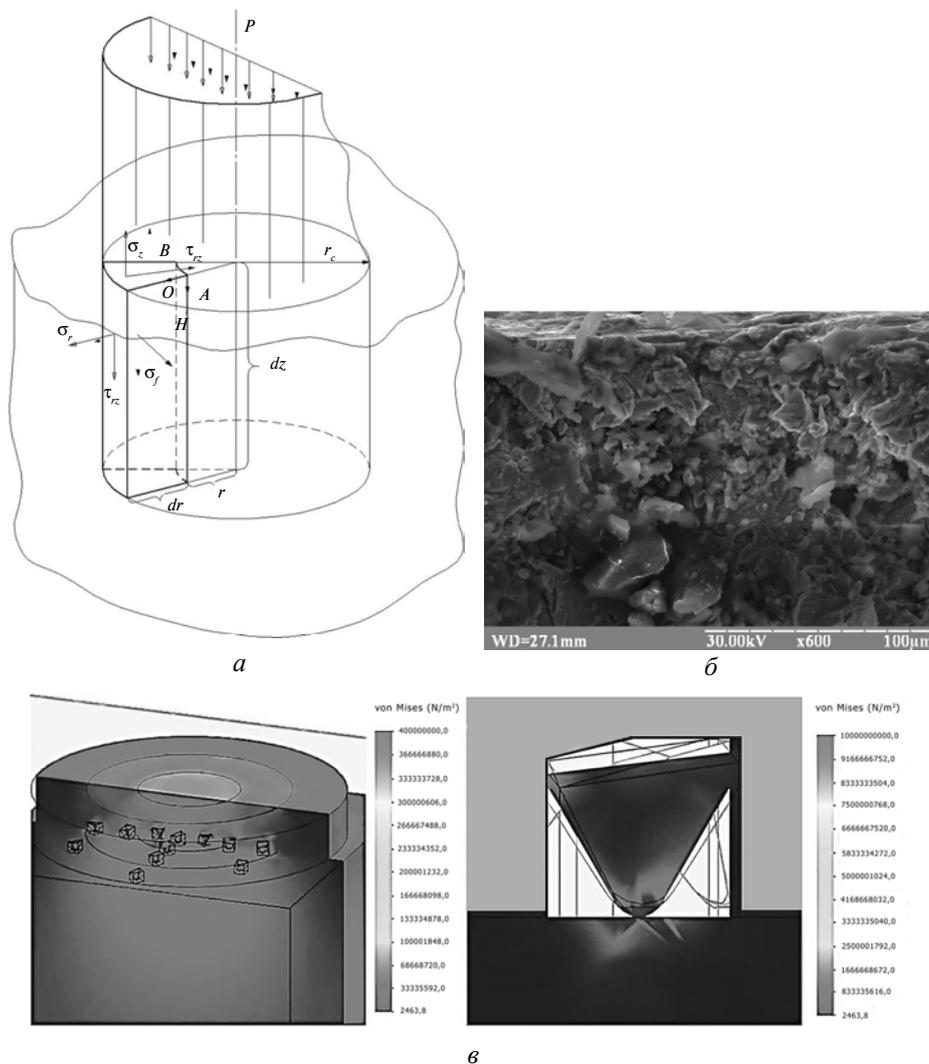


Рис. 2. Схема воздействия струйно-абразивного потока на обрабатываемую площадку D (а), микроскопический снимок поверхности, подверженной гидроабразивному воздействию (б), и результат моделирования взаимодействия частиц с поверхностью (б).

Особенность резания твердых и сверхтвердых материалов заключается в том, что физико-механические характеристики абразивного и обрабатываемого материалов сопоставимы. Более того, предел прочности $\sigma_{и}$ при изгибе режущих частиц меньше в 1,5–2 раза по сравнению с обрабатываемым материалом. В то же время натекающие на поверхность частицы способны вызывать локальные высокоинтенсивные нагружения, приводящие к некоторым упруго-пластическим макродеформациям сжатия в локальных объемах поверхностного слоя. Эти нагрузки воспринимает в основном карбидный скелет (для сплавов с содержанием кобальта по массе $\sim 10\%$). Дальнейшее подхватывание абразивной частицы потоком жидкости приводит к снятию нагрузки сжатия, частичному упругому восстановлению деформированного объема поверхностного слоя, т. е. к появлению в этом локальном объеме растягивающих напряжений, что приводит к перераспределению напряжений между составляющими структуры твердого сплава. При этом сначала разрушается граница зерен карбидов, что ведет к появлению микротрещин в самих зернах карбидов твердого сплава и пластической деформации по дислокационному механизму кобальтовой связки [11]. Далее происходит разрушение границы карбидов со связкой и самой связки (см. рис. 2, а). Таким механизмом можно объяснить появление начальных лунок при прошивании исследуемых образцов.

Для оценки напряженно-деформированного состояния поверхности обработки при натекании струи определили составляющие перемещений $U(t)$ и $H(t)$ в определенной точке, составив расчетную схему (см. рис. 2, б). Эти перемещения легко получить из уравнений, связывающих напряжения и деформации:

$$\begin{aligned}\sigma_r &= 2G \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \sigma_t &= 2G \left(\frac{U}{r} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \sigma_z &= 2G \left(\frac{\partial H}{\partial z} + \frac{\mu \varepsilon}{1-2\mu} \right); \\ \tau &= G \left(\frac{\partial U}{\partial r} + \frac{\partial H}{\partial z} \right).\end{aligned}\tag{8}$$

Тогда

$$U(t) = -\frac{(1-2\nu)p_b(t) \left[\frac{D_k}{2} \right]^2}{4G}, \quad 0 < \frac{D_i}{2} < \frac{D_k}{2};\tag{9}$$

$$H(t) = -\frac{(1-2\nu)p_b(t)D_k}{2G}\tag{10}$$

при условии, что

$$\varepsilon = \varepsilon_r + \varepsilon_t + \varepsilon_z = \frac{\partial U}{\partial r} + \frac{U}{r} + \frac{\partial H}{\partial z}, \quad \varepsilon = \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)G} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z) = \frac{1-2\nu}{E} (\sigma_r + \sigma_t + \sigma_z);$$

$$\begin{cases} (1-2\nu)\left[\Delta U - \frac{U}{r^2}\right] + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0; \\ (1-2\nu)\Delta U + \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} = 0. \end{cases}$$

Здесь G – модуль сдвига обрабатываемого материала; μ – его коэффициент Пуассона; ε – объемная деформация; $\Delta = \frac{d^2}{dr^2} + \frac{d}{rdr} + \frac{d^2}{dz^2}$ – оператор Лапласа; D_k – диаметр калибрующей трубки.

Результатами виртуального эксперимента (см. рис. 2, в), проведенного в компьютерной лаборатории кафедры ПОМФТО КрНУ, установлено, что величины напряжений, возникающих в зоне контакта струи с поверхностью твердого сплава и сверхтвердых синтетических материалов при гидроабразивном резании, значительны; своего максимума они достигают в точках контакта с абразивными зернами и при взаимодействии должно происходить разрушение зерен с полидеформационным повреждением поверхности. Такое явление характерно в условиях натекания гидроабразивной струи под углами, близкими к нормальным (т. е. в случае, когда сквозного прорезания нет и частицы бомбардируют поверхность, вызывая отдельные микродеформации и активизируя зарождение и развитие начальных микродефектов). Разрушение материала, зарождение и развитие лунки при гидроабразивном резании возможно и путем микрорезания, однако в этом случае дефекты поверхности, обусловленные начальным упругим деформированием в точке удара частицы, возможны только при изменении вектора движения частицы, т. е. при ее касательном перемещении.

Тогда, при условии, что частицы двигаются под малыми углами атаки потоком, определяемым (7), объем удаленного за время t материала в первом приближении будет представлять собой микрориски с профилем близким к цилиндрическому, со скруглением в начале и в конце бороздки, и составит

$$W_p = \left(\frac{\pi \delta_r^2 (3r - \delta_r)}{3} + \sqrt{r^2 - (r - \delta_r)^2} \delta_d \delta_r \right) \frac{M_c}{m}, \quad (11)$$

где r – радиус абразивной частицы; m – ее масса; δ_r , δ_d – глубина и длина лунки соответственно.

Глубина и длина лунки как функции параметров процесса обработки могут быть определены на основе закономерностей, предложенных В. Б. Струтинским и Е. Ф. Мануэлом и уточненных А. Фомовской при микроэлектронном исследовании [12]:

$$\delta_r = \frac{m \left(C \left(\frac{L}{X_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_b}{\sqrt{2p_b \rho} + \frac{M_a}{f_k}} \right)^2 \sin \varepsilon}{2 k_n z_a H_V}; \quad (12)$$

$$\delta_{\text{д}} = \frac{m \left(C \left(\frac{L}{X_c} \right)^{\frac{4}{3}} \frac{2\mu p_{\text{в}}}{\sqrt{2 p_{\text{в}} \rho} + \frac{M_a}{f_k}} \right)^2 \cos \varepsilon}{2} \frac{z_a}{k_a \sigma_b} - \frac{k_a T_p^2 \sigma_b Ra}{2mz_a},$$

где Ra , H_V , σ_b – параметры шероховатости, твердости и прочности поверхности обрабатываемого материала соответственно; z_a – зернистость абразивных частиц; T_p – постоянная, учитывающая инерционность процесса микрорезания; k_n , k_a – постоянные коэффициенты; ε – угол набегания частицы на обрабатываемую поверхность.

Однако проведенные расчеты показали, что определяемая по последним зависимостям интенсивность разрушения соответствует экспериментальным результатам только при углах натекания не превышающих $\pi/12$. При больших углах ошибка расчетов растет и достигает 60 % при приближении к углам в $\pi/3$. Причина этого кроется в том, что при обработке твердых сплавов для оценки влияния характеристик прочности на производительность процесса целесообразнее использовать показатель интенсивности напряжений K_{Ic} , принципиальным преимуществом которого по сравнению с другими характеристиками предельной прочности является то, что вязкость разрушения учитывает и длину трещины. Любой критерий разрушения, выраженный через напряжение, предполагает, что разрушение происходит мгновенно по достижению этого напряжения. На самом деле всякое разрушение – это результат развития трещины, поэтому характеристика предельной способности к торможению разрушения должна включать не только напряжение, но и длину трещины.

Из [13] величина критического напряжения σ_b составляет

$$\sigma_b = \frac{K_{\text{Ic}}}{\sqrt{\pi l_{\text{T}}}}, \quad (13)$$

где l_{T} – критическая длина трещины.

Как известно [14], минимальная критическая длина трещины связана с размером частицы, в которой может разместиться эта трещина, т. е.

$$l_{\text{T}} = \frac{0,06bE^2}{\sigma_t^2(1-\mu) \left\{ 1 + 0,4(1+\mu) \ln \left[\frac{76(1-\mu^2)\sigma_t}{E} \right] \right\}}, \quad (14)$$

где E – модуль упругости; b – вектор Бюргерса; σ_t – предел текучести.

Таким образом, при углах атаки близких к $\pi/3$ и меньших зависимость размера лунки в функции параметров процесса обработки и физико-механических характеристик обрабатываемого материала (11) приобретает следующий вид:

$$W_{\text{пр}} = \left(\frac{\pi \delta_r^2 (3r - \delta_r)}{3} + \sqrt{r^2 - (r - \delta_r)^2} \delta_r l_{\text{T}} \right) \frac{M_c}{m}, \quad \sigma_r > \sigma_b.$$

Это дает возможность также учесть зависимость показателя интенсивности напряжений K_{lc} от скорости нагружения (4), температуры в зоне резания, что позволяет получить более точные результаты расчета. При этом распределение потока масс для случая неполного многопроходного резания при перпендикулярном натекании струи на каждой элементарной площадке размерами $(x_{i+1} - x_i) \times (y_{i+1} - y_i)$ определили как

$$M_l = \frac{\pi D_k^2}{4(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)} M_a \int_0^t \int_{x_i(t)}^{x_{i+1}(t)} \int_{y_i(t)}^{y_{i+1}(t)} f(x, y) dx dy dt, \quad (15)$$

а для случая прорезания пластинки толщиной h с получением начального полного паза – соответственно

$$M_l = \frac{2Rh \sin(\epsilon)}{(x_{i+1} - x_i)(y_{i+1} - y_i)} M_a \int_0^t \int_{x_i(t)}^{x_{i+1}(t)} \int_{y_i(t)}^{y_{i+1}(t)} f(x, y) dx dy dt. \quad (16)$$

Анализ представленных соотношений показывает, что, зная закон распределения потока масс, т. е. определив параметры выражения (6), несложно установить интенсивность разрушения поверхности на каждой элементарной площадке в месте натекания струи, полагая при этом, что входящий в (12) параметр шероховатости Ra для случая перпендикулярного натекания струи есть не что иное как микровдавливание поверхности H в момент контакта с абразивной частицей. Этот механизм отличается от механизма взаимодействия с упруго-пластическими телами, в частности с конструкционными и легированными сталями, для которых характерно смятие материала при ударе, четко наблюдаемое при микроэлектронных исследованиях (рис. 3). Такое многократное смятие приводит к фрикционно-механическим повреждениям поверхности и разрушению с уносом стружки, и роль механизма микрорезания существенно снижается. Тем самым становится понятным значительное повышение производительности процесса.

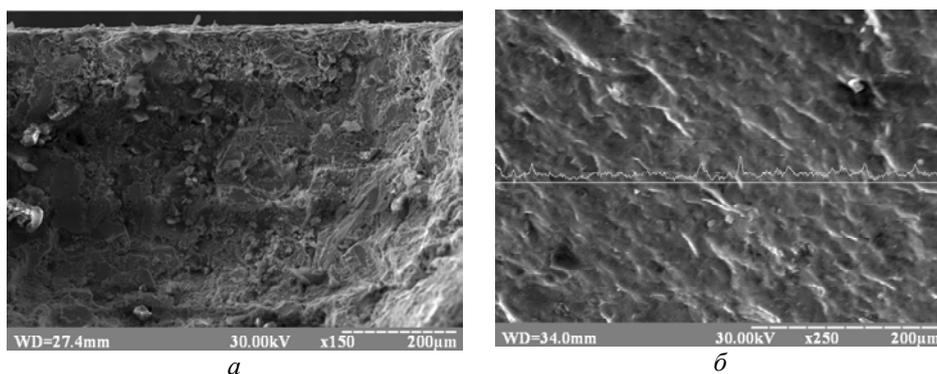


Рис. 3. Поверхности стали 45 (а) и твердого сплава группы ТК (б) в точке воздействия гидроабразивного потока.

Основываясь на приведенных закономерностях и приняв во внимание, что разрушение материала с уносом микростружки происходит при касательном ударе абразивных частиц, была разработана программа визуализации бороздки реза для среды MathCad, позволяющая оценить интенсивность съема материала в виде чередующихся фаз карбидных частиц и кобальтовой связки

в зависимости от скорости линейной подачи при условии, что толщина обрабатываемой пластинки намного превышает глубину проникновения струи. Для оценки направления и скорости потока после его натекания на преграду выполнено его моделирование средствами FlowVision. При этом модель лунки на предыдущей итерации использовали для определения распределения скоростей в потоке для расчета интенсивности съема материала на итерации текущей, а перестроенный профиль вновь вводили в FlowVision и определяли эпюры скоростей.

Изучение картин повреждения материала и формирования лунки при микрорезании показало следующее (рис. 4):

- скорость проникновения струи в обрабатываемый материал непостоянна, она сначала имеет тенденцию к увеличению, а впоследствии к снижению; при получении глубоких (в несколько диаметров D_k струи) глухих отверстий возможно полное прекращение процесса резания вследствие уменьшения $U(t)$ и $H(t)$ и резкого возрастания потерь e_c (см. рис. 4, а);

- формирование начальной канавки для отвода жидкости при сообщении струе движения подачи значительно повышает объемный съем материала и не приводит к снижению этого показателя при получении канавки (см. рис. 4, б); очевидно, этому способствует то, что разрушение материала выполняется не только потоком, который стекает по поверхности, но и периферийной частью струи, в которой скорости движения частиц намного выше; таким образом, многопроходное резание является эффективным и более целесообразным, чем однопроходное;

- наличие на обрабатываемой поверхности зон повышенной твердости (обусловленных, например, аномальным количеством кобальтовой связки) приводит к отклонению струи от гипотетического направления движения при заданных условиях ее перемещения. При этом чем больше скорость линейной подачи, тем большим будет отклонение струи; снижение энергетических параметров струи при увеличении глубины канавки вызывает большее отклонение. Очевиден вывод: скорость подачи при многопроходном резании должна быть переменной, более высокой в начальный момент процесса с уменьшением по мере развития лунки.

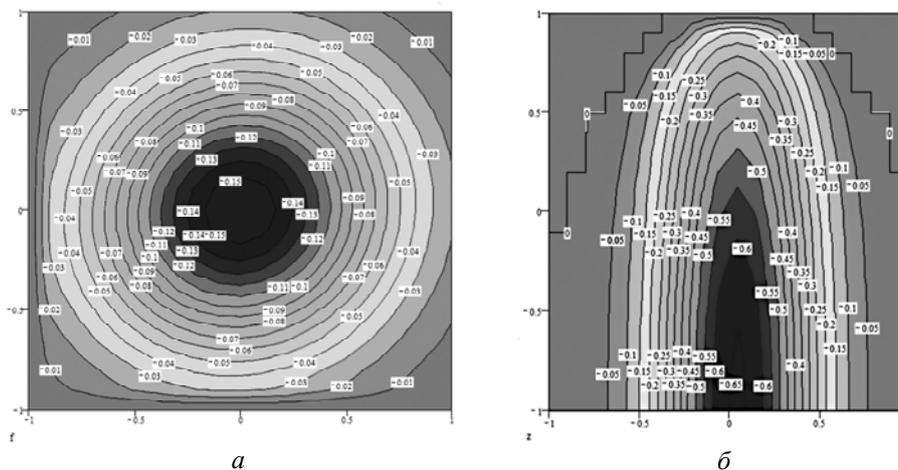


Рис. 4. Результаты моделирования развития лунки в условиях гидроабразивного резания при неподвижной головке (а) и при сообщении струе движения подачи (б).

Результаты моделирования были проверены при выполнении отверстий в заготовках из твердого сплава группы ТК. Отверстие выполняли на лазерно-струйном комплексе ЛСК-400-5, оснащенный струйно-абразивной головкой с водяным соплом ($d_c = 0,22$ мм) и калибрующей трубкой ($D_k = 1,05$ мм). Обработывали пластинку Т5К10 толщиной 7 мм, прорезывая отверстие диаметром $D_0 = 5,0 \pm 0,025$ мм. В качестве абразива использовали гранатовый песок фракцией 50/100 мкм. Расход абразива был 0,5 кг/мин, давление жидкости $p_b = 250$ МПа.

В результате было получено несколько отверстий как с постоянной скоростью обхода контура ($s_k = 300$ мм/мин), так и с переменной (от $s_{k0} = 300$ мм/мин до $s_{k1} = 100$ мм/мин).

Измерения полученного отверстия показали, что многопроходное получение отверстий является не только более эффективным, а и препятствует образованию ряда дефектов, в первую очередь макрогеометрического характера. При этом работа с постоянной скоростью привела к существенному искажению контура на выходе струи (т. е. к неисправимому браку), в то время как варьирование скорости, несмотря на увеличение времени обработки, позволило получить для пластинки толщиной 7 мм отклонение от круглости на выходе в пределах 0,4 мм.

Таким образом, для получения точных профильных резов твердосплавных материалов целесообразно использование многопроходной обработки с переменной рабочей подачей, преводящей к значительному уменьшению отклонения струи от предполагаемой формы. При этом установлено, что снижение скорости обхода контура должно быть пропорционально толщине обрабатываемого материала и его физико-механическим характеристикам.

Дальнейшие исследования должны быть направлены на установление закономерностей качества обрабатываемой поверхности в зависимости от режимов обработки, а также типа используемого абразива; целесообразным также является разработка физической и математической моделей взаимодействия гидроабразивной струи со сверхтвердыми материалами, поскольку их структура и физико-механические свойства принципиально отличаются от исследованных нами материалов. Построение такой модели позволит предложить эффективные методы струйной обработки как универсального и эффективного способа формирования готовых изделий.

Розглянуто питання перспективності застосування гідроабразивного різання для обробки інструментальних композитів: твердих сплавів, ріжучої кераміки, надтвердих матеріалів на основі кубічного нітриду бору. Проаналізовано проблеми, що супроводжують цей процес. Показано доцільність використання багатопрохідної обробки для отримання точних профільних різів твердосплавних матеріалів із застосуванням змінної робочої подачі. Встановлено перспективні напрямки подальших досліджень для отримання закономірностей якості поверхні, що оброблюють, в залежності від режимів різання, а також типу використовуваного абразиву.

Ключові слова: гідроабразивне різання, тверді сплави, надтверді матеріали, точність обробки, модель процесу, багатопрохідна обробка.

The article deals with the study of the prospects of hydro-abrasive cutting application for processing tools composites: carbide, cutting ceramics, super hard materials on the basis of cubic boron nitride. The problems accompanied this process have been analyzed. The appropriateness of the multi-processing use for obtaining the accurate profile cuts of carbide materials with the variable labour supply has been shown. The perspective directions for further research for obtaining the patterns of relationship of obtained surface quality depending on the processing modes and type of the used abrasive have been determined.

Keywords: *hydro-abrasive cutting, tool composites, superhard materials, precision of processing, model of process, multi-cut processing.*

1. Brenner V., Powell R., Louis H., Pushkarev A. Determination of the criterion of rock resistance to hydro-mechanical and hydro-abrasive cutting // Proc. Int. Symp. on New Applications of Water Jet Technology., Ishinomaki, Japan, 19–21 Oct., 1999. – Ishinomaki Senshu University, 1999. – P. 399–405.
2. Бурькин В. В. Гидроабразивная резка поликристаллов кубического нитрида бора инструментального назначения // Инструментальный світ. – № 2 (54). – С. 25–33.
3. Фомовская Е. В. Качество обработки материалов гидроабразивной струей // Оборудование и инструмент. – 2009. – № 1. – С. 16–19.
4. David A., Summers D. Waterjetting Technology. – Oxford, USA: Printed in Great Britain by the Alden Press, 1995. – 882 p.
5. Hashish M. The water jet as a tool // 14th Int. Conf. on Jetting Technology. Brugge, Belgium, 21–23 Sept., 1998. – BHR Group Conf. Ser. Publ. – 1998. – N 32. – P. 1–14.
6. Hashish M. Cutting with abrasive waterjets // Mechanical Engineering. – 1984. – **106**, January. – P. 60–96.
7. Galimzyanov M., Lepikhin S. The outflow of the two-phase mixture through the nozzle with phase transitions // Вестн. СамГУ. Естественно научная серия. Механика. – 2010. – № 2 (76). – С. 56–64.
8. Галимов Э. М., Кудин А. М., Скоробогатский В. Н. и др. Экспериментальное подтверждение синтеза алмаза в процессе кавитации // Докл. РАН. – 2004. – **395**, № 2. – С. 187–191.
9. Кланцов Ю. В., Петко И. В., Панасюк И. В. До питання взаємодії гідроабразивного струменя з матеріалом, що розрізається // Вісн. КНУДТ. – № 6. – Київ: КНУДТ, 2006. – С. 54–62.
10. Стоцько З. А., Стефанович Т. О. Математична модель розподілу маси речовини в струмені розпилення при струменевій обробці поверхонь незв'язаними твердими тілами // Вісн. Національного ун-ту “Львівська політехніка”: Оптимізація виробничих процесів і технічний контроль у машинобудуванні та приладобудуванні. – 2005. – № 535. – С. 39–44.
11. Лошак М. Г. Прочность и долговечность твердых сплавов. – К.: Наук. думка, 1984. – 328 с.
12. Фомовська О. В. Візуалізація формоутворення при гідроабразивному різанні на основі енергетичних моделей руйнування // Вісн. КДПУ ім. М. Остроградського. – Кременчук: КДПУ, 2009. – Вип. 2, ч. 1. – С. 27–31.
13. Колесников Ю. В., Морозов Е. М. Механика контактного разрушения. – М.: Наука, 1989. – 219 с.
14. Бондаренко В. П., Павлоцкая Э. Г. Спекание вольфрамовых твердых сплавов в прецизионно контролируемой газовой среде. – К.: Наук. думка, 1995. – 204 с.

Кременчугский национальный ун-т
им. Михаила Остроградского

Поступила 18.03.14