

5. Армарего И.Дж.А. Р.Х. Браун. Обработка металлов резанием М.: Машиностроение, 1977. – 325 с.
6. Daishowa seiki co., ltd. fa Dept. catalog № 52, 1998.
7. Скицюк В.І., Ковальчук О.П. Патент на корисну модель № 59356, Україна, МПК G08B 21/00, G01B7/008. Пристрій контролю торкання різального інструмента поверхні деталі при токарній обробці. Заявл. 05.11.2010. Опубл. 10.05.2011.

*Надійшла 01.06.12*

УДК 621.924.093

**В. В. Бурыкин**, канд. техн. наук

*Институт сверхтвердых материалов им. В.Н. Бакуля НАН Украины, г. Киев*

### **ОПЫТ ГИДРОАБРАЗИВНОГО РАЗРЕЗАНИЯ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОЛИКРИСТАЛЛОВ НА ОСНОВЕ КУБИЧЕСКОГО НИТРИДА БОРА ДЛЯ РЕЖУЩИХ ЭЛЕМЕНТОВ ЛЕЗВИЙНОГО ИНСТРУМЕНТА**

*Рассмотрен опыт резания заготовок из ПКНБ гидроабразивной струей. Приведены результаты металлографических исследований и влияния технологических факторов гидроабразивной обработки на шероховатость поверхности реза. Изготовлены опытные пластины для металлорежущего инструмента.*

**Ключевые слова:** *гидроабразивное резание, шероховатость поверхности.*

Развитие технологии машиностроения существенно зависит от технического уровня инструментального производства. Требования к инструменту постоянно повышаются, так как с развитием техники появляются изделия из новых материалов высокой твердости и прочности. Основным условием производства высококачественного и долговечного инструмента является выбор инструментального материала, соответствующего назначению и возникающим нагрузкам при эксплуатации.

Особый интерес относительно эффективности применения в промышленности представляет инструмент, оснащенный режущими пластинами из поликристаллов на основе кубического нитрида бора (ПКНБ). Эти поликристаллы обладают высокой твердостью, прочностью, износостойкостью, теплопроводностью, стабильностью физических свойств и структуры при температуре до 1100 °С.

Оснащенные ПКНБ режущие инструменты обрабатывают материалы из закаленных сталей, высокопрочных и отбеленных чугунов, износостойких наплавленных и напыленных покрытий твердостью до 60–65 HRC и позволяют получать обработанную поверхность шероховатостью Ra 0,2–1,0 при высокой производительности.

Долговечность инструмента зависит не только от свойств материала режущих элементов, определяемых технологией изготовления, но и в значительной степени от свойств их поверхностного слоя. Простые по конструкции режущие пластины оказались весьма чувствительны к условиям обработки, что приводит к повышенным затратам на их эксплуатацию из-за выкрашиваний и поломок режущего лезвия. В этой связи качество поверхностного слоя инструмента зависит, прежде всего, от технологии формообразования профиля режущего лезвия и его финишной обработки. Создание эффективной технологии режущего инструмента из сверхтвердых материалов, которая позволит интенсифицировать процесс разрезания заготовок, является первоочередной задачей машиностроительного комплекса.

Высокая твердость и низкая термостойкость ПКНБ препятствуют качественной обработке рабочих поверхностей режущего инструмента. Ее роль в обеспечении эксплуатационных свойств обрабатываемых изделий постоянно повышается, что способствует наряду с широким применением традиционных методов обработки по сложному контуру с использованием механических методов, энергии ультразвука, плазмы, лазера и др., появлению и развитию технологии гидроабразивного воздействия. Технология гидроабразивной обработки материалов основана на разрушающем действии струи воды, смешанной с абразивным порошком (гарнетом). Гарнет с водой, проходя через отверстие диаметром 0,2–0,3 мм под давлением  $p = 300\text{--}800$  МПа, способен резать любые материалы различной твердости. В связи с изложенным реализация этой задачи при гидроабразивной обработке режущих пластин позволит улучшить эксплуатационные свойства инструментов и повысить качество обрабатываемых изделий.

#### **Анализ предыдущих исследований**

Для резания ПКНБ использование алмазных отрезных и шлифовальных кругов неэффективно из-за больших потерь дорогостоящего материала [1], в связи с чем для раскроя поликристаллических пластин из листа толщиной до 5 мм применяют лазерное резание [2; 3]. Однако, материалы из которых изготовлены пластины, при лазерном резании подвергаются температурному воздействию, что в большинстве случаев способствует ухудшению физико-химических свойств поверхностного слоя (появлению оплавления, пригара материала), накоплению внутренних остаточных напряжений и разрушению кромок обрабатываемых материалов. При этом накопленные внутренние повреждения могут проявиться только в процессе эксплуатации.

Гидроабразивное резание (ГАР) благодаря большим возможностям может стать альтернативой традиционным методам разрезания пластин из ПКНБ [4]. Однако высокая твердость обрабатываемого материала приводит к тому, что гидроабразивная струя искривляется и растекается в стороны (наблюдается локальное уведение струи, образуются завихрения, препятствующие сквозному прорезанию пластины). Для обеспечения устойчивости процесса резания материалов гидроабразивной струей скорость рабочей подачи должна быть минимальной [5]. Это накладывает существенные ограничения на производительность процесса и против ожидаемого снижает качество обработанной поверхности.

Цель работы – оценить возможность применения технологического процесса гидроабразивного резания заготовок из ПКНБ и пути обеспечения качества обрабатываемой поверхности.

#### **Материал и результаты исследования**

В качестве заготовок использовали пластины из ПКНБ твердостью 38–40 ГПа, диаметром 12,7–25,4 мм и толщиной 3,97–5,56 мм, которые крепили в приспособлении на столе гидроабразивной установки модели WJ3015B-1Z-DPJ. Гидрорезание осуществляли в таком режиме: давление технологической среды  $p = 300\text{--}600$  МПа; скорость контурной подачи  $v_s = 1\text{--}3$  мм/мин; массовый расход абразива  $m_a = 0,5\text{--}1,0$  кг/мин; диаметр калибрующей трубки  $d_{tr} = 1,1$  мм. Этим обеспечивалось течение жидкости из калибрующей трубки со скоростью более 350 м/с. В качестве абразивов использовали натуральный природный материал – гранатовый песок марки «garnet mesh 80» со средним размером зерна 0,180 мм, твердостью 8 по шкале Мосса и карбид кремния

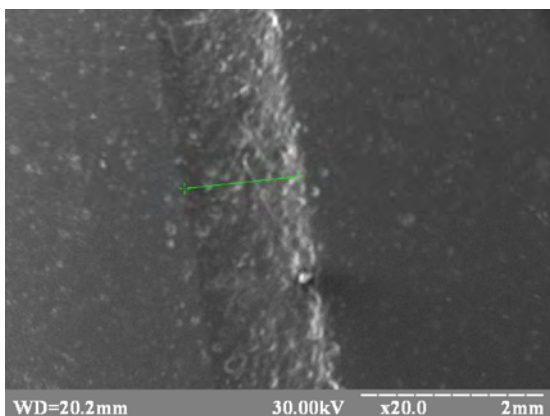


Рис. 1. След на поверхности образца после гидроабразивной обработки

твердостью 9 по шкале Мосса, которые подавали из бункера подачи абразива. Преимущество указанных абразивов заключается в том, что они обладают высокой режущей способностью благодаря достаточному количеству острых граней на каждой частице и относительно высокой твердости.

Было установлено, что при скорости контурной подачи 10–12 мм/мин на поверхности заготовки остается лишь след (рис. 1), при скорости 4–6 мм/мин – неравномерный по

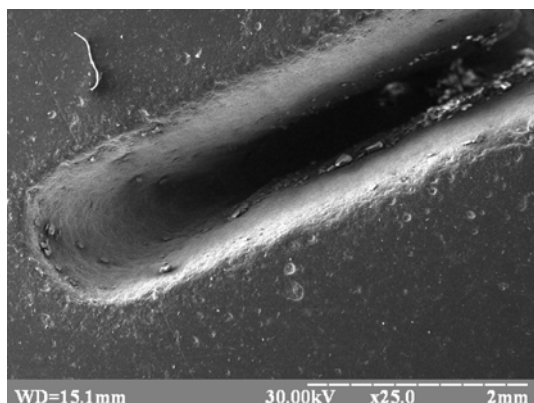


Рис. 2. Форма реза на образце от гидроабразивной струи



Рис. 3. Свечение, наблюдаемое между срезом калибрующей трубки и поверхностью обработки

глубине небольшой прорез, больший к кромке и меньший к телу заготовки (рис. 2). Кроме того, было отмечено яркое свечение тела струи, наблюдающееся между срезом калибрующей трубы и поверхностью обработки. При этом в зоне резания начиналось обильное паровыделение, что свидетельствовало о резком повышении температуры в точке контакта (рис. 3).

Гидроабразивное резание, как и другие виды обработки материалов резанием, базируется на управляемом процессе микроразрушения, который обеспечивает получение деталей заданной формы, размеров и качества.

Абразивные зерна при ударе внедряются в поверхность поликристалла на значительную глубину и оставляют на ней различимые отпечатки. Это происходит при динамическом воздействии абразивных зерен на обрабатываемую поверхность. Так как абразивные зерна соударяются с контактирующей поверхностью с постоянной скоростью, процесс следует рассматривать как незатухающий из-за диссипации энергии, а обуславливающую микроразрушение, систему – непрерывно подгружаемую.

Каждое внедрившееся зерно имеет единичный срез, а в сумме зерна составляют общую площадь среза. Однако зона повреждаемости этим не ограничивается, поскольку рассматриваемые материалы проявляют хрупкую природу разрушения. Локальное микроразрушение при резании достигается созданием значительных местных напряжений вследствие резкого уменьшения площади нагруженного сечения, которое создается при соударении острых микроворшин абразивных зерен с ПКНБ. Из-за большого модуля упругости ПКНБ пятна контакта соударяющихся тел оказываются малы. Следовательно, в процессе ГАР под влиянием высокой сосредоточенности динамической нагрузки создаются значительные локальные напряжения. Изменяя характеристики процесса гидрорезания, можно в широком диапазоне изменять интенсивность разрушающего механического воздействия на поликристалл в условиях резания. Однако, при этом абразив полностью разрушается.

В результате динамического характера приложения нагрузки появляется еще один разрушающий фактор. При соударении твердых тел с большой скоростью возникают ударные продольные, поперечные и поверхностные волны Релея [6]. Роль распространения, отражения и взаимодействия волн важна тогда, когда при соударении тела мало деформируются, а контактное разрушение незначительно. Именно таковым является соударение абразива с телом

из сверхтвердого материала. Имея ковалентные связи между атомами кристаллической решетки, эти материалы при низкой температуре характеризуются мизерностью подвижности дислокаций. Следовательно, диссипация энергии соударения вследствие неощутимой пластической деформации окажется низкой. Этим объясняется возможная значительная роль волновых процессов в микроразрушении ПКНБ при ГАР. Если порождаемый соударением импульс напряжения сжатия направлен нормально к границе двух сред с различными упругими свойствами и плотностью, от свободной границы он отражается в форме импульса растяжения, от несвободной – в виде импульса сжатия. Применительно к ПКНБ волны напряжения (первичные и отраженные) в зависимости от нагрузки, скорости ее приложения и количества циклов могут способствовать распространению трещин. В этой связи волновые процессы также необходимо рассматривать как важный фактор интенсификации микроразрушения ПКНБ при гидрорезании. Таким образом, резание поликристаллов подтверждает преимущественную роль механизмов хрупкого микроразрушения ПКНБ. Важной особенностью этого взаимодействия является интенсивное разрушение абразивных зерен при соударении с поверхностью ПКНБ.

Металлографический контроль полученной поверхности реза осуществляли с помощью электронного растрового микроскопа РЕМ-106И путем изучения ее топографии. Результаты исследования обработанной поверхности поликристаллических образцов показали отсутствие трещин в верхней части (рис. 4) и сформированные гидроабразивной струей бороздки (рис. 5). Их характер, поперечный и продольный микропрофили позволяют утверждать, что поверхность этих материалов также формируется в результате хрупкого разрушения путем растрескивания и скалывания микроблоков.

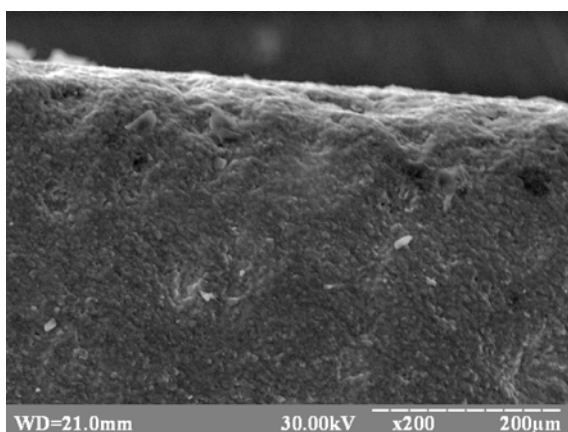


Рис. 4. Микрофотография поверхностного слоя

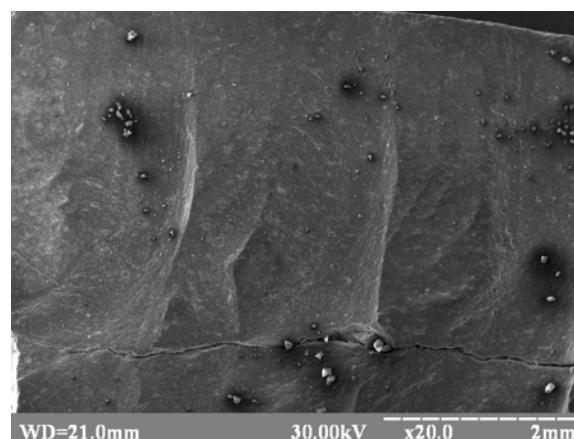


Рис. 5. Микрофотография поверхности с бороздками после ГАР

На обработанной поверхности ПКНБ наблюдаются следы пластической деформации в виде гладких полос, ширина и длина которых соизмеримы с аналогичными параметрами борозд. Однако это не противоречит утверждению о преимущественном хрупком первичном разрушении этих материалов. Можно предположить, что наличие следов пластической деформации на поверхности обработанных ПКНБ обусловлено не пластическим выдавливанием материала, а выглаживанием тончайшего слоя, нагреваемого под действием трения при определенных сочетаниях геометрии зерна и глубины внедрения.

Высокая интенсивность ГАР обусловлена большей глубиной внедрения зерен струи в обрабатываемый ПКНБ. Это, в свою очередь, вызывает повышение сил резания из-за увеличения площади единичного среза и большой абсолютный износ абразива в результате удара об обрабатываемую поверхность.

В то же время результаты оценки состояния поверхности с помощью энергодисперсионного рентгеновского микроанализатора свидетельствуют о наличии в поверхностном слое частиц абразива, оставшихся после гидроабразивного резания (рис. 6), кинетической энергии которых не хватило для преодоления сил сопротивления движению при микрорезании. Присутствуют и другие дефекты, в частности, искажение контура реза

заготовки, обусловленное выбегом режущей струи при ее повороте на  $90^\circ$  (рис. 7). Кроме того, результаты рентгеновского микроанализа поверхности реза показали отсутствие искажений кристаллической решетки материала. В этой связи можно предположить, что непосредственно струя осуществляет не только теплоотвод, но и играет роль теплового компенсатора, не позволяя температуре в зоне резания превышать допустимую.

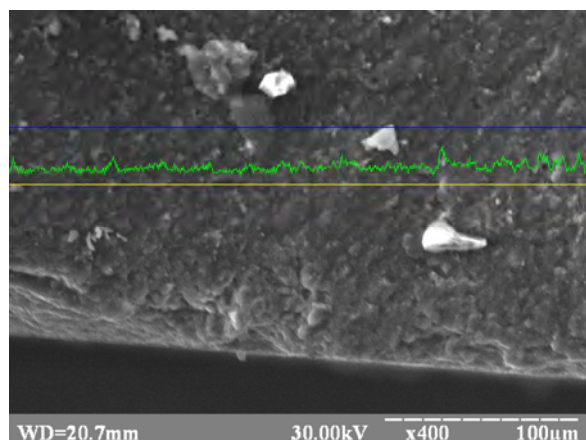


Рис. 6. Микрофотография поверхности с абразивными частицами, оставшимися на поверхности после гидрорезания

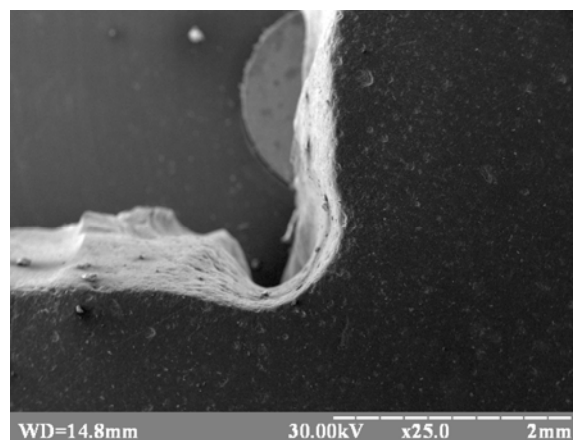


Рис. 7. Микрофотография дефекта контура, обусловленного выбегом режущей струи при перпендикулярном движении

Поскольку при гидроабразивной обработке происходит не только микроабразивное резание, но и скалывание обрабатываемого материала, качество поверхностного слоя инструментальных пластин оценивали параметром шероховатости поверхности.

Исследование микрогеометрии поверхности позволило установить, что с увеличением глубины реза (т.е. толщины обрабатываемого материала) микрогеометрия поверхности ухудшается: уводится (искривляется) ось струи, что обуславливает возникновение вибрации, ухудшающей геометрические параметры поверхности реза. После воздействия шероховатость обработанной поверхности составляет  $0,8\text{--}5,0$  мкм. При этом шероховатость повышается от верхней плоскости торца к нижней. Угол наклона с верхней поверхности относительно опорной не превышает  $10^\circ$ , что связано с неперпендикулярностью траектории перемещения абразивных зерен относительно опорной поверхности разрезаемой заготовки.

Зависимости шероховатости поверхности  $R_a$  раздела от технологического давления  $p$  и скорости контурной подачи  $v_s$  гидроабразивной струи показаны на рис. 8.

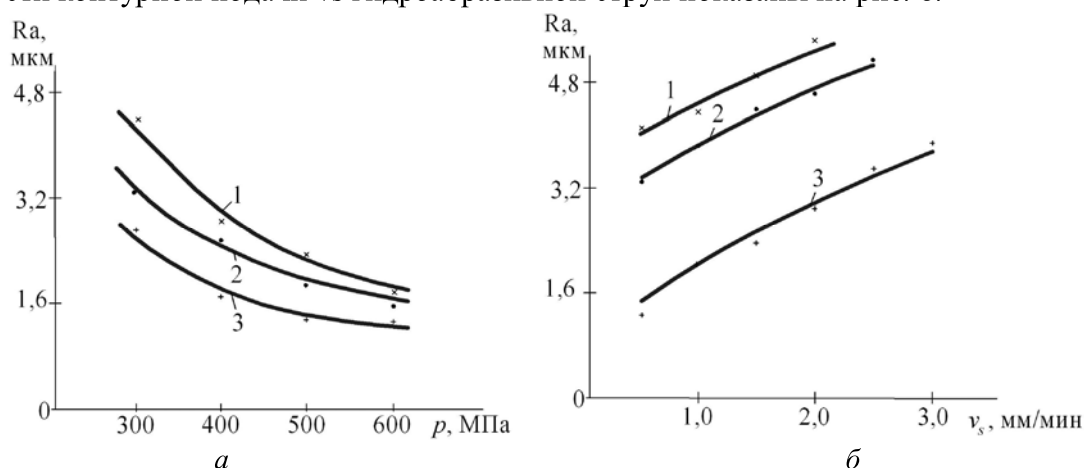


Рис. 8. Зависимости  $R_a$  раздела от давления  $p$  гидроабразивной струи (а) при  $v = 1$  мм/мин и ее скорости  $v_s$  (б) при  $p = 400$  МПа: 1 – гранат; 2 – гранат + алмаз (5% АС6 160/125); 3 – карбид кремния

Установлено, что применение оборудования с более высоким рабочим давлением приводит к улучшению качества поверхности реза. Однако применение высокого давления негативно влияет на эксплуатационные свойства насоса, включая замену расходных и

запасных частей. Использовать гранатовый песок можно только при скорости подачи режущей струи до 1,5 мм/мин и ее частичном проникновении в обрабатываемый образец (при толщине образца более 5 мм). Применение карбида кремния при скорости резания 2–3 мм/мин обеспечивает полное проникновение струи в глубину ПКНБ. При этом шероховатость поверхности реза достигает Ra 1,6–2,0. Трещин на обработанной поверхности не обнаружено. С учетом полученных результатов можно предположить о перспективности использования в абразивной композиции для гидроабразивного резания синтетических алмазов.

Из заготовок ПКНБ с применением гидроабразивного резания и финишной алмазно-абразивной обработки изготовили сменные многогранные неперетачиваемые пластины формы SNMN, которые использовали в токарных резцах. Испытывали инструменты на токарном станке модели ФТ-11 при обработке стали ШХ15 (58–62 HRC) со следующим режимом резания:  $v = 1,3$  м/с;  $S = 0,08$  мм/об.;  $t = 0,1$  мм. В процессе точения обеспечивали такую шероховатость обработанной поверхности: Ra 0,5–0,8. Стойкость инструмента составляла 40–90 мин. Результаты испытаний показали соответствие резцов, оснащенных режущими пластинами из ПКНБ, изготовленными с применением ГАР, инструментам с режущими пластинами, изготовленными по традиционной технологии в соответствии со стандартом.

### Выводы

В результате исследования выявили принципиальную возможность гидроабразивного резания ПКНБ производить разделять сверхтвердые материалы при давлении технологической среды 300–600 МПа с абразивом со средним размером зерна 0,180 мм, твердостью более 8 по шкале Мооса (карбид кремния) и наиболее низкой скоростью рабочей подачи, с использованием калибрующей трубки диаметром 1,1 мм. Низкие температуры, достигаемые в зоне реза при гидроабразивном воздействии, не вызывают нарушение поверхностного слоя, что не влияет на ухудшение режущих свойств изготавливаемых из ПКНБ инструментов.

Резцы, оснащенные режущими пластинами из ПКНБ, изготовленные с применением ГАР, соответствуют инструментам с режущими пластинами, изготовленным по традиционной технологии.

*Розглянуто досвід різки заготовок із ПКНБ гідроабразивним струменем. Представлені результати металлографічних досліджень і впливу технологічних факторів гідроабразивної обробки на шорсткість поверхні різку. Виготовлені експериментальні пластини для металоріжучого інструменту.*

**Ключові слова:** гідроабразивне різання, шорсткість поверхні.

*It is described the experience of abrasive water jet machining of PCBN cutting inserts. The results of metallographic researches as well as the influence of technologic factors of abrasive water jet machining on the surface roughness of parts cut off are presented. It was made experimental plates for metal cutting tools.*

**Key words:** abrasive water jet cutting, surface roughness.

### Литература

1. Инструменты из сверхтвердых материалов / Под ред. Н.В. Новикова. – М.: Машиностроение, 2005. – 555 с.
2. Коваленко В.С. Применение лазерной технологии при изготовлении алмазного инструмента // Інформаційні та нові технології. – 1993. – № 1. – С. 29–30.
3. Лазерная резка материалов на основе алмаза и плотных модификаций нитрида бора / А.М. Блощаневич, А.В. Бочко, В.В. Пасичный, Я.Н. Филиппов // Порошковая металлургия. – 2004. – № 3/4. – С. 47–53.
4. Саленко О.Ф., Струтинский В.Б., Загірняк М.В. Ефективне гідрорізання: Монографія. – Кременчук: КДПУ, 2005. – 488 с.
5. Abrasive water jet cutting of polycrystalline diamond: A preliminary investigation / D.A. Axinte, D.S. Srinivasu, M.C. Kong, P.W. Butler-Smith. – V. 49. – J. 10, 2009. – P. 797–803.
6. Семко М.Ф., Грабченко А.И., Ходоревский М.Г. Алмазное шлифование синтетических сверхтвердых материалов. – Харьков: ХПУ, 1980. – 192 с.

*Поступила 23.05.12*