

J. Gauskler // Angew. Chem. Ed. — 2006. — Vol. 45. — P. 1–5.

10. **Демидович, Б. К.** Пеностекло / *Б. К. Демидович*. — Минск : Наука и техника, 1975. — 240 с.

11. **Пат. 2053737 РФ.** Биоактивный микропористый материал для костной хирургии и способ его изготовления / *Белецкий Б. И., Власова Е. Б.* 10.02.1996.

12. **Пат. 2392007 РФ.** Способ получения пористого материала на основе фосфата кальция / *Сафронова Т. В., Корнейчук С. А., Путляев В. И., Третьяков Ю. Д.* 20.06.2010.

13. **Казенас, Е. К.** Термодинамика испарения двойных оксидов / *Е. К. Казенас*. — М. : Наука, 2004. — 551 с.

14. **Bitara, M.** Soluble phosphate glasses: in vitro studies using human cells of hard and soft tissue origin /

M. Bitara, V. Salihb, V. Muderaa [et al.] // Biomaterials. — 2004. — Vol. 25, № 12. — P. 2283–2292.

15. **Ramselaar, M. M. A.** Biodegradation of four calcium phosphate ceramics; in vivo rates and tissue interactions / *M. M. A. Ramselaar, F. C. M. Driessens, W. Kalk [et al.] // Journal of Materials Science: Materials in Medicine. — 1991. — Vol. 2, № 2. — P. 63–70.*

16. **Евдокимов, П. В.** Двойные фосфаты $Ca_{(3-x)}M_{2x}(PO_4)_2$ ($M = Na, K$) как основа макропористой биокерамики со специальной архитектурой : автореф. к. х. н. специальность 02.00.21 — химия твердого тела. 2015 г. ■

Получено 08.09.14

© Т. В. Сафронова, В. И. Путляев,

Я. Ю. Филиппов, Д. С. Ларионов, П. В. Евдокимов,

А. Е. Аверина, Е. С. Климашина, В. К. Иванов,

2015 г.

Д. Т. Н. **С. Н. Григорьев¹**, Д. Т. Н. **В. В. Кузин¹** (✉), К. Т. Н. **С. Ю. Фёдоров¹**,
К. Т. Н. **К. В. Вепринцев²**, Н. Р. **Портной¹**, К. Т. Н. **И. И. Сазанов¹**

¹ ФГБОУ ВПО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия

² ООО «Завод технической керамики», Москва, Россия

УДК 621.924.93:666.3

МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПРОФИЛЯ РЕЗА ПРИ ГИДРОАБРАЗИВНОЙ ОБРАБОТКЕ ВЫСОКОПЛОТНОЙ КЕРАМИКИ

Изучены технологические особенности гидроабразивного резания высокоплотной керамики. Приведена разработанная модель керамической заготовки при гидроабразивной обработке, позволяющая описать профиль реза, оценить влияние технологических режимов гидроабразивной обработки на его геометрические характеристики и отметить достаточно высокую точность резания.

Ключевые слова: высокоплотная керамика, гидроабразивная обработка, геометрические характеристики профиля реза.

ВВЕДЕНИЕ

Высокая эффективность гидроабразивного резания труднообрабатываемых материалов доказана результатами его промышленного применения [1, 2]. Интенсивное удаление припуска с заготовки в условиях практического отсутствия силовых и термических нагрузок на обрабатываемые поверхности происходит в результате многочисленных актов микрорезания, осуществляемых абразивными частицами, которые подаются в зону резания жидкостью,

имеющей сверхвысокую скорость [3]. Использование гидроабразивной струи, обладающей специфическими инструментальными свойствами, обеспечивает высокие характеристики точности и качества поверхности. Это позволяет изготавливать заготовки с минимальными припусками на финишные операции и определяет перспективность гидроабразивной технологии для резания заготовок из высокоплотной керамики. Однако стохастичность разрушающего действия гидроабразивной струи усложняет профиль реза на керамических заготовках, затрудняет прогнозирование его геометрических характеристик и, соответственно, не позволяет эффективно назначать припуск для последующей обработки [4]. Поэтому выявление взаимосвязи технологических режимов

✉
В. В. Кузин
E-mail: kuzena@post.ru

гидроабразивной обработки с геометрическими характеристиками профиля реза приобретает особую актуальность.

Цель работы — построить модель реза, образующегося при гидроабразивной обработке высокоплотной керамики, и исследовать влияние технологических режимов этого процесса на геометрические характеристики профиля реза.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводили с использованием 3-координатной установки гидроабразивного резания модели «MicroWATERJET F4». Принципиальная схема обработки на этой установке показана на рис. 1, слева. Жидкость под высоким давлением поступает в форсунку 1 режущей головки и смешивается с абразивом. Гидроабразивная струя малого диаметра, выходящая из фокусирующего сопла 2, перемещается вдоль керамической заготовки, закрепленной на рабочем столе установки, и осуществляет ее резание. Общий вид гидроабразивной установки «MicroWATERJET F4» показан на рис. 1, справа. Режущая головка и насосная станция модели 40.30 BHTD ECOTRON создают гидроабразивную струю сверхвысокого давления (до 400 МПа) диаметром 0,8 мм.

В качестве заготовок использовали спеченные пластины размерами 100 × 25 × 2,2 мм из оксидной керамики (HRA 93–94, $\sigma_{изг} = 420$ МПа). Заготовки закрепляли в приспособлении на рабочем столе установки, который во время рабочего цикла погружали в ванну с жидкостью. Диапазон изменения режима гидроабразивного резания приведен ниже:

Расстояние от торца фокусирующего сопла до поверхности заготовки L , мм 0,5–4,0
 Скорость подачи гидроабразивной головки s , мм/мин 3,05–14,60

Давление гидроабразивной струи P , МПа 285–385
 Расход абразива Q , г/мин 60–100

Длина реза 15 мм. Процессом резания управляли с использованием промышленного ПК со встроенной картой CNC. В качестве абразивного материала применяли гранатовый песок «Р-Гарнет» фракции 80 меш. Каждый эксперимент дублировали 3 раза. Для измерения геометрических характеристик профиля реза использовали инструментальный микроскоп ИМЦЛ 200 × 75А с цифровым отсчетным устройством УЦО 209С и прибор «MicroCAD premium».

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Процесс образования реза на керамической заготовке состоит из комплекса взаимосвязанных явлений, в которых участвуют жидкости, абразивные частицы и твердое тело, имеющие сложные траектории относительного перемещения. Гидроабразивная струя, контактирующая с керамической заготовкой в процессе обработки, создает три новые поверхности (торцевую и две боковые), совокупность которых формирует рез, постоянно изменяющий форму. Уникальный рельеф каждой поверхности отражает особенности перемещения гидроабразивной среды относительно этой поверхности.

Основная работа по снятию припуска с заготовки происходит в устье (торцевой части) реза, которое формируется в результате актов микрорезания и микроразрушения керамики, протекающих под действием высокочастотной ударной нагрузки со стороны абразивных частиц и кавитирующего потока. Рельеф устья реза значительно зависит от времени протекания и технологических параметров процесса гидроабразивной обработки. Выделены 3 этапа



Рис. 1. Схема процесса гидроабразивного резания (слева) и общий вид технологической установки (справа)

в его формировании. Типичный рельеф устья реза, образовавшийся на начальном этапе гидроабразивной обработки керамической заготовки, показан на рис. 2, а. Отличительные признаки этого рельефа — незначительная ширина прорезанного участка и значительные округления пересекающихся поверхностей. Дальнейшее развитие рельефа устья реза определяется взаимодействием гидроабразивной струи с уже сформированным участком поверхности. Рельеф устья реза, сформированный на втором этапе (установившийся этап обработки), характеризуется образованием основных элементов устья реза, имеющих форму воронки, состоящей из верхнего конуса и нижнего цилиндра (рис. 2, б). При дальнейшей обработке размеры этих элементов устья реза остаются постоянными несмотря на их постоянное перемещение. Трансформация формы и размеров устья реза происходит при изменении условий взаимодействия гидроабразивной струи с поверхностью керамической заготовки (переходный этап обработки). В качестве примера на рис. 2, в показан общий вид реза после остановки перемещения гидроабразивной головки на время $\tau = 10$ с без прекращения подачи гидроабразивной струи. Видно, что в результате изменения режима заметно увеличился диаметр верхнего конуса устья реза.

Устье реза, сформированное гидроабразивной струей, в свою очередь, начинает влиять на ее скоростное поле и свойства. При движении жидкости в полузамкнутом пространстве возникают интенсивные контактные явления на границе жидкость – керамика, вихревые и волновые процессы, оказывающие тормозящее воздействие на струю. Наибольшее замедление скорости струи происходит в ее периферийных объемах, из которых водно-абразивная масса перемещается по направлению к центру струи и замедляет скорость ее ядра. Изменение энергетических параметров гидроабразивной струи по глубине реза предопределяет образование

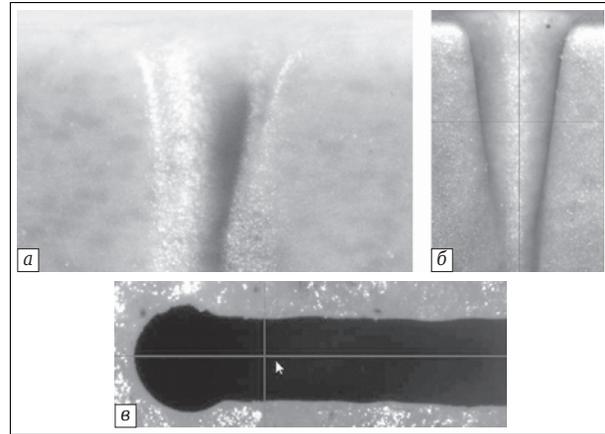


Рис. 2. Микрофотографии устья реза на начальном (а), установившемся (б) и переходном (в) этапах обработки

двух боковых поверхностей сложного рельефа, создающих профиль реза. Геометрические характеристики этого профиля в конечном итоге определяют точность гидроабразивного резания керамической заготовки.

Несмотря на достаточно высокий уровень стохастичности процесса взаимодействия гидроабразивной струи с керамической заготовкой, были выделены 3 типичных профиля реза (рис. 3). Характерным признаком каждого профиля реза, определяющим его геометрическую конфигурацию, является совокупность линий, соединяющих верхнюю и нижнюю (опорную) поверхности керамической заготовки. Видно (см. рис. 3, а), что профиль реза № 1 по разработанной классификации имеет вид обратной трапеции (длина нижнего основания меньше длины верхнего). Боковые стороны этой трапеции сформированы линиями, имеющими, как правило, некоторое искривление в нижней части. Профиль реза № 2 (см. рис. 3, б) образован двумя геометрическими фигурами: обратной трапецией в верхней части реза и прямоугольником в нижней. Граница между этими фигурами имеет плавный переход. Профиль реза № 3 (см. рис. 3, в) имеет наиболее сложный вид

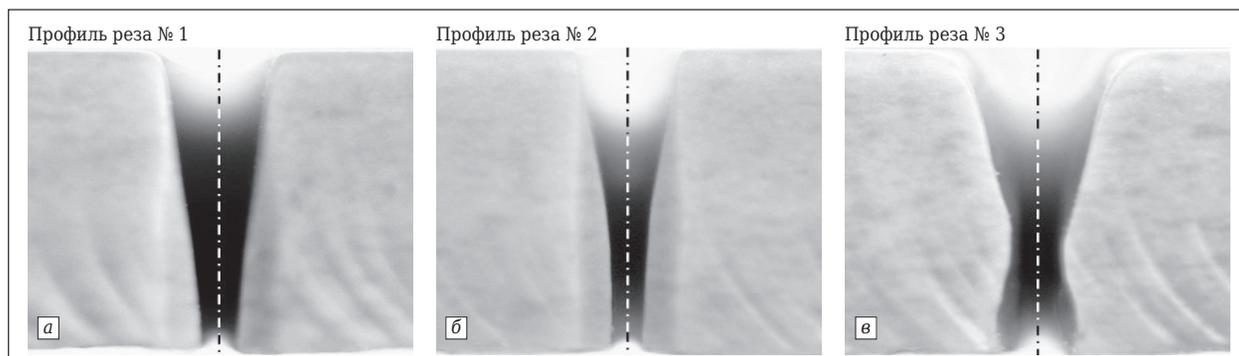


Рис. 3. Классификация профилей реза № 1–3 (а–в)

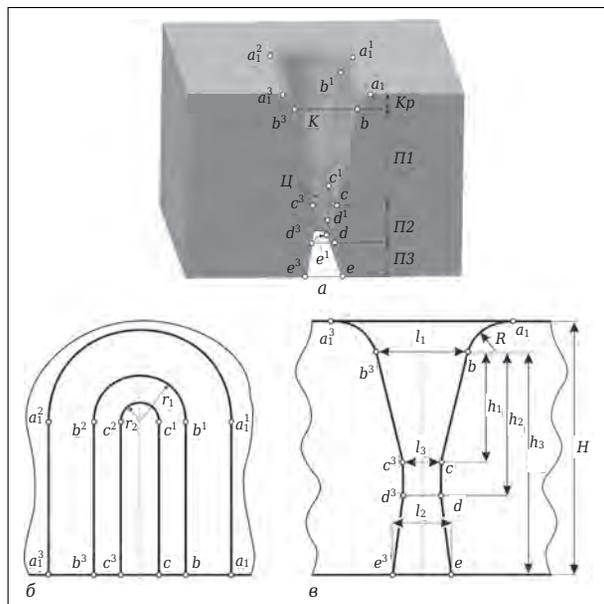


Рис. 4. Геометрическая модель реза (а) и геометрические характеристики устья (б) и профиля реза (в)

и образован тремя геометрическими фигурами: обратной трапецией в верхней части, прямоугольником в средней части и прямой трапецией в нижней. Граница между этими фигурами, так же как и в предыдущем случае, имеет плавный переход. Общим признаком этих типичных профилей реза является присутствие на входной части реза криволинейного участка.

С использованием экспериментальных результатов построили 3D-модель керамической заготовки при гидроабразивном резании (рис. 4, а). Геометрия устья и профиля реза в этой модели заданы следующей совокупностью поверхностей. Входная криволинейная поверхность Kp от точки a_1 (a_1^1, a_1^2, a_1^3) до точки b (b^1, b^2, b^3) образуется на пересечении торцевой поверхности заготовки с внешней наклонной поверхностью профиля реза. Форма этой поверхности не имеет существенных различий в устье реза и на его профиле. Рельеф устья реза формируют две поверхности: коническая $K - b^1, b^2, c^2, c^1$ и цилиндрическая $\Pi - c^1, c^2, e^2, e^1$. Профиль реза формируют: две наклонные поверхности $\Pi 1 - b, b^1, c^1, c$ и b^3, b^2, c^2, c^3 , две вертикальные поверхности $\Pi 2 - c, c^1, d^1, d$ и c^3, c^2, d^2, d^3 , две наклонные поверхности $\Pi 3 - d, d^1, e^1, e$ и d^3, d^2, e^2, e^3 . Рельеф устья реза описан следующими геометрическими характеристиками: наибольший r_1 и наименьший r_2 радиусы конической поверхности K ; радиус r_2 цилиндрической поверхности Π . Для описания рельефа профиля реза использовали следующие геометрические характеристики: расстояния l_1, l_2 и l_3 между характеристическими точками на противоположных поверхностях

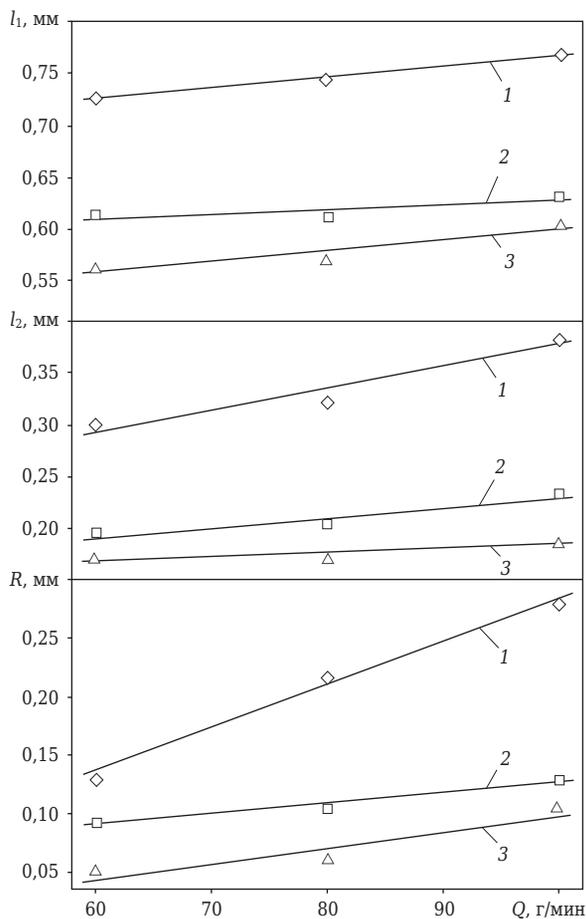


Рис. 5. Влияние расхода абразивного материала Q на геометрические характеристики профиля реза в заготовке из оксидной керамики при гидроабразивной обработке с $P = 335$ МПа, $L = 2$ мм: 1 — $s = 3,05$ мм/мин; 2 — $s = 7,32$ мм/мин; 3 — $s = 14,60$ мм/мин

реза $b - b^3, e - e^3$ и $c - c^3$ соответственно; расстояние h_1 между базовыми линиями $b - b^1$ ($b^3 - b^2$) и конечными линиями $c - c^1$ и ($c^3 - c^2$) наклонной поверхности $\Pi 1$; расстояние h_2 между базовыми линиями $b - b^1$ ($b^3 - b^2$) и конечными линиями $d - d^1$ ($d^3 - d^2$) вертикальной поверхности $\Pi 2$; расстояние h_3 между базовыми линиями $b - b^1$ ($b^3 - b^2$) и конечными линиями $e - e^1$ и $e^3 - e^2$ наклонной поверхности $\Pi 3$. Радиус R использовали для описания криволинейной поверхности Kp как на устье, так и на профиле реза.

Разработанная геометрическая модель и ее геометрические характеристики адекватно описывают устье и любой профиль реза (см. рис. 3) при гидроабразивной обработке керамики. Например, для формализации профиля реза № 1 достаточно использовать расстояния l_1, l_2 и h_1, h_2 , профиля реза № 2 — расстояния l_1, l_2, h_1 и h_2 , профиля реза № 3 — расстояния l_1, l_2, l_3, h_1, h_2 и h_3 . Установлено, что наиболее существенно влияет на вид формирующегося профи-

ля реза расстояние L от сопла до керамической заготовки. При обработке с $L = 0,5$ мм профиль реза № 1 формируется только при низкой скорости подачи ($s = 3,05$ мм/мин); значения P и Q абразива практически не влияют на вид профиля реза в этом случае. При обработке с повышенными скоростями подачи ($s = 7,32 \div 14,60$ мм/мин) формируется профиль реза № 2. Формирование профиля реза № 3 было зафиксировано только в одном дублирующем эксперименте (из трех проведенных) — при обработке с $s = 14,60$ мм/мин, $P = 285$ МПа и $Q = 60$ г/мин.

При обработке с $L = 2$ мм профиль реза № 1 формируется при $s = 3,05 \div 7,32$ мм/мин, причем значения P и Q абразива не влияют на рельеф профиля реза. Зафиксировано также образование профиля реза № 1 при обработке с $s = 14,6$ мм/мин, $Q = 100$ г/мин и $P = 385$ МПа. Профиль реза № 2 формируется при обработке с $s = 14,60$ мм/мин и $Q = 80 \div 100$ г/мин, а давление не влияет на рельеф профиля реза. Профиль реза № 3 формируется при обработке с высокой скоростью подачи ($s = 14,60$ мм/мин) и малым расходом абразива (60 и 80 г/мин); при этом давление не влияет на рельеф профиля реза. При обработке с $L = 4$ мм профиль реза № 1 формируется при $s = 3,05 \div 7,32$ мм/мин, причем значения Q и P не влияют на его рельеф. Увеличение скорости подачи до $s = 14,60$ мм/мин приводит к резкому снижению эффективности процесса гидроабразивного резания керамики, что проявляется в неспособности к разделению ее на части.

На рис. 5–7 показаны данные, характеризующие влияние разных технологических параметров гидроабразивной обработки на геометрические характеристики наиболее часто формирующихся профилей реза № 1 и 2. Последовательно проанализируем каждую экспериментальную зависимость и определим условия формирования каждого профиля.

Влияние расхода абразива Q на геометрические характеристики профиля реза № 1 в заготовке из оксидной керамики при гидроабразивной обработке с $P = 335$ МПа, $L = 2$ мм и разной s показано на рис. 5. Видно, что профиль реза с наибольшими значениями l_1 , l_2 и R формируется при обработке с $s = 3,05$ мм/мин. Увеличение скорости подачи приводит к уменьшению всех геометрических характеристик профиля реза. Наиболее заметное изменение этих характеристик зафиксировано при обработке с $Q = 100$ г/мин. Повышение расхода абразива с 60 до 100 г/мин и скорости подачи с 3,05 до 14,60 мм/мин приводит к увеличению l_1 , l_2 и R . Например, повышение Q с 60 до 100 г/мин увеличивает l_1 с 0,73 до 0,77 мм, с 0,61 до

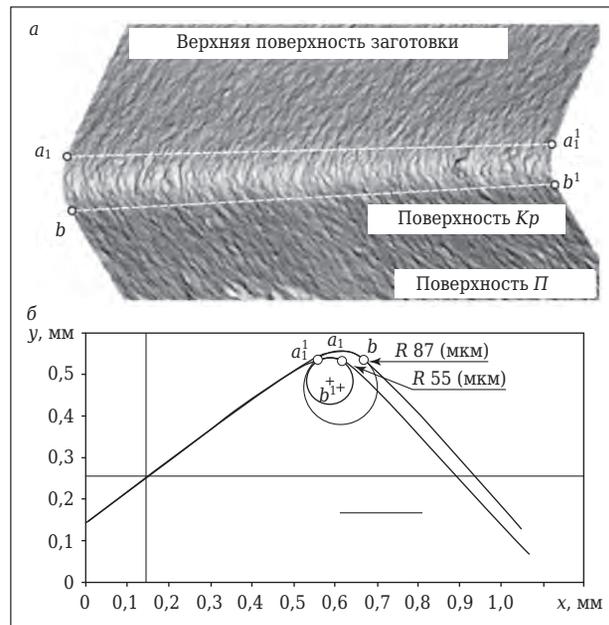


Рис. 6. 3D-изображение верхней части профиля реза (а) и характер изменения радиуса R округления криволинейной поверхности Kr вдоль профиля реза (б)

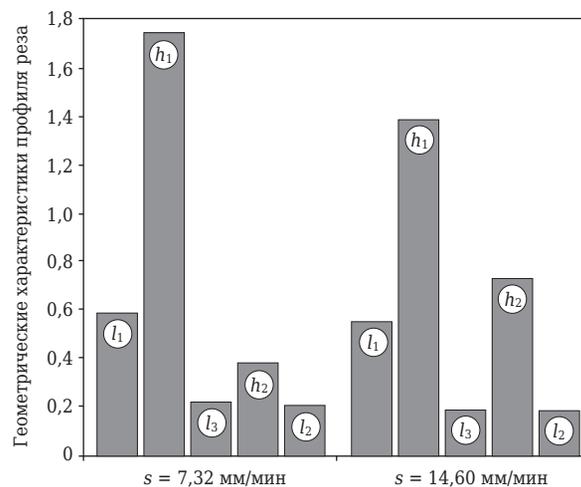


Рис. 7. Влияние скорости перемещения режущей головки на геометрические характеристики профиля реза № 2 в заготовке из оксидной керамики при гидроабразивной обработке с $P = 335$ МПа, $L = 0,5$ мм и $Q = 80$ г/мин

0,63 мм и с 0,56 до 0,61 мм при s , равной 3,05, 7,32 и 14,60 мм/мин соответственно. Повышение Q с 60 до 100 г/мин приводит к увеличению l_2 с 0,30 до 0,38 мм, с 0,19 до 0,23 мм и с 0,17 до 0,19 мм при s , равной 3,05, 7,32 и 14,60 мм/мин соответственно. Повышение Q с 60 до 100 г/мин увеличивает R с 0,13 до 0,28 мм, с 0,10 до 0,13 мм и с 0,05 до 0,11 мм при s , равной 3,05, 7,32 и 14,60 мм/мин соответственно.

Анализ выявленных взаимосвязей показал, что с высокой точностью они описываются линейной функцией. Этот факт существен-

но упрощает дальнейший выбор оптимальных значений технологических режимов гидроабразивного резания заготовок из высокоплотной керамики и назначения припусков для финишной обработки заготовок. Следует отметить, что значение радиуса R округления криволинейной поверхности Kp изменяется вдоль профиля реза (см. рис. 6). Видно, что поверхность с наибольшим радиусом R формируется на участке a_1-b , с увеличением расстояния в направлении участка $a_1^1-b^1$ значение R уменьшается. Это вполне объяснимо с позиций времени воздействия гидроабразивной струи на керамический образец: на начальный участок профиля реза это действие осуществляется практически в течение всего времени обработки, а на более удаленный участок — только часть этого времени.

Влияние скорости подачи гидроабразивной головки на геометрические характеристики профиля реза № 2 в заготовке из оксидной керамики при $P = 335$ МПа, $L = 0,5$ мм и $Q = 80$ г/мин показано на рис. 7. Видно, что при увеличении скорости подачи гидроабразивной головки уменьшаются значения l_1 , h_1 , l_2 и l_3 , но увеличивается h_2 с 0,37 до 0,72 мм. При этом значения R практически не изменяются. Установлено, что при увеличении s с 7,32 до 14,60 мм/мин в наибольшей степени уменьшаются l_1 (с 0,58 до 0,55 мм) и h_1 (с 1,74 до 1,38 мм). Характер выявленных зависимостей связали с объемом абразива, контактирующего с керамической заготовкой в определенный интервал времени. При увеличении этого объема повышаются значения всех геометрических характеристик профиля реза.

Анализ экспериментальных результатов позволяет утверждать, что гидроабразивное резание высокоплотной оксидной керамики обеспечивает достаточно высокую точность. Окончательно оценить перспективность приме-

нения операции гидроабразивного резания при изготовлении керамических изделий представляется возможным после анализа состояния и дефектности сформированных поверхностей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате выполненных исследований установлено, что при резании высокоплотной оксидной керамики формируется уникальный рельеф каждой поверхности, который отражает особенности перемещения гидроабразивной среды относительно этой поверхности. Рельеф поверхностей формируется в результате актов микрорезания и микроразрушения керамики, протекающих под действием высокочастотной ударной нагрузки со стороны абразивных частиц и кавитирующего потока. Разработанная модель керамической заготовки при гидроабразивной обработке позволила описать рельеф реза, оценить влияние технологических режимов этого процесса на его геометрические характеристики и отметить достаточно высокую точность резания. Определена роль расстояния от торца фокусирующего сопла до поверхности заготовки, скорости подачи гидроабразивной головки, давления гидроабразивной струи и расхода абразива на геометрические характеристики профиля реза. Полученные результаты указали на необходимость оптимизации технологических параметров гидроабразивного резания деталей из высокоплотной керамики.

* * *

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России при выполнении научно-исследовательской работы в рамках государственного задания.

(Продолжение следует)

Библиографический список

1. **Бреннер, В. А.** Гидроструйные технологии в промышленности. Гидроабразивное резание / В. А. Бреннер, А. Б. Жабин, А. Е. Пушкарёв, М. М. Щеголевский. — М.: Изд. Московского государственного горного университета, 2003. — 279 с.
2. **Полянский, С. Н.** Технология и оборудование гидроабразивной резки / С. Н. Полянский, А. С. Нестеров // Вестник машиностроения. — 2004. — № 5. — С. 43–46.
3. **Тихомиров, Р. А.** Схемы микроразрушения материалов в зоне резания при их гидрообработке / Р. А. Тихомиров, Е. Н. Петухов, Д. В. Кравченко // Производственные технологии: матер. Междунар. науч.-техн. конф. ВлГУ. Владимир, 2000. — С. 68.
4. **Старков, В. К.** Повышение эксплуатационных характеристик изделий из керамических материалов методами механической и термической обработки / В. К. Старков, В. В. Кузин, В. Ф. Попов [и др.]. — М.: ВНИИТЭМР. Машиностроительные производства. Сер. Прогрессивные технологические процессы в машиностроении: обзорная информ. — 1989. — Вып. 4. — 62 с. ■

Получено 27.11.14

© С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров,
К. В. Вепринцев, Н. Р. Портной, И. И. Сазанов,
2015 г.