

В.В. Сабельников, Т.М. Сабельникова

**ПОВЫШЕНИЕ ПРОИЗВОДИТЕЛЬНОСТИ
УЛЬТРАЗВУКОВОЙ ПРОШИВКИ ОТВЕРСТИЙ
В ДЕТАЛЯХ ИЗ ОКСИДНОЙ КЕРАМИКИ**

Приведены результаты экспериментальных исследований по совершенствованию процесса ультразвуковой обработки отверстий в оксидной керамике. Описан механизм взаимодействия обрабатываемого материала и водного раствора борной кислоты, предлагаемой для использования в качестве технологической среды.

E-mail: cm12@sm.bmstu.ru

Ключевые слова: ультразвуковая обработка, оксидная и нитридная керамика, раствор борной кислоты, производительность обработки, износ инструмента, шероховатость обработанной поверхности.

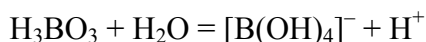
В различных областях новой техники и отраслях народного хозяйства все большее распространение получают детали из так называемой технической керамики, к которой, прежде всего, относят оксидную и нитридную керамику. Керамические детали отличаются высокими прочностью и износостойкостью, способностью надежно и длительно работать в условиях высоких температур и агрессивных сред.

В конструкциях современных машин техническая керамика успешно заменяет остродефицитные материалы, в частности твердые и тугоплавкие сплавы. В области медицины к ответственным деталям с уникальными функциональными и эксплуатационными характеристиками можно отнести шарниры искусственных тазобедренных суставов, детали сердечных клапанов; в ткацком производстве — челноки и лодочки, обеспечивающие необходимое натяжение и поворот нитей при производстве тканей; в двигателестроении и аэрокосмической технике — сопловые вкладыши, элементы головных частей, а также ответственные элементы различных приборов. К таким деталям традиционно предъявляют жесткие требования по точности размеров (на уровне нескольких микро- и даже нанометров) и шероховатости обрабатываемой поверхности (в пределах 9—10 классов).

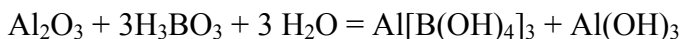
В связи с высокой прочностью керамические детали лишь ограниченно подвергают традиционным методам лезвийной обработки, как правило, с использованием алмазного инструмента. Все большее распространение получают физико-химические способы обработки либо методы, основанные на абразивном воздействии, к числу которых следует отнести химическое полирование, шлифование, гидроабразивную и ультразвуковую обработку.

Однако перечисленные способы характеризуются низкой производительностью обработки. До сих пор ни теоретически, ни экспериментально не найдены универсальные пути совершенствования процесса обработки деталей из керамики.

Обоснование проведенных исследований. Одним из способов повышения производительности обработки технической керамики является совмещение традиционных методов формообразования с каким-либо интенсифицирующим воздействием, в частности с использованием специальной технологической среды. Такой средой может служить водный раствор борной кислоты. Эта малорастворимая слабая кислота в водных растворах ведет себя как одноосновная. Кислотные свойства в водном растворе обусловлены образованием протонов водорода H^+ по реакции [1]



Известно, что при нагреве борная кислота легко растворяет оксиды металлов с образованием комплексных соединений [2]. Поэтому при алмазном сверлении отверстий в оксидной керамике с использованием борной кислоты предполагается протекание следующей химической реакции [3]:



Образующийся борат алюминия $Al[B(OH)_4]_3$ обладает меньшей твердостью по сравнению с оксидом алюминия; он также может выполнять роль поверхностно-активного вещества (ПАВ), реализуя эффект Ребиндера и обеспечивая в целом повышение производительности обработки.

При алмазном точении поликристаллического оксида алюминия борная кислота также успешно выполняет роль ПАВ, существенно снижая силы трения. Борная кислота оказывает также смазочное действие, осаждаясь на контактных поверхностях инструмента и детали и уменьшая тем самым силы резания [4].

Как уже отмечалось, ультразвуковая абразивная обработка (УЗАО) является одним из наиболее эффективных методов формообразования рабочих поверхностей деталей из технической керамики. УЗАО характеризуется многократным ударным воздействием на обрабатываемый материал, его активным разрушением (диспергированием) на мельчайшие частицы. Можно предположить, что усиление межгранульного растрескивания по границам зерен при наличии активной технологической среды будет способствовать повышению производительности обработки, снижению износа инструмента, улучшению качественных характеристик деталей из керамики.

Описание экспериментальной установки и результаты исследований. На кафедре «Технологии ракетно-космического машино-

строения» МГТУ им. Н.Э. Баумана были выполнены исследования, направленные на совершенствование ультразвуковой прошивки отверстий в деталях из оксидной керамики за счет использования в качестве технологической среды водного раствора борной кислоты. Эксперименты проводили на лабораторной установке, созданной на базе универсально-фрезерного станка мод. 676. Установка состоит из вращающейся ультразвуковой головки, разработанной в Научно-исследовательском институте технологии машиностроения (НИИТМ), ступенчатого концентратора напряжений (волновода), инструмента, электродвигателя, прижимного устройства и приспособления для закрепления обрабатываемых образцов. В ультразвуковой головке использован магнитострикционный преобразователь колебательной системы, питание преобразователя осуществлялось от генератора мод. УЗГ-1/1 с максимальной мощностью 1кВт. В экспериментах предусматривалась возможность дискретного изменения подводимой мощности, был опробован следующий ряд значений: 440, 660 и 880 Вт. В качестве основного рабочего инструмента применяли алмазные корончатые сверла диаметром 16 мм (АС 6 80/63 по ТУ 2-037-68–76), которые жестко закрепляли в ступенчатом волноводе, непосредственно соединенном с преобразователем акустической системы.

Частота колебаний торца инструмента составляла 18...20 кГц при амплитуде колебаний, не превышающей $30 \text{ мкм} \pm 15 \%$. Обрабатываемые образцы помещали в ванну на подъемном устройстве, установленном на рабочем столе станка. С помощью системы блоков и грузов подъемное устройство обеспечивало перемещение образца и создание постоянной силы прижима инструмента к обрабатываемой детали в пределах 106...110 Н.

В зону обработки свободным поливом вводилась абразивная суспензия, содержащая карбид кремния, зеленый SiC со средним размером зерна 40 мкм (M40) при концентрации 1 : 2 (на одну объемную часть абразива приходилось две части среды). Цель исследований заключалась в получении сравнительной экспериментальной оценки эффективности ультразвуковой обработки оксидной керамики при замене традиционной технологической среды — дистиллированной воды с абразивом — 4%-ным водным раствором борной кислоты с абразивом и сохранении прочих условий обработки одинаковыми. Влияние среды оценивали по изменению производительности обработки, износа инструмента, шероховатости обработанной поверхности. Основным критерием эффективности служила производительность обработки Q , мм/мин. Значение Q определяли как отношение фактической глубины прошиваемого отверстия H_f , мм, к времени обработки T , мин, которое во всех экспериментах было равно 2 мин.

Обработку результатов экспериментов осуществляли по следующим зависимостям:

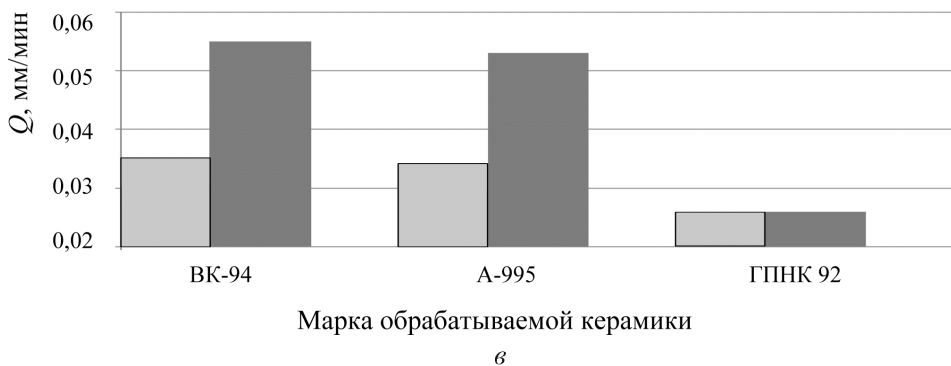
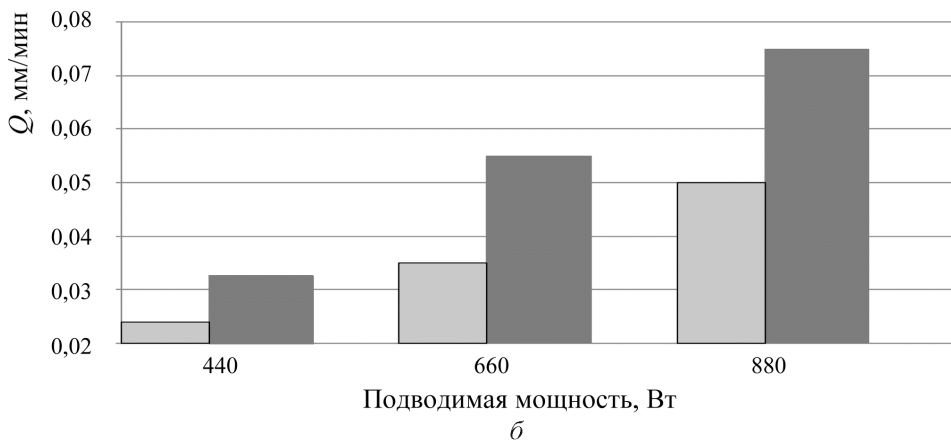
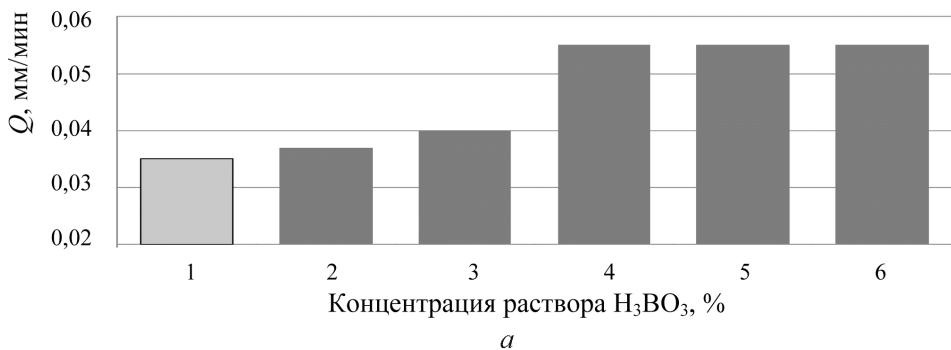
$$H_{\phi} = 0,5 \left(h_{\phi} + \frac{\sum h_{\text{отв}}}{n} \right); \quad h_{\phi} = h - \Delta; \quad Q = \frac{H_{\phi}}{T},$$

где h_{ϕ} — фактическое перемещение ультразвуковой головки с учетом износа волновода Δ , мм; Δ — линейный износ волновода за время проведения эксперимента, регистрируемый микрометром как разность между начальным и конечным размерами стержневого концентратора колебаний, мм; $h_{\text{отв}}$ — измеренная глубина прошиваемого отверстия, мм; h — перемещение ультразвуковой головки, регистрируемое индикатором часового типа с точностью до 0,01 мм, мм.

Реальная поверхность дна прошиваемого отверстия не является плоской, поэтому после завершения обработки на выверочной плите три-четыре раза контролировали глубину отверстия $h_{\text{отв}}$ с помощью индикатора часового типа, снабженного игловым щупом. Таким образом, при определении фактической глубины обработки H_{ϕ} учитывали регистрируемое перемещение h непрерывно изнашиваемого волновода и разброс измеренных значений глубины получаемого отверстия $h_{\text{отв}}$, обусловленный неравномерностью процесса ультразвуковой прошивки. Основной объем экспериментов был осуществлен на плоских заготовках изделий «вкладыш» и «вставка» НПО «Композит», изготовленных из оксидной керамики марки ВК-94 (0,5...1,0 % MgO, 0,5...1,0 % CrO₃, 4 % SiO₂, остальное — Al₂O₃); часть исследований проводили на образцах из оксидной керамики марки А-995 (0,5...1,0 % MgO, остальное — Al₂O₃), а также из нитридной керамики марки ГПНК 92 (горячепрессованный нитрид кремния состава: 6 % IrO₂, 2 % Al₂O₃, остальное — Si₃N₄).

Все однотипные эксперименты повторяли 5—7 раз, обобщение результатов осуществлялось по среднему значению. На первом этапе исследований было установлено базовое значение производительности обработки оксидной керамики марки ВК-94 с подачей в зону обработки традиционной технологической среды — дистиллированной воды с абразивом: $Q_6 = 0,035$ мм/мин. Оценка эффективности исследуемого параметра (концентрации раствора борной кислоты, подаваемой мощности, вида опробуемой керамики) осуществлялась сопоставлением базовой производительности Q_6 с производительностью обработки, получаемой в рассматриваемом эксперименте. Некоторые результаты выполненных исследований приведены на рисунке.

По представленным диаграммам видно, что использование раствора борной кислоты в качестве технологической среды значительно интенсифицирует процесс обработки и практически всегда способствует повышению производительности ультразвуковой прошивки



- – Обработка с подачей обычной технологической среды
- – Обработка в водном растворе борной кислоты

Диаграммы изменения производительности обработки Q в зависимости от концентрации C водного раствора борной кислоты (a), подводимой мощности N (b) и марки обрабатываемой керамики (v):

a, b — для керамика марки ВК-94 при $N = 660$ Вт и $C = 4$ % соответственно; v — для керамики разных марок при $N = 660$ Вт и $C = 4$ %

отверстий в оксидной керамике. Установлено, что при увеличении концентрации C раствора H_3BO_3 от 2 до 4 % отмечается рост производительности обработки в 1,5 раза — от 0,035 до 0,055 мм/мин, при этом достигнутое значение производительности не изменяется при дальнейшем повышении концентрации от 4 до 6 %. (см. рисунок, поз. *а*). Концентрация водного раствора борной кислоты 4 % была принята базовой при проведении дальнейших исследований и может быть рекомендована для практического применения.

Эффективность использования 4%-ного водного раствора H_3BO_3 была также подтверждена при различных значениях подводимой мощности (см. рисунок, поз. *б*). Во всем опробованном диапазоне изменения N (440...880 Вт) отмечается постоянное относительное увеличение производительности обработки приблизительно в 1,5 раза по сравнению с обычными условиями ультразвукового резания независимо от величины энергетического воздействия. Увеличение подводимой энергии сопровождается ростом амплитуды колебаний торца инструмента, интенсификацией его изнашивания. В этом случае наблюдается неустойчивость процесса обработки, а также большой разброс экспериментальных данных, что в наибольшей степени проявляется при максимальном значении мощности $N = 880$ Вт. Основной объем экспериментов осуществлялся при мощности ультразвукового воздействия, равной 660 Вт.

Аналогичные эксперименты, проведенные на оксидной керамике марки А-995, показали практически полное совпадение с результатами, полученными при ультразвуковой обработке керамики марки ВК-94 (см рисунок, поз. *в*). В то же время целесообразность использования раствора борной кислоты при УЗАО нитридной керамики марки ГПНК 92 не была подтверждена.

На завершающей стадии исследований были проведены эксперименты по изучению влияния предполагаемой технологической среды на износ инструмента и шероховатость обработанной поверхности. Износ инструмента фиксировался на игольчатом волноводе, для создания которого в торец типового ступенчатого волновода впаивали концентратор в виде цилиндрического стержня длиной 5 мм и диаметром 0,88 мм. Ультразвуковая прошивка отверстия в этом случае сопровождается интенсивным изнашиванием инструмента, что создает определенные удобства для его регистрации. После обработки каждого отверстия износ инструмента определяли по двум параметрам — торцевому и диаметральному износу волновода. Торцевой износ H , мм, характеризовал уменьшение длины иглы волновода в продольном направлении, а диаметральный D , мм, — относительное изменение диаметра торца волновода по сравнению с исходным значением. Износ измеряли с помощью лупы Бринелля точностью до

0,005 мм. Перед обработкой очередного отверстия осуществлялось стачивание на абразивном круге изношенной части волновода. Исследования показали, что изнашивание инструмента как по торцу, так и по конечному диаметру волновода оставалось в одних и тех же пределах ($H = 0,15$ мм, $D = 0,02$ мм) независимо от вида подаваемой среды, т. е. водный раствор борной кислоты, повышая производительность ультразвуковой обработки, не способствует увеличению износа инструмента.

Для сравнительной оценки уровня шероховатости обработанной поверхности использовали ступенчатый волновод, заканчивающийся цилиндрическим участком диаметром 16 мм. Площадь образующейся после обработки поверхности позволяла оценить среднюю высоту микронеровностей Ra , мкм, с помощью профилографа-профилометра мод. 201. Установлено, что как при подаче в зону ультразвуковой обработки воды с абразивом, так и при использовании водного раствора борной кислоты с абразивом параметр шероховатости Ra абразивной поверхности составлял 1,8...1,9 мкм.

Анализ полученных результатов. Обобщая результаты выполненных экспериментов в целом, можно заключить, что подача в зону обработки 4%-ного раствора борной кислоты является эффективным фактором повышения производительности обработки оксидной керамики — приблизительно в 1,5 раза по сравнению с обычными условиями ультразвуковой прошивки.

Производительность ультразвуковой обработки возрастает до 1,5 раз при увеличении концентрации подаваемого раствора борной кислоты от 2 до 4 %. Эффективность воздействия раствора H_3BO_3 сохраняется на максимально достигнутом уровне при изменении подводимой мощности в интервале от 440 до 880 Вт, также подтверждается при обработке оксидной керамики различных марок (ВК-94, А-995), созданных на основе Al_2O_3 . При установленном росте производительности обработки износ инструмента, а также шероховатость обработанной поверхности сохранялись в тех же пределах, что и при обычных условиях ультразвукового резания. Раствор борной кислоты не оказывает положительного влияния на производительность УЗАО нитридной керамики марки ГПНК 92.

Известно [3, 4], что алмазное сверление монокристалла Al_2O_3 (сапфира) в среде борной кислоты не сопровождается повышением производительности обработки. Установленная в экспериментах, выполненных в МГТУ им. Н.Э. Баумана, эффективность использования раствора H_3BO_3 в качестве технологической среды при ультразвуковой прошивке отверстий в поликристаллической оксидной керамике, возможно, объясняется тем, что борная кислота оказывает в этом случае благоприятное диспергирующее действие именно по грани-

цам зерен, способствуя протеканию химических реакций между технологической средой и оксидом алюминия в условиях высоких давлений и температур, характерных для процесса ультразвуковой обработки.

Выводы. Показано, что использование в качестве технологической среды 4%-ного водного раствора борной кислоты является эффективным фактором интенсификации прошивки отверстий в оксидной керамике. Производительность обработки в этом случае повышается не менее чем в 1,5 раза по сравнению с обычными условиями ультразвукового резания. Эффективность воздействия раствора H_3BO_3 сохраняется на максимально достигнутом уровне при изменении подводимой мощности в интервале от 440 до 880 Вт. При установленном росте производительности обработки износ инструмента сохраняется постоянным. Раствор борной кислоты не оказывает положительного влияния на производительность УЗАО нитридной керамики.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Степин Б.Д., Цветков А.А. Неорганическая химия. – М.: Высш. шк., 1994. – 589 с.
2. Реми Г. Курс неорганической химии. – М., 1989. – Т. 1. – 915 с.
3. Jahanmir S., Liang H. Chemomechanical effects of boric acid in core drilling of alumina //NIST Spec Publ. – 1993 – N 847. – P. 101–113.
4. Тадааки Сугита, Кандзи Уэндзи. Механическая обработка керамики: Пер с яп. – Токио, 2005.

Статья поступила в редакцию 19.09.2012