

УДК 621.9.048.6

DOI: 10.30987/article\_5d2df08876dc42.15847289

**Ю.А. Моргунов**, к.т.н., **А.И. Опальницкий**, аспирант, **Б.П. Саушкин**, д.т.н., **Н.В. Хомякова**, инженер  
(ФГБОУ ВО Московский политехнический университет, 107203, Россия, г. Москва, Б.Семеновская, 38)  
E-mail: morgunov56@mail.ru

## **Научноёмкие технологии ультразвуковой алмазной обработки изделий из керамик и композитов**

*Для обработки деталей из керамик или керамокомпозитов с пространственно-сложными поверхностями практическое применение нашли технологии комбинированной ультразвуковой алмазной обработки (УЗАО). Их внедрение сдерживается отсутствием обоснованных технологических рекомендаций и современного оборудования отечественного производства с многокоординатным относительным перемещением инструмента и заготовки.*

**Ключевые слова:** алмазно-ультразвуковая обработка; оборудование для УЗАО; композиционные материалы; керамика.

**Yu.A. Morgunov**, Can. Sc. Tech., **A.I. Opalnitsky**, Post graduate student, **B.P. Saushkin**, Dr. Sc. Tech.,  
**N.V. Khomyakova**, Engineer  
(FSBEI HE Moscow Polytechnic University, 38, B. Semyonovskaya Str., Moscow, 107203, Russia)

## **Science intensive technologies of ceramic and composite material ultrasonic-diamond machining**

*For working ceramic and ceramic-composite material with spatial-complex surface machining there are used technologies of combined ultrasonic diamond machining (USD). Their introduction is restrained by the absence of substantiated technological recommendations and modern domestic equipment with multiaxes relative displacement of a tool and a blank.*

**Keywords:** ultrasonic-diamond machining; USD equipment; composites, ceramics.

Формообразование изделий из новых конструкционных материалов, таких как, сплавы со специальными свойствами, композиционные материалы, керамические материалы, при традиционной механической обработке, в ряде случаев, вызывает затруднения из-за их низкой пластичности, высокой твердости, разнородности физико-механических свойств отдельных компонентов [1, 2].

Для решения проблемы широко используются физико-химические методы и технологии, основанные на различных процессах и механизмах разрушения материалов [3 – 6]. Так, для обработки твердых и хрупких материалов практическое применение, особенно на предприятиях оборонного комплекса, нашли технологии комбинированной алмазно-ультразвуковой обработки (УЗАО) [7, 10].

Удаление припуска при УЗАО является результатом алмазного микрорезания с наложе-

нием высокочастотных ультразвуковых колебаний на вращающийся инструмент. Такая схема обработки позволяет повысить производительность, снизить износ и расход инструмента.

Производительность обработки лимитируется подачей инструмента, которая в свою очередь сильно зависит от скорости удаления продуктов разрушения из зоны обработки. Поэтому особый интерес представляли исследования скорости эвакуации  $v_{эв}$  продуктов разрушения из зоны обработки.

В заготовке из кремниевого стекла было сформировано глухое отверстие глубиной  $h = 5$  мм и диаметром  $d = 4,3$  мм. Для имитации продуктов разрушения использовался порошок карбида кремния разной зернистости (50 и 80 мкм), который засыпался в отверстие. Значение бокового зазора  $a$  (50...500 мкм) между инструментом и заготовкой изменялось

за счет использования инструментов различных диаметров (рис. 1).

Исследовались три схемы обработки:

1 – на инструмент действовала статическая нагрузка  $P$  и накладывались ультразвуковые колебания с частотой  $f$  и амплитудой  $A$ ;

2 – на инструмент действовала статическая нагрузка  $P$  и инструменту дополнительно сообщалось вращение  $n$ ;

3 – на инструмент действовала статическая нагрузка  $P$ , инструменту сообщалось вращение и накладывались УЗ колебания.

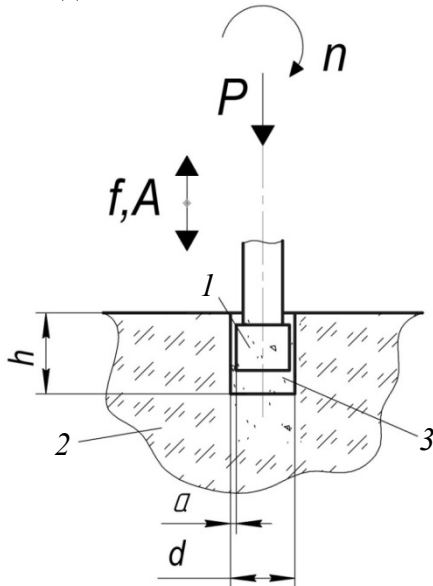


Рис. 1. Схема рабочей зоны при проведении эксперимента:

1 – инструмент; 2 – деталь; 3 – частицы порошка

В ходе экспериментов контролировалось время, за которое инструмент достигнет дна отверстия.

Результаты позволили получить зависимости скорости эвакуации продуктов разрушения от величины бокового зазора при различных схемах обработки (рис. 2).

Видно, что результаты экспериментов по схемам 1 и 2 при различных боковых зазорах имеют достаточно близкие значения. Совмещение ультразвуковых колебаний с вращением позволяет резко интенсифицировать процесс вывода порошка из отверстия.

Это объясняется тем, что при вращении инструмента частицы порошка центробежной силой выталкиваются на периферию, к стенкам отверстия, где на них активно воздействуют ультразвуковые колебания, обеспечивая интенсивный вывод порошка из отверстия.

Характер полученных зависимостей с изменением зернистости порошка практически не изменяется, но с уменьшением зернистости порошка скорость его эвакуации возрастает в 1,5 – 2 раза при всех схемах обработки.

Следует также отметить, что при соизмеримых размерах частиц порошка и бокового зазора, ни УЗ, ни вращение практически не справляются с выводом порошка, но при их совмещении скорость эвакуации порошка возрастает более чем в 10 раз.

Представленная физическая модель имитирует процесс удаления продуктов микрорезания из рабочей зоны и поясняет эффект повышения производительности алмазной обработки вращающимся инструментом при наложении ультразвука.

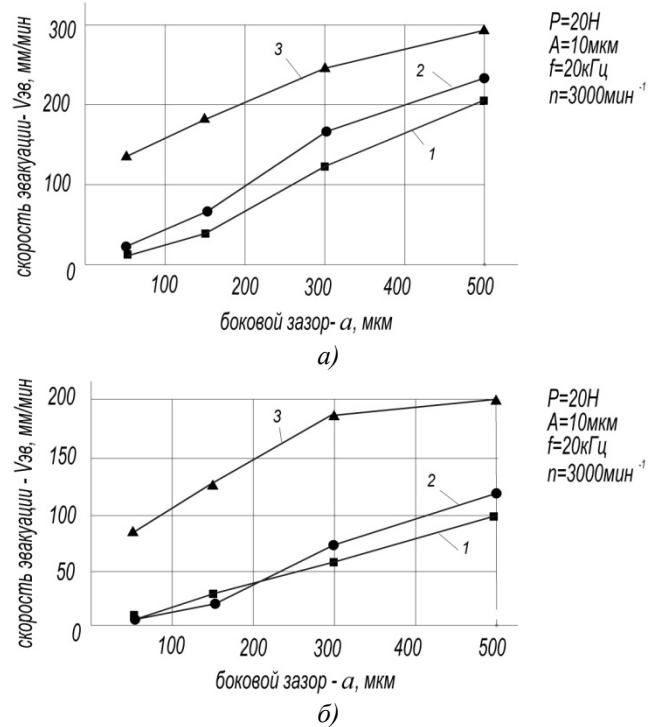


Рис. 2. Зависимость скорости удаления продуктов от величины зазора при зернистости порошка:

$a$  – 80 мкм;  $b$  – 50 мкм; 1 – схема 1; 2 – схема 2; 3 – схема 3

В качестве примера на рис. 3 представлены экспериментальные зависимости скорости подачи инструмента от величины статической нагрузки, полученные при сверлении отверстия диаметром 2 мм и глубиной 4 мм в керамике ВК-94 алмазным инструментом с наложением (2) и без наложения (1) ультразвука.

Как видно, при наложении ультразвука полученная зависимость носит линейный характер, в то время как во втором случае, зависимость имеет выраженный максимум, что, по всей видимости, связано с условиями эвакуации продуктов резания из отверстия.

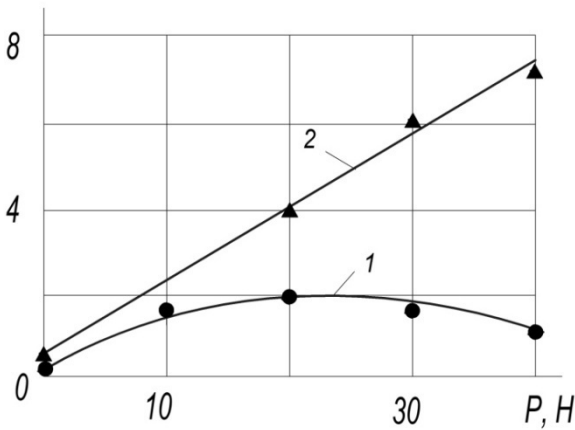
Осевая подача инструмента в последнем случае достигает максимального значения 2 мм/мин. Тогда как при алмазно-ультразвуковой обработке за счет дополнительного УЗ воздействия наблюдается замет-

ное возрастание скорости обработки (в 2... 3 раза). Отмечается снижение износа (примерно в два раза) и повышение стойкости инструмента при наложении ультразвуковых колебаний на инструмент.

Несмотря на указанные преимущества, внедрение технологий УЗАО сдерживается из-за наличия ряда нерешенных научных, технических и организационных проблем:

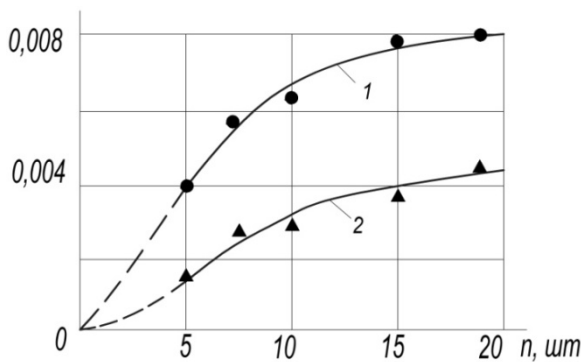
- отсутствуют апробированные методики расчета режимов УЗАО, и параметры режима обработки определяются по результатам экспериментальных исследований;
- мало изучено влияние УЗ на износ алмазного инструмента, отсутствуют рекомендации по снижению себестоимости изготовления деталей;
- оборудование, используемое на предприятиях, является морально устаревшим и разработано на основе сверлильных и фрезерных станков с ручным управлением.

$S, \text{ мм/мин}$



а)

$\Delta t, \text{ кг}$



б)

**Рис. 3. Зависимости скорости подачи от нагрузки (а) и износа инструмента от числа обработанных отверстий (б) при алмазном сверлении ( $n_{вр} = 3500 \text{ мин}^{-1}$ ;  $A = 10 \text{ мкм}$ ;  $f = 22 \text{ кгц}$ ):**  
1 – алмазная прошивка; 2 – алмазно-ультразвуковая прошивка

Мировой рынок оборудования для УЗАО достаточно узок. Ведущим поставщиком яв-

ляется компания DMG производящая многокоординатное оборудование данного функционального назначения (станки Ultrasonic). Российские компания производят в основном однокоординатные станки.

С увеличением объема неметаллических материалов типа керамик, композитов в изделиях новой техники, расширяется номенклатура операций УЗАО.

Схемы, поясняющие основные операции УЗАО, приведены на рис. 4. УЗ фрезерование пазов (рис. 4, а) выполняется боковой поверхностью стержневого алмазного инструмента для создания пазов в изделиях из хрупких и композиционных материалов. Обработка сквозных отверстий (рис. 4, б) трубчатым инструментом производится с вертикальной рабочей подачей. Для обеспечения высокой производительности применяется подача рабочей жидкости через тело инструмента.

Прошивка отверстий цельным инструментом в сверхтвердых материалах показана на рис. 4, с. Разрезание заготовок алмазным диском (рис. 4, д) нашло применение для удаления дефектных поверхностных слоев, например при подрезке керамических камер сгорания, и резке композиционных материалов. Отметим, что технологический эффект наблюдается при наложении УЗ-колебаний, как вдоль, так и поперек направления подачи инструмента.

В перспективных конструкциях изделий авиационно-космической техники используются конструктивные элементы с пространственно-сложными, например, аэродинамическими поверхностями. Доводка таких поверхностей в деталях из керамик или керамокомпозитов с использованием операций УЗАО потребует создания оборудования с многокоординатным относительным перемещением инструмента и заготовки. Так, окончательная обработка пера лопатки турбины или моноколеса из керамических материалов является достаточно сложной. Такая операция может осуществляться УЗАО на многокоординатных станках. На рис. 4, е–h показаны различные схемы такой обработки. Эти схемы являются перспективными, соответствующее оборудование только создается. В соответствии со схемой (рис. 4, h) можно использовать существующие многокоординатные станки для ленточного шлифования типа MTS-1000/6NC фирмы Motabo с дополнительным наложением УЗ колебаний на абразивную (алмазную) ленту.

Для проведения операций УЗАО разработаны и изготовлены специальные инструменты. Алмазные головки с прессованным алмазом применяются для фрезерования и прошивки отверстий. В большинстве случаев та-

кие инструменты используются для фрезерования пазов, так как имеют относительно низкий износ алмазного слоя и высокую жесткость. Трубчатые инструменты с осажденным гальваническим слоем алмазного микропо-

рошка применяют для прошивки отверстий. В таких инструментах отсутствуют мертвые зоны на торце инструмента, увеличивается производительность обработки.

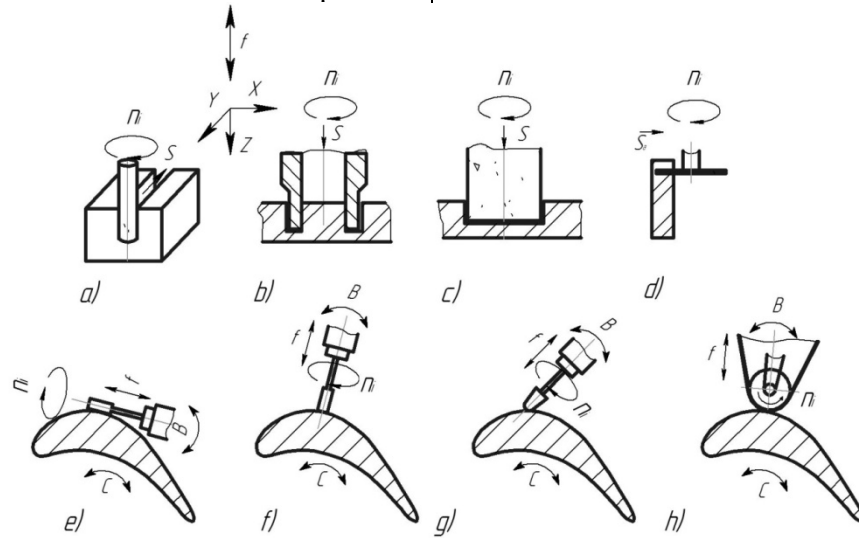


Рис. 4. Основные схемы УЗАО

При прошивке глубоких отверстий через тело трубчатого инструмента прокачивают смазочно-охлаждающую жидкость для интенсивной эвакуации продуктов обработки. Фасонные алмазные инструменты применяются для создания объемных поверхностей.

Это все подтверждает необходимость разработки и внедрения многокоординатного оборудования для осуществления комплекса операций УЗАО.

Опыт разработки и внедрения такого оборудования накоплен на предприятии ФГУП «НПО «Техномаш» совместно с Московским политехническим университетом (мод. МУЗС-1 и СКО 310-2).

Ультразвуковые головки станков работают на магнитострикционных преобразователях. Автоматическое управление дает возможность получения комплекса сложных поверхностей при достаточно высокой точности. Опыт эксплуатации станков позволил выявить некоторые недостатки его конструкции:

- прошивка отверстий под углом требует специальной оснастки;
- использование шаговых двигателей не обеспечивает высокой точности;
- магнитострикционный преобразователь имеет низкий КПД, а генератор ручную подстройку частоты.

Эти замечания учтены при разработке 5-координатного станка для УЗАО с современной системой управления (пат. РФ №154038). Для удобства корректировки УЗ параметров, генератор расположен на панели станка. Встроенное в генератор устройство автомати-

ческой подстройки частоты позволяет быстро подбирать необходимые параметры под различные инструменты. В запатентованной УЗ головке с пьезоэлектрическим преобразователем (пат. №152124) применяется система с встраиваемым двигателем, что позволяет уменьшить габариты головки, увеличить КПД (практически отсутствует нагрев двигателя и преобразователя). Радиальное биение шпинделя не более 0,005 мм. Координатный стол станка перемещается по оси Y, головка по осям Z и X. Для поворота заготовки по осям разработан двухкоординатный стол. Для перемещения стола и головки используются сервоприводы с точностью позиционирования до 0,005 мм.

При назначении параметров обработки предусмотрены ряд дополнительных функций: компенсация износа инструмента, ограничение по вылету инструмента, дискретное перемещение по осям, изменение системы измерения, функции изменения скоростей подачи и вращения инструмента во время обработки.

Это оборудование предназначено для высокоэффективной обработки ответственных деталей аэрокосмической техники. Наряду с повышенной производительностью, относительно низким износом инструмента, следует указать на еще одну позитивную сторону УЗАО – снижение брака, вызванного появлением сколов и трещин при алмазной обработке хрупких материалов. Проведенные эксперименты на изделиях из ситалла показали, что при УЗАО подобные дефекты не образуются.

При ультразвуковом фрезеровании пазов в

деталей из композиционных материалов отсутствуют вырывы армирующих нитей и отслоения на обрабатываемых поверхностях, снижается шероховатость поверхности.

### Выводы

Алмазно-ультразвуковая обработка обеспечивает возрастание скорости обработки (в 2 – 3 раза), снижение износа и повышение стойкости инструмента.

Одним из путей повышения инновационного потенциала технологий ультразвуковой алмазной обработки является ориентация на разработку и использование многокоординатных станков с ЧПУ для УЗАО малопластичных материалов. Такие станки обеспечат получение изделий с пространственно-сложными поверхностями повышенной точности из перспективных керамик и композитов. Для их эффективного применения необходимы дальнейшие исследования процесса для выработки технологических рекомендаций по назначению параметров режима обработки различных материалов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Carter C.B., Norton M.G. Ceramic Materials. Science and Engineering. New York: Springer Science, 2013. – 745 p.
2. Бойцов, А.Г., Дудаков, В.Б., Плешаков, А.В. Новое в обработке композитов // РИТМ. – 2014. – №8. – С. 96–98.
3. Астахов, Ю.П., Кочергин, С.А., Моргун, Ю.А., Саушкин, Б.П. Повышение эффективности изготовления лопаток моноколес // Технология машиностроения. – 2013. – №5. – С. 14–18.
4. Саушкин, Б.П. Комбинированные методы обработки в машиностроительном производстве // Металлообработка. – 2003. – №1(13). – С. 8-17.
5. Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Surface manufacturing under pulse fiber laser // В сборнике: Procedia CIRP 18. Ser. «18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, ISEM-2016», 2016. Volume 42. – p. 470–474.
6. Kochergin S.A., Morgunov Y.A., Saushkin B.P. Particularities of pulse laser cutting of thin plate titanium blanks // В сборнике: Procedia Engineering Ser. "International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017", 2017. – p. 1161-1166.
7. Li Z., Jiao Y., Deines T.W., Pei Z.J., Treadwell C. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: Feasibility study and designed experiments // International Journal

of Machine Tools and Manufacture, 2005. 45. – p. 1402–1411.

8. Опальницкий, А.И., Перепечкин, А.А., Демидов, Д.В. Особенности износа алмазосодержащего инструмента при ультразвуковом фрезеровании пазов // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2014. – №4 (57). – С. 44–48.

9. Моргун, Ю.А., Опальницкий, А.И., Перепечкин, А.А. Современное состояние и перспективы применения в отрасли ультразвуковой размерной обработки изделий // Известия МГТУ «МАМИ». – 2012. – Т. 2. №2 (14). – С.140–144.

10. Приходько, В.М., Нигметзянов, Р.И., Сундуков, С.К., Фатюхин, Д.С. Инновационные технологические процессы с использованием ультразвука // Научно-технические технологии в машиностроении. – 2017. – №7(73). – С.11–14.

### REFERENCES

1. Carter C.B., Norton M.G. Ceramic Materials. Science and Engineering. New York: Springer Science, 2013. – 745 p.
2. Boitsov, A.G., Dudakov, V.B., Pleshakov, A.V. *New in Composite Machining // Rhythm.* – 2014. – No.8. – pp. 96-98.
3. Astakhov, Yu.P., Kochergin, S.A., Morgunov, Yu.A., saushkin, B.P. Effectiveness increase in manufacturing mono-wheel blade // *Engineering Technique.* – 2013. – No.5. – pp. 14-18.
4. Saushkin, B.P. Combined machining methods in engineering production // *Metal-working.* 2003. – No.1 (13). – pp. 8-17.
5. Kochergin S.A., Morgunov Yu.A., Saushkin B.P. Surface manufacturing under pulse fiber laser // In collected publication: *Procedia CIRP 18. Ser. «18th CIRP Conference on Electro Physical and Chemical Machining, ISEM-2016», 2016. Volume 42. – p. 470–474.*
6. Kochergin S.A., Morgunov Y.A., Saushkin B.P. Particularities of pulse laser cutting of thin plate titanium blanks // In collected publication: *Procedia Engineering Ser. "International Conference on Industrial Engineering, ICIE 2017", 2017. – p. 1161-1166.*
7. Li Z., Jiao Y., Deines T.W., Pei Z.J., Treadwell C. Rotary ultrasonic machining of ceramic matrix composites: Feasibility study and designed experiments // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2005. 45. – p. 1402–1411.
8. Opalnitky, A.I., Perepechkin, A.A., Demidov, D.V. Wear peculiarities of diamond-containing tool at groove ultrasonic milling // *Strengthening Technologies and Coatings.* – 2014. – No.4 (57). – pp. 44-48.
9. Morgunov, Yu.A., Opalnitky, A.I., Perepechkin, A.A. Current state and outlooks of use product ultrasonic dimensional processing // *Proceedings of MSTU "MAMI".* – 2012. – Vol.2. No.2 (14). – pp. 140-144.
10. Prikhodko, V.M., Nigmatzyanov, R.I., Sundukov, S.K., Fatyukhin, D.S. Innovation engineering processes using ultrasound // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering.* – 2017. – No.7 (73). – pp. 11-14.

Рецензент д.т.н. Р.А. Латыпов

Учредитель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Брянский государственный технический университет"

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7  
ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: 8-903-592-87-39. E-mail: naukatm@yandex.ru

Верстка А.А. Алисов. Технический редактор А.А. Алисов. Корректор Н.В. Дюбкова.

Сдано в набор 16.09.2019. Выход в свет 30.09.2019.

Формат 60 × 88 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88.

Тираж 500 экз. Свободная цена.



Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования

"Брянский государственный технический университет"

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16