Д. т. н. В. В. Кузин¹ (ᢂ), к. т. н. С. Ю. Фёдоров¹, д. фил. Тибор Салаи², к. д. фил. Балаж Фаркаш²

- ¹ ФГБОУ ВО «Московский государственный технологический университет «Станкин», Москва, Россия
- ² Будапештский университет технических и экономических наук, г. Будапешт, Венгрия

удк 666.3: 621.9.048.4 МИКРООБРАБОТКА ВЫСОКОПЛОТНОЙ ТОКОПРОВОДЯЩЕЙ КЕРАМИКИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОГО ФРЕЗЕРОВАНИЯ. Часть 1

Изучены технологические особенности микрообработки заготовок из высокоплотной токопроводящей керамики с использованием электроэрозионного фрезерования. Установлено, что при повышении частоты импульсов при электроэрозионном фрезеровании пазов в заготовках из оксидно-карбидной керамики уменьшаются размеры их профиля и производительность обработки, а также увеличиваются шероховатость дна паза и торцевой износ электрода-инструмента.

Ключевые слова: *микрообработка, керамика, электроэрозионное фрезерование, износ, производительность.*

ВВЕДЕНИЕ

Миниатюризация объектов традиционно явля-ется важным направлением развития технических систем, для которых габариты и вес имеют приоритетное значение. Появление и интенсивное развитие микроэлектромеханических систем (МЭМС), при изготовлении которых используются разные керамические материалы, дало новый импульс для создания инновационных технологий их микрообработки [1]. Высокие требования к точности и качеству керамических микродеталей ориентируют исследователей и технологов на поиск действенных путей их обеспечения. Особый интерес в этом отношении представляет метод электроэрозионной обработки керамических материалов [2-4]. Эффективность этой технологии определяется уникальной совокупностью процессов, генерируемых электрическим разрядом в жидкости и приводящих к разрушению твердой фазы [5]. Многие из этих процессов не имеют аналогов в традиционных методах обработки.

Эффективность электроэрозионного сверления отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике приведена в статьях [6-8]. Однако при изготовлении микродеталей требуется обрабатывать значительно большее число конструкционных элементов: поверхности, пазы, углубления и уступы сложной формы. Алмазная микрообработка этих конструкционных элементов либо затруднена, либо просто невозможна. Более того, при алмазной обработке керамических деталей формиру-

> ⊠ В. В. Кузин E-mail: kyzena@post.ru

ется весьма дефектный поверхностный слой [9–12], который негативно влияет на их эксплуатационные характеристики [13–15]. Поэтому разработка технологических процессов микрообработки заготовок из высокоплотной керамики с использованием электроэрозионного фрезерования является актуальной научно-технической задачей.

В работе поставлена цель — изучить влияние параметров режима электроэрозионного фрезерования пазов в оксидно-карбидной керамике на геометрические характеристики профиля паза, качество обработанных поверхностей, торцевой износ электрода-инструмента и производительность процесса. Результаты этого исследования будут представлены в двух статьях.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Фрезерование пазов в заготовках из керамики ВОК 71 (система Al_2O_3 – TiC, 93–94 *HRA*, электрическое сопротивление R = 0,4 Ом, шероховатость исходной поверхности Ra = 0,1 мкм) выполняли на прецизионном электроэрозионном станке SARIX SA модели SX-200-HPM, Швейцария, общий вид которого показан на рис. 1, *а*. Принцип работы станка и конструктивные особенности описаны в статье [6].

Формообразование пазов осуществляли следующим образом. После врезания электродаинструмента, вращающегося со скоростью v, в керамическую заготовку с подачей $S_{\rm вp}$ на глубину h = 0,02 мм включали продольную подачу $S_{\rm п}$ (рис. 1, б). Паз длиной L = 5 мм фрезеровали за один проход электрода-инструмента. В качестве электрода-инструмента использовали стержни из карбида вольфрама диаметром d = 0,3 мм и длиной 300 мм. Частоту импульсов при электроэрози-



Рис. 1. Общий вид электроэрозионного станка (*a*), схема электроэрозионного фрезерования паза (б), общий вид (в), 3-D модель (г) и профиль (*д*) паза

онном фрезеровании пазов изменяли в диапазоне $f = 60 \div 160 \ \kappa \Gamma$ ц при неизменных других параметрах режима: длительности импульса $t_{\mu} = 5 \ mkc$, силе пикового тока $I = 65 \ A$, рабочем напряжении $U = 120 \ B$, энергии импульсов $E = 0,105 \ Д$ ж,



Рис. 2. Влияние частоты импульсов f на ширину $l_{\rm cp}$, глубину $h_{\rm cp}$ профиля паза и параметр Ra шероховатости дна паза

напряжении пробоя $U_a = 80$ В, коэффициенте усиления напряжения $k_u = 700$, частоте вращения инструмента-электрода v = 600 об/мин, продольной подаче S_п = 0,01 мм/об. Изготовление пазов на керамических заготовках выполняли в резервуаре с проточной рабочей жидкостью (деионизированная вода), очистку которой от шлама (продуктов обработки) осуществляли фильтрующими элементами. Торцевой износ электрода-инструмента при обработке автоматически компенсировался за счет его выдвигания из шпинделя станка.

На обработанных пазах (рис. 1, в) выделяли начальный участок фрезерования (*НУФ*), центральный участок фрезерования (*ЦУФ*) и конечный участок фрезерования (*КУФ*). Геометрию обработанных пазов характеризовали средними значениями ширины $l_{\rm cp}$ и глубины $h_{\rm cp}$ их профиля. Для этого измеряли эти параметры в сечениях *А*-*А* (*НУФ*), *Б*-*Б* (*ЦУФ*)

и *B–B* (*КУФ*) на 3D-моделях пазов (рис. 1, *г*), полученных с использованием прибора «MicroCAD premium». Ширину профиля пазов определяли на расстоянии 10 мкм от исходной поверхности. По результатам этих (трех) замеров определяли средние значения ширины и глубины профиля пазов.

Морфологию обработанных поверхностей исследовали с использованием сканирующего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3LMH. При этом считали, что обработанный паз формируют три поверхности (рис. 1, ∂): область повреждений 1 (от точки *a* до точки *b*) на исходной керамической заготовке, боковая поверхность 2 (от точки *b* до точки *c*) и дно 3 паза (от точки *c* до точки *d*). Параметр *Ra* шероховатости дна пазов измеряли на приборе HOMMEL TESTER T8000. Величину торцевого износа $t_{\rm T}$ электрода-инструмента и производительность *Q* процесса (объем удаленного материала за единицу времени) электроэрозионного фрезерования определяли по параметрическим записям системы ЧПУ станка.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В результате сложного комплекса тепловых, физических и химических процессов, протекающих в межэлектродном пространстве при пропускании импульсного тока высокой частоты, происходит формирование паза в заготовке. На его геометрические параметры и шероховатость дна значительно влияет частота импульсов при электроэрозионном фрезеровании (рис. 2).

Установлено, что ширина и глубина пазов, обработанных на разных режимах, превышает значения диаметра электрода-инструмента (d = 0.3 мм) и глубины врезания (h = 0.02 мм). Пазы с наибольшими значениями l_{cp} и h_{cp} формируются при электроэрозионном фрезеровании с наименьшей частотой импульсов f. Увеличение f от 60 до 160 кГц приводит к уменьшению $l_{\rm cp}$ от 357 до 342 мкм и h_{cp} от 33 до 22 мкм; также увеличивается наклон боковой поверхности паза (от точки b до точки c). Одновременно с этим ухудшается качество обработанной поверхности: при электроэрозионном фрезеровании с f = 60 кГц шероховатость дна пазов характеризуется параметром *Ra* = 2,65 мкм, а при обработке с *f* = 160 кГц значение *Ra* увеличивается до 4,74 мкм. Природу этого влияния удалось выявить в результате детального изучения морфологии поверхностей обработанных пазов во взаимосвязи с процессами, протекающими при электроэрозионном фрезеровании керамической заготовки.

Общими признаками поверхностей (область повреждений 1 на шлифованной поверхности керамической заготовки, боковая поверхность 2 и дно паза 3) обработанных пазов являются весьма развитый рельеф, присутствие областей расплавленной керамики и большое число кратеров разных размеров (рис. 3, а). Это сочетание признаков свидетельствует о том, что в их образовании участвовало несколько механизмов, имеющих разную природу. Ключевым моментом в формировании этих поверхностей являются электрогидравлический и тепловой эффекты, действие которых связано с преобразованием электрической энергии в механическую и тепловую энергию за счет мощного электрического разряда, возбужденного в рабочей жидкости [5, 8, 16-19]. В рабочей жидкости между поверхностями электрода-инструмента и заготовки возникает единичный электрический разряд, приводящий к образованию плазменного канала разряда. Мгновенное преобразование электрической энергии в тепловую в канале разряда резко повышает температуру и давление в локальном объеме рабочей жидкости и примыкающих к нему поверхностных слоях керамической заготовки и электрода-инструментов. Увеличение диаметра канала разряда приводит к образованию кавитационной полости и первому гидравлическому удару. При «схлопывании» этой кавитационной полости происходят второй гидравлический удар и превращение плазмы канала разряда в пульсирующую парогазовую полость, генерирующую ударные волны.

В результате этого единичного цикла образования источника сверхвысоких гидравлического давления и теплоты, импульсных перемещений жидкости, ударных волн и нестационарной кавитации в локальной области поверхностного слоя керамической заготовки и



Рис. 3. Морфология характерных поверхностей паза после электроэрозионного фрезерования керамической заготовки

электрода-инструмента формируются критические температуры и напряжения, под действием которых происходят разрушение, плавление и испарение микрообъемов обрабатываемого и инструментального материалов. Продукты этих процессов (шлам) удаляются рабочей жидкостью из межэлектродного пространства. Эти единичные циклы непрерывно и хаотично следуют между всеми поверхностями электрода-инструмента и керамической заготовки. Установленный режим обработки, определяющий характер разрядов, и геометрия межэлектродного пространства, зависящая от формы, площади и взаимного расположения рабочих поверхностей электродаинструмента и обрабатываемых поверхностей на керамической заготовке, в совокупности определяют морфологический рисунок каждой поверхности образованных пазов (см. рис. 3). Проанализируем эти особенности.

Область повреждений 1 на шлифованной поверхности керамической заготовки характеризуется многочисленными участками расплавленного материала в виде поверхностной пленки и кратерами разной формы и размеров (рис. 3, б). Между фрагментами пленки хорошо просматриваются участки исходной поверхности керамической заготовки с рисками, характеризующими шлифованную поверхность. На боковой поверхности 2 паза, имеющей волнообразную форму и сглаженное сопряжение с его дном, идентифицированы две области, имеющие разные морфологические рисунки по глубине паза. Верхняя область этой поверхности сформирована крупными частицами расплавленной керамики, из-за чего граница между боковой поверхностью и областью повреждений имеет весьма дефектный вид. Морфологический рисунок нижней области боковой поверхности, примыкающей ко дну паза, сформирован сглаженными выступами и лунками средних размеров. В лунках имеются многочисленные кратеры округлой формы размерами до 5 мкм с воронкообразными оплавленными краями.

Дно паза 3 формирует базовая поверхность, на которой имеются многочисленные наплывы (см. рис. 3, *a*). Базовая поверхность имеет развитый рельеф с многочисленными и хаотично расположенными выступами, лунками и мелкими кратерами (рис. 3, *в*). Гребни выступов на этой поверхности сформированы семействами кратеров размерами до 1 мкм, что придает этим гребням «щербатый» вид. Дно лунок имеет четкие следы оплавления, причем наибольшее число глубоких кратеров размерами до 3 мкм образовались в этих лунках. Большинство кратеров имеют правильную форму с воронкообразными оплавленными краями.

Наплывы на базовой поверхности имеют пористую структуру, образованную отдельными частицами керамики практически сферической формы размерами до 10 мкм, сплавленными в крупные конгломераты. Между ними имеются многочисленные изолированные поры, глубоко проникающие в образовавшиеся наплывы, а также неглубокие поры вытянутой извилистой формы. На отдельных «хорошо проплавленных» участках этих наплывов имеются кратеры размерами до 1 мкм и микротрещины термического происхождения, траектория роста которых связывает соседние поры. Эти признаки позволяют предположить, что природа образования этих наплывов связана с недостаточной эффективностью вывода шлама из зоны обработки и его «осаждением» в локальных областях дна паза, примыкающих к боковой поверхности. Такое расположение наплывов связано с направлением движения рабочей жидкости, создаваемого вращающимся электродом-инструментом. Появление этих наплывов объясняет изменение геометрических характеристик профиля паза и шероховатости поверхности дна паза при электроэрозионном фрезеровании с разной частотой импульсов. Число и размеры наплывов на базовой поверхности дна паза в оксидно-карбидной керамике, характеризующих морфологию обработанной поверхности, увеличивается при повышении *f* при электроэрозионном фрезеровании (рис. 4); пазы с наименьшим числом наплывов на базовой поверхности образуются при электроэрозионном фрезеровании с *f* = 60 кГц.

Пазы после электроэрозионного фрезерования с *f* = 60 кГц имеют хорошо выраженные боковую поверхность и дно (см. рис. 4, *a*). На базовой поверхности дна паза имеются следы наплывов, представляющих собой тонкую и весьма дефектную пленку. При фрезеровании с *f* = 100 кГц на-



Рис. 4. Влияние *f* при электроэрозионном фрезеровании на морфологию поверхности обработанного паза на керамической заготовке



Рис. 5. Влияние *f* при электроэрозионном фрезеровании на морфологию поверхности керамической заготовки в области повреждений

плывы толщиной до 10 мкм и шириной до 100 мкм образуются в области сопряжения боковой поверхности с дном паза (см. рис. 4, δ). В этом случае наплывы имеют ступенчатый вид с глубокими крупными кратерами размерами до 25 мкм, причем их контакт с боковой поверхностью паза реализуется отдельными «мостиками». При фрезеровании с f = 160 кГц наплывы толщиной до 20 мкм образуются практически на половине площади базовой поверхности имеются крупные кратеры и поры вытянутой формы, а также многочисленные трещины. Граница между наплывами и боковой поверхностью имеет плавный переход.

Установлено, что f при электроэрозионном фрезеровании также значительно влияет на размеры области повреждений на шлифованной поверхности керамической заготовки, но не изменяетморфологический рисунок поверхности (рис. 5). При электроэрозионном фрезеровании с $f = 60 \, \mathrm{k} \Gamma \mathrm{u}$ на исходной поверхности заготовки образуется пленка расплавленной керамики шириной до 40 мкм (см. рис. 5, а). В области повреждений имеются многочисленные кратеры округлой формы размерами до 5 мкм, глубина которых превышает толшину пленки. При обработке с f = 100 кГи ширина области повреждений увеличивается до 60 мкм за счет образования более крупных фрагментов пленки, которые соединяются на границе с боковой поверхностью паза (см. рис. 5, б). Кроме мелких кратеров образуются вытянутые полости шириной 5-8 и длиной до 15 мкм за счет объединения соседних кратеров, а также мелкие кратеры, хаотично расположенные на шлифованной поверхности. При обработке с f = 160 кГц ширина области повреждения увеличивается до 90 мкм, причем пленка расплавленной керамики имеет заметную неравномерность по толщине (см. рис. 5, в). В этой области имеются кратеры разных размеров и формы, хаотично расположенные как на поверхности пленки, так и на исходной поверхности керамической заготовки. Обнаружены также трещины термического происхождения, которые развиваются между соседними кратерами.

Зависимости, характеризующие влияние f при электроэрозионном фрезеровании на торце-



Рис. 6. Влияние f на Q электроэрозионного фрезерования и t_{τ} электрода-инструмента

вой износ $t_{\rm T}$ стержневого электрода-инструмента и производительность процесса Q (рис. 6), подтверждают полученные результаты. Видно, что увеличение f от 60 до 160 кГц приводит к росту $t_{\rm T}$ от 11 до 22 мкм и уменьшению Q обработки от 0,0045 до 0,0021 мм³/мин. Столь интенсивное уменьшение объема удаленного материала при электроэрозионном фрезеровании можно объяснить активным образованием в рабочей зоне расплавленного материала, который не выносится из межэлектродной зоны, а оседает на дне фрезеруемого паза с образованием наплывов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Изучены технологические особенности микрообработки заготовок из высокоплотной токопроводящей керамики с использованием электроэрозионного фрезерования. Установлено, что ширина и глубина изготовленных пазов превышают диаметр электрода-инструмента и глубину врезания. Увеличение частоты импульсов от 60 до 160 кГц при электроэрозионном фрезеровании пазов в заготовках из оксидно-карбидной керамики снижает эффективность этого процесса: ширина и глубина паза уменьшаются на 5 и 150 % соответственно, шероховатость поверхности дна паза увеличивается в 1,8 раза, торцевой износ электрода-инструмента повышается в 2 раза, а производительность процесса уменьшается более чем в 2 раза. Существенная зависимость этих параметров от частоты импульсов при электроэрозионном фрезеровании связана со сложными процессами при образовании поверхностей паза, которые имеют сложный морфологический рисунок. Выявлена особая роль шлама (продуктов микроразрушения керамики и электрода-инструмента) в формировании дна

Библиографический список

1. **Белов**, *Л.* Микроэлектромеханические компоненты радиочастотного диапазона / *Л. Белов*, *М. Житникова* // Электроника: наука, технология, бизнес. — 2006. — № 8. — С. 18-25.

2. *Taichiu, L.* Mechanical surface treatments of electrodischarge machined (EDMed) ceramic composite for improved strength and reliability / *L. Taichiu, D. Jianxin* // Journal of the European Ceramic Society. — 2002. — Vol. 22. — P. 545–550.

3. *Ferraris, E.* Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al₃O₂ and ZrO₂ based ceramic composites / *E. Ferraris, D. Reynaerts, B. Lauwers //* CIRP Annals-Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 60. — P. 235–238.

4. *Ho, K. H.* State of the art in wire electrical discharge machining (WEDM) / *K. H. Ho, S.T. Newman, S. Rahimifard, R. D. Allen //* International Journal of Machine Tools & Manufacture. — 2004. — Vol. 44. — P. 1247–1259.

5. **Юткин, Л. А.** Электрогидравлический эффект и его применение в промышленности / Л. А. Юткин. — Л. : Машиностроение. — 1986. — 253 с.

6. **Григорьев, С. Н.** Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике. Часть 1 / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 52–56.

Grigor'ev, S. N. Technological aspects of the electrical-discharge machining of small-diameter holes in a high-density ceramic. Part 1 / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 330–334.

7. **Григорьев, С. Н.** Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике. Часть 2 / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 9. — С. 49–52.

Grigor'ev, S. N. Technological aspects of the electrical-discharge machining of small-diameter holes in a high-density ceramic. Part 2 / S. N. *Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov* [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 5. — P. 469–472.

8. **Григорьев, С. Н.** Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике. Часть 3 / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров [и др.] // Новые огнеупоры. — 2014. — № 11. — С. 56-61.

Grigor'ev, S. N. Technological aspects of the electrical-discharge machining of small-diameter holes in a high-density ceramic. Part 3 / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, S. Yu. Fedorov [et al.] // Refractories and Industrial Ceramics. — 2015. — Vol. 55, № 6. — P. 540–544.

9. **Кузин, В. В.** Технологические особенности алмазного шлифования деталей из нитридной керамики / В. В. Кузин // Вестник машиностроения. — 2004. — № 1. — С. 37–41.

паза, влияющая на эффективность электроэрозионного фрезерования. * * *

Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ в рамках выполнения государственного задания в сфере научной деятельности (задание № 2014/105, проект № 1908).

Kuzin, V. V. Technological aspects of diamond grinding of the nitride ceramics / V. V. Kuzin // Russian Engineering Research. — 2004. — Vol. 24, № 1. — P. 23–28.
10. Kuzin, V. A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / V. Kuzin // Key Engineering Materials. — 2012. — Vol. 496. Precision Machining. — P. 127–131.

11. **Кузин, В. В.** Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на основе нитрида кремния / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2006. — № 8. — С. 19-24.

Kuzin, V. V. Technology for machining highrefractory ceramic parts based on silicon nitride / *V. V. Kuzin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, № 4. — P. 204–208.

12. *Kuzin, V.* Surface defects formation in grinding of silicon nitride ceramics / *V. Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov, M. Fedorov //* Applied Mechanics and Materials. – 2015. – Vol. 752/753. – P. 402–406.

13. **Кузин, В. В.** Повышение эксплуатационной стабильности режущих инструментов из нитридной керамики за счет оптимизации условий их заточки / *В. В. Кузин* // Вестник машиностроения. — 2003. — № 12. — С. 41-45.

Kuzin, V. V. Increasing the operational stability of nitride-ceramic cutters by optimizing their grinding conditions / *V. V. Kuzin* // Russian Engineering Research. — 2003. — Vol. 23, № 12. — P. 32–36.

14. **Kuzin, V.** Application of Indentation Method for Quality Control of Processing of Ceramic Details / V. *Kuzin, S. Grigoriev, S. Fedorov //* Applied Mechanics and Materials. — 2016. — Vol. 827. — P. 7–10.

15. **Кузин, В. В.** Эффективное применение высокоплотной керамики для изготовления режущих и деформирующих инструментов / *В. В. Кузин* // Новые огнеупоры. — 2010. — № 12. — С. 13–19.

Kuzin, V. V. Effective use of high density ceramic for manufacture of cutting and working tools / V. V. Kuzin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2010. — Vol. 51, № 6. — P. 421–426.

16. **Гулый, Г. А.** Научные основы разрядноимпульсных технологий / *Г. А. Гулый.* — Киев. : Наукова думка, 1990. — 208 с.

17. **Кривицкий, Е.В.** Динамика электровзрыва в жидкости / *Е. В. Кривицкий*. — Киев : Наукова думка, 1986. — 206 с.

18. **Малюшевский, П. П.** Основы разрядноимпульсной технологии / П. П. Малюшевский. — Киев : Наукова думка, 1983. — 272 с.

19. **Ушаков, В. Я.** Импульсный электрический пробой жидкостей / В. Я. Ушаков. — Томск : Изд. ТПИ, 1975. — 256 с. ■

> Получено 06.03.16 © В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Тибор Салаи, Балаж Фаркаш, 2016 г.