Д. т. н. С. Н. Григорьев¹, д. т. н. В. В. Кузин¹ (⊠), к. т. н. С. Ю. Фёдоров¹, д. фил. Тибор Салаи², к. д. фил. Балаж Фаркаш²

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

УДК 666.3:621.9.048.4

ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ЭЛЕКТРОЭРОЗИОННОЙ ОБРАБОТКИ ОТВЕРСТИЙ МАЛОГО ДИАМЕТРА В ВЫСОКОПЛОТНОЙ КЕРАМИКЕ. Часть 1

Приведены результаты изучения влияния технологических режимов электроэрозионной обработки на точность отверстий малого диаметра в деталях из высокоплотной керамики. Установлено, что повышение частоты и длительности импульсов при электроэрозионной обработке отверстий в оксидно-карбидной керамике приводит к увеличению диаметра и отклонений от формы отверстий, а также диаметра и высоты конуса на дне отверстия. Определена необходимость оптимизации электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике.

Ключевые слова: высокоплотная керамика, электроэрозионная обработка, электроимпульсный режим, точностные параметры, отклонение от формы, область повреждений.

введение

Э ксплуатационная надежность керамиче-ских изделий во многом зависит от вида и условий их обработки [1, 2]. Наиболее распространенная для их изготовления операция алмазного шлифования характеризуется экстремально высоким уровнем теплового и силового воздействия на обрабатываемую поверхность [3, 4]. Под действием этих нагрузок в поверхностном слое керамических изделий образуются многочисленные трещины и области локальных разрушений, которые крайне негативно влияют на эксплуатационные показатели изделий [5, 6]. Более того, выполнение отдельных технологических операций алмазной обработки при изготовлении керамических изделий крайне затруднено (например, сверление отверстий диаметром менее 0,5 мм) [7]. В совокупности эти обстоятельства определяют актуальность научных работ, ориентированных на поиск инновационных технологий изготовления керамических изделий сложной формы.

Одним из эффективных вариантов решения этой задачи является применение технологии электроэрозионной обработки (electrical discharge machining — EDM) [8]. К ее основным преимуществам следует отнести практическое

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

отсутствие силовых нагрузок при обработке, возможность обработки нежестким электродом-инструментом [9]. Высокая эффективность электроэрозионной обработки при сверлении отверстий малых диаметров в деталях из жаропрочных сплавов для газотурбинных двигателей убедительно доказана результатами ее промышленного применения [8]. Однако эта технология редко применяется для обработки деталей из высокоплотной керамики из-за технологических проблем, связанных с особенностями керамики как обрабатываемого материала [10]. Высокое электросопротивление и неоднородная структура керамики, которую формируют как токопроводящие зерна (например, карбид титана), так и зерна, не проводящие ток (например, оксид алюминия), не позволяют изготавливать высокоточные изделия [11, 12].

В этой связи возникает необходимость изучить влияние технологических режимов электроэрозионной обработки на точность керамических изделий и на этой основе сформулировать научно обоснованные рекомендации по оптимальному проектированию технологических процессов изготовления керамических изделий и назначению режимов обработки на каждой операции. Цель настоящей работы — исследование влияния технологических режимов электроэрозионной обработки на точностные параметры «глухих» отверстий малого диаметра в высокоплотной оксидно-карбидной керамике. Результаты исследования будут представлены в серии статей. В части 1 статьи изложена методика исследования и проанализировано влияние частоты и длительности импульсов на точностные параметры отверстий, в части 2 рассмотрено влияние напряжения пробоя, коэффициента усиления напряжения, силы пикового тока и рабочего напряжения, силы пикового тока и рабочего напряжения, а точностные параметры отверстий, в части 3 проанализировано влияние технологических режимов на размеры и морфологию области повреждений, образующейся на торцевой поверхности керамических образцов и примыкающей к отверстию.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Экспериментальные исследования проводили с использованием прецизионного электроэрозионного станка SARIX SA модели SX-200-HPM, Швейцария. Станок реализует электроимпульсный режим обработки, при котором воздействие ионного потока на поверхность заготовки, являющейся катодом, обеспечивает высокую скорость съема материала (в 8-10 раз превышает производительность электроискрового режима) в ущерб точности изделий. Съем материала с заготовки осуществляется в результате многочисленных дуговых разрядов в зазоре (рис. 1, а), заполненном рабочей жидкостью, между электродом-инструментом и заготовкой [9]. Каждый разряд является интенсивным источником теплоты, создающим тепловой поток в заготовку, который мгновенно нагревает локальную область материала. В результате нестационарного теплового нагрева происходят процессы плавления и испарения микрообъема материала с поверхности заготовки с образованием эрозионной лунки. Отвод продуктов эрозии и создание необходимого разряда обеспечивает рабочая жидкость. При сверлении отверстий электроду-инструменту придают два движения: вращательное v и поступательное S (см. рис. 1, *a*).

Общий вид прецизионного электроэрозионного станка показан на рис. 1. б. Станок оснащен высокочастотным генератором импульсов SX-HPS 1, ротационным шпинделем 2, блоком SX-CU 3 с программным обеспечением для управления электрическими цепями и механизмами контроля, а также панелью SX-MMI 4 для дистанционного мониторинга параметров обработки. В рабочую зону станка, ограниченную резервуаром, подавали деионизированную воду методом полива, которая затем очищалась от продуктов обработки фильтрующими элементами. В качестве электрода-инструмента использовали стержни из карбида вольфрама диаметром 0,3 и длиной 300 мм, которые



Рис. 1. Принципиальная схема электроимпульсного режима электроэрозионной обработки (*a*) и общий вид электроэрозионного станка (*б*)

устанавливали в ротационный шпиндель, оснашенный специальным зажимным устройством. Система автоматической подачи электрода-инструмента обеспечивает непрерывность процесса сверления и постоянную корректировку величины «вылета» электрода-инструмента из шпинделя при его износе в процессе обработки. В качестве обрабатываемого материала использовали заготовки размерами 20×20×5 мм из керамики BOK71 системы Al₂O₃ - TiC (твердость HRA 93-94, электросопротивление 0,4 Ом). Заготовки получали по технологии горячего прессования с последующим алмазным шлифованием всех поверхностей (шероховатость Ra = 0,1 мкм). Образец закрепляли в зажимном приспособлении на трехкоординатном рабочем столе.

Провели две серии экспериментов. В первой серии изменяли частоту импульсов f в диапазоне от 60 до 140 кГц, другие параметры были неизменными: длительность импульса $t_{\mu} = 5$ мкс, сила пикового тока I = 65 A, рабочее напряжение U = 120 В, энергия импульсов E = 0,105 Дж, напряжение пробоя $U_q = 80$ В, коэффициент усиления напряжения $k_u = 70$, глубина сверления *t* = 1 мм. Во второй серии экспериментов изменяли длительность импульсов t_и в диапазоне от 2 до 8 мкс, а другие параметры оставляли без изменения: $f = 120 \, \mathrm{k} \Gamma \mathrm{u}$, I = 65 А, U = 120 В, E = 0,105 Дж, $U_g = 80$ В, $k_u = 70, t = 0,5$ мм. Частота вращения инструмента-электрода во всех экспериментах была постоянной и составляла 600 об/мин; продольное перемещение (подача) S электрода-инструмента обеспечивалось станком в автоматическом режиме.

Для выявления параметров «глухого» отверстия в керамической заготовке, позволяющих идентифицировать точность электроэрозионной обработки, предварительно исследовали геометрию и морфологию поверхности отвер-



Рис. 2. Реальный профиль «глухого» отверстия после электроэрозионной обработки



Рис. 3. Иллюстрация методики определения точностных параметров «глухого» отверстия в заготовке из керамики ВОК71 при электроэрозионной обработке

стий и построили его типовой контур. При этом выявили 5 характерных участков на реальном профиле отверстий (рис. 2). На исходной торцевой поверхности керамических образцов формируется область повреждений 1 (от точки *a* до точки *b*), которая характеризуется многочисленными дефектами в виде кратеров эрозии и участками расплавленного материала. Далее образуется переходная область 2 (от точки *b* до точки *c*), которая имеет радиусную форму и образуется на пересечении торцевой поверхности заготовки с цилиндрической поверхностью отверстия. Эта область, имеющая очень дефектную структуру поверхности, распространяется на глубину 0,045–0,055 мм. Боковую поверхность отверстия образует «реальный» профиль 3 (от точки *c* до точки *e*), состоящий из конического (от точки *c* до точки *d*) и цилиндрического (от точки *d* до точки *e*) участков. Внутренняя торцевая поверхность «глухого» отверстия имеет сложный вид и образуется дном 4 (от точки *e* до точки *f*) и конусом 5 (от точки *f* до точки *g*), происхождение которого связано с износом торцевой поверхности электрода-инструмента.

Пля идентификации точности отверстий сложной формы использовали следующие параметры: диаметр отверстия $D_{\rm c}$, отклонение от круглости отверстия Δ_0 , отклонение профиля продольного сечения отверстия от цилиндрической поверхности Δ_{Π} , диаметр конуса d_{κ} , образованного на дне отверстия, высота конуса h, ширина области повреждений *l*. На рис. 3 показаны иллюстрации измерений этих параметров отверстия. Диаметр отверстия D_c определяли как среднее арифметическое четырех измерений диаметров реального профиля отверстия в плоскостях А-А, Б-Б, В-В и Г-Г, расположенных под углом 45° друг к другу (см. рис. 3, а). Отклонение Δ₀ (ГОСТ 24642) определяли как наибольшее расстояние от точек реального профиля отверстия до прилегающей окружности, вписанной в реальный профиль. Эти измерения выполняли в четырех плоскостях с применением оптического микроскопа «Olympus BX51M». Отклонение Δ_{π} (ГОСТ 24642) определяли как наибольшее расстояние между реальным и прилегающим профилями в четырех плоскостях А-А, Б-Б, В-В и Г-Г (см. рис. 3, б). Прилегающим профилем считали цилиндрическую поверхность, проходящую через точки с и *с*¹, расположенные на расстоянии 0,05 мм от торцевой поверхности керамической заготовки. Для определения значения Δ_п первоначально записывали профиль отверстия на приборе «MicroCAD premium» в четырех плоскостях. Затем на полученных профилограммах измеряли расстояния D_1 и D_2 между точками c и c^1 и k и k^1 соответственно. Измерения D_1 и D_2 производили на расстоянии 0,05 и 0,35 мм от торцевой поверхности керамической заготовки соответственно. Считали средние значения расстояний D_1 и D_2 , измеренных в четырех плоскостях, диаметрами прилегающего и реального профилей, а разницу между ними ($\Delta_{\pi} = D_1 - D_2$) — отклонением профиля продольного сечения отверстия.

Параметры d_{κ} и h также измеряли на профилограммах, полученных с использованием прибора «MicroCAD premium» в четырех плоскостях A-A, E-E, B-B и $\Gamma-\Gamma$ (см. рис. 3, б). В качестве *d*_к и *h* принимали средние значения измерений, произведенных в этих плоскостях. Замеры d_{κ} выполняли на расстоянии 0.45 мм от торцевой поверхности керамической заготовки, h измеряли между плоскостью дна отверстия и вершиной конуса. Показатель *l* определяли как расстояние между окружностями 1 и 2, описывающими поврежденную и переходную области соответственно (см. рис. 3, в). Измерения производили с использованием электронно-сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 3LMH с вольфрамовым катодом и термоэмиссией. На основании измерений значений *l* в четырех плоскостях А-А, Б-Б, В-В и Г-Г определяли среднее значение этого параметра.

Использование описанной методики позволило однозначно идентифицировать точностные параметры отверстий и исследовать влияние на них технологических режимов электроэрозионной обработки.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Результаты исследования влияния f на точностные параметры «глухих» отверстий в заготовках из оксидно-карбидной керамики ВОК71 показаны на рис. 4. С увеличением частоты импульсов в диапазоне $f = 60 \div 140$ кГц точность отверстий значительно ухудшается, причем в наименьшей степени это влияние проявляется на изменении D_c , а наиболее существенно — на отклонениях от формы отверстия. Наименьшее значение D_c зафиксировано при обработке с f = 60 кГц ($d_{\rm cp} = 0,405$ мм), а наибольшее — с f = 140 кГц ($d_{\rm cp} = 0,456$ мм). Выявлена линейная зависимость между f и D_c , причем повышение f с 60 до 140 кГц приводит к увеличению D_c на 11 %.

Более заметно влияет f на Δ_0 : с повышением f показатель Δ_0 увеличивается. Например, при f = 60 кГц Δ_0 отверстия составляет 16 мкм, а при f = 140 кГц увеличивается более чем в 2 раза и достигает 32 мкм. Установлено, что в наибольшей степени f влияет на показатель Δ_{π} . С повышением f в диапазоне от 60 до 140 кГц отклонение Δ_{π} увеличивается от 2,9 раза.

Результаты исследования влияния t_{μ} на точностные параметры «глухих» отверстий в заготовках из оксидно-карбидной керамики ВОК71 показаны на рис. 5, *а*. Видно, что с увеличением t_{μ} точность отверстий также уменьшается. Повышение t_{μ} с 2 до 8 мкс приводит к увеличению показателей D_c с 0,4 до 0,48 мм, Δ_0 с 14 до 48 мкм и Δ_{π} с 6 до 22 мкм. Таким образом, наибольшее влияние t_{μ} оказывает на Δ_0 и Δ_{π} (зафиксировано увеличение Δ_{π} в 3,7 раза), а наименьшее — на



Рис. 4. Влияние *f* на точностные параметры «глухого» отверстия в заготовке из керамики ВОК71 при электроэрозионной обработке



Рис. 5. Влияние t_{μ} на точностные параметры «глухого» отверстия (*a*) и геометрию дна «глухого» отверстия (*б*) в заготовке из керамики ВОК71 при электроэрозионной обработке

 $D_{\rm c}$ (в 1,2 раза). Значение $\Delta_{\rm n}$ увеличивается в 3,4 раза при повышении $t_{\rm u}$ с 2 до 8 мкс.

Влияние t_{μ} на геометрию дна отверстия показано на рис. 5, б. Установлено, что повышение t_{μ} с 2 до 8 мкс приводит к увеличению d_{κ} и h в 1,8 и 2,6 раза соответственно. С учетом связи этих параметров с состоянием торцевой поверхности электрода-инструмента можно отметить, что на ней формируется вогнутая фасонная поверхность, которая копируется на дне «глухого» отверстия. Интенсивность образования этого очага износа также связана с длительностью импульсов, причем в диапазоне $t_{\mu} = 2 \div 8$ мкс скорость износа электрода-инструмента в продольном направлении выше, чем в поперечном направлении.

Анализ влияния выявленных взаимосвязей *f* и *t*^µ на точностные параметры «глухого» отверстия в заготовке из керамики ВОК71 при электроэрозионной обработке показал, что все зависимости с высокой точностью описываются линейной функцией. Это значительно упрощает последующий поиск оптимальных технологических параметров сверления отверстий в заготовках из высокоплотной керамики.

Библиографический список

1. **Балыков, А. В.** Обработка деталей из хрупких неметаллических материалов алмазными кругами / А. В. Балыков, А. Б. Липатова // Технология металлов. — 2008. — № 10. — С. 44–49.

2. **Кузин, В. В.** Инструменты с керамическими режущими пластинами / *В. В. Кузин.* — М. : Янус-К, 2006. — 160 с.

3. **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 high-refractory ceramic parts based on silicon nitride / *V. V. Kuzin* // Refractories and Industrial Ceramics. — 2006. — Vol. 47, № 4. — P. 204–208.

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

5. *Kuzin, V. V.* A model of forming the surface layer of ceramic parts based on silicon nitride in the grinding process / *V. V. Kuzin* // Key Engineering Materials. — 2012. — Vol. 496. — P. 127–131.

6. **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.

7. Балыков, А. В. Алмазное сверление отверстий в деталях из хрупких неметаллических матери-

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что частота f и длительность импульсов t_{μ} значительно влияют на точность «глухих» отверстий в заготовках из оксидно-карбидной керамики ВОК71. При $f = 60 \div 140$ кГц D_c увеличивается на 11%, а Δ_0 и Δ_{π} — в 2,0 и 2,9 раза соответственно. Длительность импульса t_{μ} оказывает более значимое влияние на точностные параметры «глухого» отверстия. В диапазоне $t_{\mu} =$ $= 2 \div 8$ мкс зафиксировано увеличение D_c , Δ_0 , Δ_{π} , d_{κ} и h в 1, 2; 3,4; 3,7; 1,8 и 2,6 раза соответственно.

Полученные результаты указывают на необходимость оптимизации технологических параметров электроэрозионной обработки, используемой для отверстий малого диаметра в деталях из высокоплотной керамики для обеспечения их точности.

* * *

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России при выполнении научноисследовательской работы в рамках государственного задания.

алов / *А. В. Балыков.* — М. : Наука и технологии, 2003. — 187 с.

8. *Елисеев, Ю. С.* Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, А. А. Митрофанов [и др.]. — М.: Дрофа, 2002. — 656 с.

9. **Фатеев, Н. К.** Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фатеев. — Л. : Машиностроение, 1990. — 290 с.

10. 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. Вып. 4. — 1989. — 62 с.

11. *Muttamara, A.* Probability of precision micromachining of insulating Si₃N₄ ceramics by EDM / *A. Muttamara, Y. Fukuzawa, N. Mohri //* Journal of Materials Processing Technology. – 2003. – Vol. 14. – P. 243–247.

12. **Bhattacharyya**, **B.** Experimental investigations into electrochemical discharge machining (ECDM) of non-conductive ceramic materials / *B. Bhattacharyya*, *B. N. Doloi*, *S. K. Sorkhel* // Journal of Materials Processing Technology. — 1999. — Vol. 9. — P. 145–154. ■

Получено 21.04.14 © С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Тибор Салаи, Балаж Фаркаш, 2014 г.