

Д. т. н. В. В. Кузин¹ (✉), 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 2*

Изучены технологические особенности микрообработки керамических заготовок с использованием электроэрозионного фрезерования. Установлено влияние длительности импульсов, напряжения пробоя, коэффициента усиления напряжения, силы пикового тока и рабочего напряжения при электроэрозионном фрезеровании заготовок из керамики ВОК71 на шероховатость дна паза и торцевой износ электрода-инструмента. Предложен механизм формирования поверхностей при электроэрозионном фрезеровании высокоплотной токопроводящей керамики и сформулированы рекомендации по повышению эффективности микрообработки деталей из этого материала.

Ключевые слова: микрообработка, керамика, электроэрозионное фрезерование, шероховатость, износ.

ВВЕДЕНИЕ

Динамичное увеличение потребления керамических деталей обуславливает необходимость поиска эффективных технологий их окончательного формообразования, учитывающих постоянно возрастающие требования к их качеству [1]. Наряду с совершенствованием алмазного шлифования, имеющего многочисленные ограничения при изготовлении керамических микродеталей, все большее внимание уделяется развитию технологии их электроэрозионной обработки [2–9]. Появление электроэрозионных станков повышенной точности и производительности, снижение интенсивности износа электрода-инструмента и разработка оригинальных схем формообразования наружных и внутренних поверхностей деталей значительно расширяют возможности и повышают актуальность этой технологии для изготовления керамических микродеталей. Однако сложность и стохастичность эрозионного эффекта затрудняют разработку научно обоснованных рекомендаций по выбору рациональных режимов электроэрозионной обработки.

В работе [10] предпринята попытка решения этой задачи применительно к процессу

электроэрозионного фрезерования заготовок из керамики ВОК71. В частности, выявлено влияние частоты импульсов на качество обработанных поверхностей и износ электрода-инструмента. В настоящей работе продолжены эти исследования. Их цель — изучить влияние длительности импульсов, напряжения пробоя, коэффициента усиления напряжения, силы пикового тока и рабочего напряжения при электроэрозионном фрезеровании пазов в заготовках из высокоплотной токопроводящей керамики на шероховатость дна паза и износ электрода-инструмента.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Базовые положения методики экспериментальных исследований подробно изложены в [10]. В настоящем исследовании использовали однофакторное планирование экспериментов, в соответствии с которым проведено пять серий экспериментов. В каждой серии изменяли значения одного параметра режима электроэрозионного фрезерования (рабочее напряжение U , напряжение пробоя U_g , коэффициент усиления напряжения k_u , длительность импульса t_i и силу пикового тока I) в определенном диапазоне при неизменных других параметрах. Параметры режимов электроэрозионного фрезерования пазов для экспериментов 1–5 приведены в таблице. При их проведении измеряли шероховатость дна обработанного паза и фиксировали величину торцевого износа электрода-инструмента. Структуру и химический состав обработанной поверхности исследовали с помощью сканирующей

* Часть 1 опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 3 за 2016 г.



В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

Параметры режима электроэрозионного фрезерования

Эксперимент	Изменяемые параметры режима	Неизменяемые параметры режима
1	$U = 90 \div 160$ В	$f = 120$ кГц, $t_n = 5$ мкс, $U_g = 80$ В, $k_u = 700$, $I = 65$ А
2	$U_g = 20 \div 100$ В	$f = 120$ кГц, $t_n = 5$ мкс, $k_u = 700$, $I = 65$ А, $U = 120$ В
3	$k_u = 100 \div 1000$	$f = 120$ кГц, $t_n = 5$ мкс, $U_g = 80$ В, $I = 65$ А, $U = 120$ В
4	$t_n = 3 \div 7$ мкс	$f = 120$ кГц, $U_g = 80$ В, $k_u = 700$, $I = 65$ А, $U = 120$ В
5	$I = 20 \div 100$ А	$f = 120$ кГц, $t_n = 5$ мкс, $U_g = 80$ В, $k_u = 700$, $U = 120$ В

шего электронного микроскопа TESCAN VEGA 3LMH.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Влияние параметров режима электроэрозионного фрезерования на шероховатость Ra дна обработанного паза и торцевой износ t_r электрода-инструмента при электроэрозионном фрезеровании заготовок из керамики ВOK71 показано на рис. 1.

Установлено, что при увеличении U в диапазоне 90–160 В, U_g в диапазоне 20–100 В и k_u в диапазоне 100–1000 качество поверхности дна паза улучшается. Параметр Ra уменьшается от 3,2 до 2,3 (см. рис. 1, а), от 2,7 до 1,6 (см. рис. 1, б) и от 4,7 до 1,8 мкм (см. рис. 1, в) при увеличении U , U_g и k_u соответственно. При повышении t_n в диапазоне 3–7 мкс и I в диапазоне 20–100 А качество поверхности дна паза ухудшается. Параметр Ra возрастает от 4,2 до 4,9 (см. рис. 1, з) и от 2,3 до 3,7 мкм (см. рис. 1, д) при увеличении t_n и I соответственно. Следует отметить, что влияние этих параметров режима электроэрозионного фрезерования на шероховатость базовой поверхности паза значительно меньше. Наибольшее значение шероховатости Ra этой поверхности во всех экспериментах составляло 1,4 мкм, наименьшее — 1,1 мкм.

Влияние параметров режима электроэрозионного фрезерования керамических заготовок на торцевой износ электрода-инструмента является однозначным — их возрастание приводит к увеличению износа. Износ t_r увеличивается от 1,5 до 5,8 мкм (см. рис. 1, а), от 1,1 до 4,8 мкм (см. рис. 1, б), от 1,2 до 2,8 мкм (см. рис. 1, в), от 1,3 до

6,1 мкм (см. рис. 1, з) и от 1,2 до 5,4 мкм (см. рис. 1, д) при возрастании U от 90 до 160 В, U_g от 20 до 100 В, k_u от 100 до 1000, t_n от 3 до 7 мкс и I от 20 до 100 А соответственно.

Столь значительное влияние параметров режима электроэрозионного фрезерования на шероховатость дна обработанного паза и износ электрода-инструмента связано со сложным комплексом физико-химических процессов, протекающих в поверхностных слоях электродов (заготовка и инструмент). В этих процессах, определяющих механизм формирования обработанных поверхностей при электроэрозионном фрезеровании, выделены две стадии. На первой стадии происходит снятие припуска с керамической заготовки под действием электрических разрядов, на второй окончательно формируются структура и морфология дна паза с образованием многочисленных наплывов на базовой поверхности. Следует отметить, что эти стадии протекают одновременно и являются неразрывными, а их выделение позволяет детально проанализировать и описать сложный комплекс процессов. Проанализируем комплекс этих процессов с использованием теории электроэрозионного эффекта [11–15].

Снятие припуска с керамической заготовки (первая стадия) начинается в момент сближения электрода-инструмента с керамической заготовкой на величину торцевого зазора, при котором возникают единичные электрические разряды, «блуждающие» между электродами. Под их действием начинаются процессы испарения, плавления и разрушения микрообъемов материалов заготовки и электрода-инструмента. Ре-

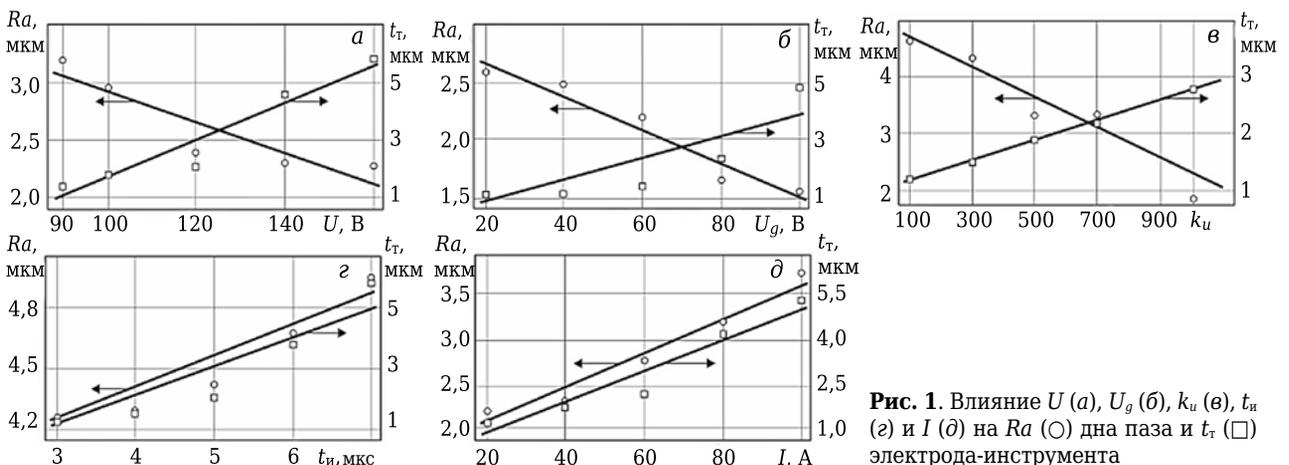


Рис. 1. Влияние U (а), U_g (б), k_u (в), t_n (з) и I (д) на Ra (○) дна паза и t_r (□) электрода-инструмента

зультат этого процесса — появление множества эрозионных лунок на поверхностях заготовки и электрода-инструмента и формирование типового морфологического рисунка на базовой поверхности дна паза.

Базовая поверхность дна пазов, изготовленных при разных режимах, имеет типовой морфологический рисунок (рис. 2, а). Основным признаком морфологии этой поверхности являются многочисленные и хаотично расположенные эрозионные лунки 1 (рис. 2, б), между которыми располагаются участки, имеющие «щербатый» вид из-за множества мелких кратеров 2 с острыми верхними кромками. Форма эрозионных лунок и отсутствие каких-либо направленных следов обработки не позволяют определить направление перемещения керамической заготовки относительно электрода-инструмента. Дополняют этот морфологический рисунок большое число кратеров 3 с воронкообразными оплавленными краями размерами до 5 мкм и частицы эродированного материала 4 вытянутой формы, осевшие на обработанную поверхность. На этой поверхности имеются также единичные трещины 5 (рис. 2, в), образовавшиеся в слое расплавленного материала при его охлаждении. На этот типовой морфологический рисунок не оказывают значимого влияния режимы электроэрозионного фрезерования, за исключением размеров эрозионных лунок, которые несколько увеличиваются при возрастании параметров режима обработки.

Образование наплывов (вторая стадия) начинается в межэлектродном пространстве, размеры которого характеризуются торцевыми и боковыми зазорами между соответствующими поверхностями электрода-инструмента и заготовки. Размеры этих зазоров зависят от многих факторов, в том числе от режима обработки и объема удаленного материала с заготовки и электрода-инструмента. Материал, эродированный с поверхностей заготовки и электрода-инструмента, попадает в рабочую жидкость, заполняющую межэлектродное пространство.

При этом рабочая жидкость превращается в более сложную по составу межэлектродную среду из-за присутствия продуктов эрозии в виде газовых пузырей, капель расплавленного материала и твердых частиц.

Все эти элементы межэлектродной среды могут быть образованы соединениями, входящими в состав керамики или электрода-инструмента, а также новыми соединениями, полученными в результате их взаимодействия [16]. Наиболее часто элементы межэлектродной среды представлены в виде капель расплавленного материала и частиц неправильной формы со следами оплавления [17]. На эти частицы могут осаждаться мелкие капли, образовавшиеся из паровой фазы [18]. Большой объем продуктов эрозии «вымывается» из межэлектродного пространства, а их меньшая часть остается практически в замкнутом пространстве [19]. «Неактивные» твердые частицы, выведенные из межэлектродного пространства, без задержки транспортируются рабочей жидкостью из зоны обработки. «Активные» капли расплавленного материала после выхода из межэлектродного пространства осаждаются на дне паза с постепенным образованием наплывов. На характер этого процесса, а также на структуру и размеры наплывов существенно влияют параметры режима обработки, интенсивность износа электрода-инструмента и давление рабочей жидкости. В качестве примера на рис. 3 показаны микрофотографии, характеризующие влияние величины торцевого износа электрода-инструмента на структуру и морфологию поверхности наплывов, образовавшихся на дне паза.

На основе детального исследования структуры и морфологии поверхности наплывов выделили три их вида, образующихся при электроэрозионном фрезеровании пазов в заготовках из высокоплотной токопроводящей керамики. Наплывы первого вида образуются при режимах, при которых торцевой износ электрода-инструмента имеет наименьшее значение. На рис. 3, а показан фрагмент паза, обработанного

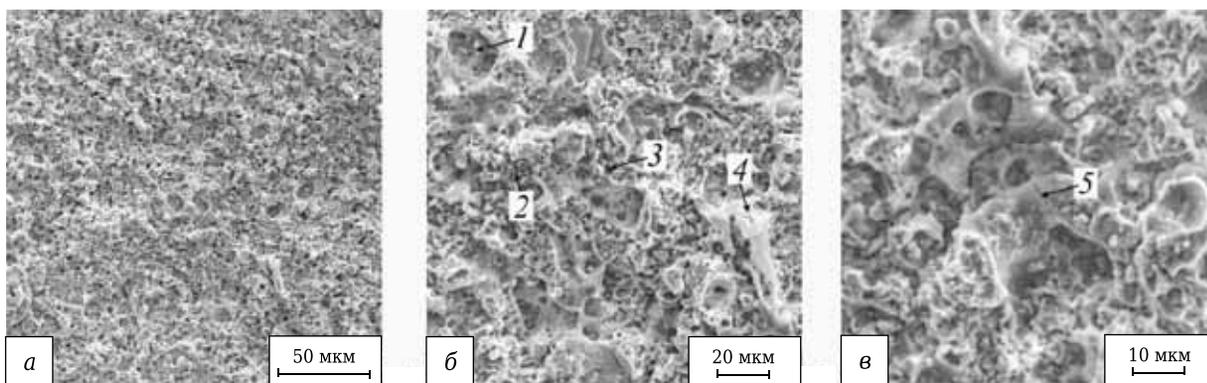


Рис. 2. Типовой морфологический рисунок базовой поверхности дна паза после электроэрозионного фрезерования

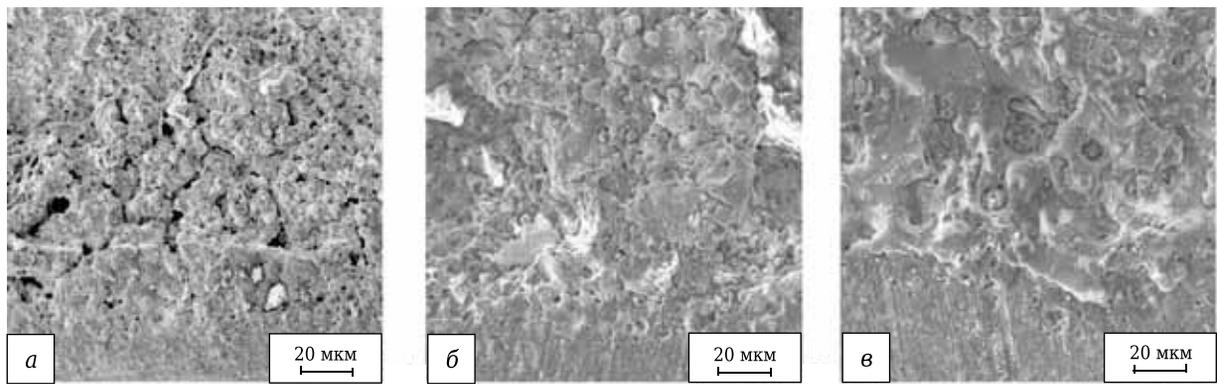


Рис. 3. Морфология поверхности напльвов при износе электрода-инструмента: $t_r = 1,1$ мкм (а); $t_r = 2,1$ мкм (б); $t_r = 5,8$ мкм (в)

при режиме $U = 120$ В, $I = 60$ А, $f = 120$ кГц, $U_g = 40$ В, $t_{и} = 5$ мкс и $k_u = 700$; $t_r = 1,1$ мкм. Видно, что образовавшиеся напльвы состоят из четко выраженных фрагментов неправильной формы размерами до 60 мкм, разделенными глубокими вытянутыми порами шириной до 5 мкм. Эти фрагменты сформированы округлыми гранулами из спекшихся микрочастиц керамики и имеют пористую структуру. На их поверхности имеются многочисленные мелкие поры размерами до 3 мкм и отдельные крупные поры неправильной формы размерами до 15 мкм. Анализ химического состава этих напльвов показал присутствие в них вольфрама в количестве до 0,12 % (в керамических образцах вольфрам отсутствовал).

Напльвы второго вида образуются при режимах, при которых износ электрода-инструмента имеет средние значения. На рис. 3, б показан фрагмент паза, обработанного при режиме $U = 120$ В, $I = 65$ А, $f = 120$ кГц, $U_g = 80$ В, $t_{и} = 5$ мкс и $k_u = 700$; $t_r = 2,1$ мкм. Напльвы этого вида имеют плотную слоистую структуру, а морфология их поверхности характеризуется оплавленными выступами, которые разделены извилистыми впадинами шириной до 5 мкм и длиной до 25 мкм. В области контакта напльва с боковой поверхностью паза образуются многочисленные эрозионные кратеры диаметром 5–10 мкм с оплавленными краями, причем отдельные кратеры образуются на исходной шлифованной поверхности. Анализ химического состава напльвов показал присутствие в них вольфрама в количестве до 0,65 %, что более чем в 5 раз выше, чем в напльвах первого вида.

Напльвы третьего вида образуются при режимах, при которых торцевой износ электрода-инструмента имеет наибольшее значение ($t_r = 5,8$ мкм). На рис. 3, в показан фрагмент паза, обработанного при режиме $U = 160$ В, $I = 65$ А, $f = 120$ кГц, $U_g = 80$ В, $t_{и} = 5$ мкс и $k_u = 700$. Напльвы этого вида характеризуются плотной структурой с весьма развитым рельефом и многочисленными участками, образованными

расплавленным материалом. Морфология напльвов этого вида свидетельствует о крайне высоких температурах в момент их образования. На поверхности напльвов имеются неглубокие вытянутые углубления неправильной формы со сглаженными краями и кратеры круглой формы диаметром 10 мкм. Поверхность напльвов пронизана сеткой трещин термического происхождения, траектория роста которых связана с расположением кратеров. На участках контакта напльва с боковой поверхностью паза расплавленный материал «выплескивается» на исходную шлифованную поверхность керамического образца с образованием гребня высотой до 5 мкм. Анализ химического состава напльвов этого вида показал присутствие в них вольфрама в количестве до 1,3 %, что на порядок больше, чем в напльвах первого вида, и в 2 раза больше, чем в напльвах второго вида.

Анализ полученных результатов позволяет отметить особую роль вольфрама, эродировавшегося с электрода-инструмента, в механизме образования напльвов. Насыщение вольфрамом межэлектродной среды и его взаимодействие с продуктами эрозии керамической заготовки приводит к образованию активных соединений. В зависимости от содержания вольфрама в межэлектродной среде образуются соединения разного состава, которые в конечном итоге определяют структуру и морфологию поверхности напльвов. С увеличением содержания вольфрама ускоряется процесс осаждения конденсированной фазы, выводимой из межэлектродного пространства, а структура напльвов становится более плотной, что подтверждается результатами элементного химического состава.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате экспериментальных исследований выявлено влияние длительности импульсов, напряжения пробоя, коэффициента усиления напряжения, силы пикового тока и рабочего напряжения при электроэрозионном фрезеровании

пазов в заготовках из керамики ВОК71 на шероховатость дна паза и торцевой износ электрода инструмента. Установлено, что при увеличении U , U_g и k_u шероховатость Ra уменьшается в 1,2, 1,69 и 2,6 раза соответственно. При увеличении t_n и I шероховатость Ra возрастает в 1,17 и 1,61 раз соответственно. При повышении U от 90 до 160 В, U_g от 20 до 100 В, k_u от 100 до 1000, t_n от 3 до 7 мкс и I от 20 до 100 А износ t_r увеличивается в 3,87, 4,36, 2,33, 4,69 и 4,5 раза соответственно.

Предложен механизм формирования поверхностей при электроэрозионном фрезеровании высокоплотной токопроводящей керамики. Анализ этого механизма позволил сформулировать

Библиографический список

1. **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.

2. **Абляз, Т. П.** Особенности электроэрозионной обработки мелкогабаритных деталей / Т. П. Абляз, А. М. Ханов, В. В. Севастьянов // Вестник Самарского научного центра РАН. — 2011. — Т. 13 (4). — С. 935–938.

3. **Puertas, I.** A study on the electrical discharge machining of conductive ceramics / I. Puertas, C. J. Luis // Journal of Materials Processing Technology. — 2004. — № 153/154. — С. 1033–1038.

4. **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.

5. **Ferraris, E.** Micro-EDM process investigation and comparison performance of Al_2O_3 and ZrO_2 based ceramic composites / E. Ferraris, D. Reynaerts, B. Lauwers // CIRP Annals — Manufacturing Technology. — 2011. — Vol. 60. — P. 235–238.

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

7. **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. — P. 330–334.

8. **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. — P. 469–472.

9. **Григорьев, С. Н.** Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого

рекомендации по повышению эффективности микрообработки керамических деталей, заключающиеся в необходимости структурирования процесса электроэрозионного фрезерования за счет разделения обработки на черновые и чистовые проходы, а также увеличения давления рабочей жидкости, подаваемой в зону обработки.

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

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. — P. 540–544.

10. **Кузин, В. В.** Микрообработка высокоплотной токопроводящей керамики с использованием электроэрозионного фрезерования. Часть 1 / В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Тибор Салаи, Балаж Фаркаш // Новые огнеупоры. — 2016. — № 3. — С. 153–158.

11. **Золотых, Б. Н.** О физической природе электронной обработки металлов // Сб. тр. ЦНИЛ-Электром; под ред. Б. П. Лазаренко / Б. Н. Золотых. — М.: Изд-во АН СССР, 1957. — С. 38–69.

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

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

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

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

16. **Фотеев, Н. К.** Технология электроэрозионной обработки / Н. К. Фотеев. — М.: Машиностроение, 1980. — 184 с.

17. **Самсонов, Г. В.** Закономерности, определяющие износ катода при электроискровой обработке металлов / Г. В. Самсонов, И. М. Муха // Электронная обработка материалов. — 1961. — № 3. — С. 17–24.

18. **Самсонов, Г. В.** О выборе материала электродов для электроискровой обработки / Г. В. Самсонов, И. М. Муха, А. Н. Крушинский // Электронная обработка материалов. — 1966. — № 1. — С. 28–32.

19. **Саушкин, Б. П.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Б. П. Саушкин. — М.: Дрофа, 2002. — 655 с. ■

Получено 20.04.16

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