

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 3*

Изучено влияние технологических режимов электроэрозионной обработки на состояние и дефектность поверхностей «глухих» отверстий малого диаметра в деталях из оксидно-карбидной керамики. Определена физическая картина формирования этих поверхностей и проанализирована их морфология поврежденного слоя с описанием поверхностных дефектов. Установлено, что интенсификация технологических режимов электроэрозионного сверления отверстий в керамике приводит к увеличению ширины области повреждений.

Ключевые слова: керамика, электроэрозионная обработка, область повреждений, морфология, дефект.

ВВЕДЕНИЕ

Состояние поверхностного слоя керамики после обработки значительно влияет на эксплуатационные характеристики деталей [1, 2]. Для обеспечения высокой надежности деталей их обработанные поверхности должны иметь низкий уровень дефектности, который можно обеспечить за счет рационального построения технологического процесса [3, 4]. При этом выбор финишной операции при изготовлении керамических деталей должен обеспечить удаление дефектного слоя, сформированного на предыдущей операции. Однако отсутствие в литературе данных о влиянии электроэрозионной обработки на состояние и дефектность поверхностей отверстий в деталях из высокоплотной керамики не позволяет сформулировать требования к проектируемому технологическому процессу. Этот недостаток обусловил проведение обширных экспериментальных исследований. Их цель — исследовать влияние технологических режимов электроэрозионного сверления на состояние и дефектность поверхностей «глухих» отверстий малого диаметра в деталях из оксидно-карбидной керамики.

* Окончание. Часть 1 статьи опубликована в журнале «Новые огнеупоры» № 7 за 2014 г., часть 2 — в № 9 за 2014 г.

✉
В. В. Кузин
E-mail: kyzena@post.ru

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

Для достижения поставленной цели провели комплексные исследования, методика которых подробно описана в статьях [5, 6]. Технологические режимы электроэрозионной обработки изменяли в следующих диапазонах: частота импульсов $f = 60 \div 140$ кГц, длительность импульсов $t_{\text{и}} = 2 \div 8$ мкс, напряжение пробоя $U_g = 40 \div 100$ В, коэффициент усиления напряжения $k_u = 10 \div 100$, сила пикового тока $I = 20 \div 50$ А и рабочее напряжение $U = 90 \div 160$ В. В каждой серии экспериментов изменяли значения одного параметра, а другие оставляли неизменными. 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. Исследования выполняли с использованием электронно-сканирующего микроскопа TESCAN VEGA 3LMN с вольфрамовым катодом и термоэмиссией.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Под воздействием сложных и скоротечных физико-химических процессов при электроэрозионном сверлении «глухих» отверстий малого диаметра формируются новые поверхности, морфология и дефектность которых существенно отличаются друг от друга. Более того, внешний вид этих поверхностей не связан со структурой керамики и не похож на предварительно обработанную торцевую поверхность керамики.

ческих заготовок. К этим поверхностям отнесены: 1 — боковая (внутренняя) поверхность отверстия от точки *c* до точки *d* (рис. 1, *a*); 2 — переходная область от точки *b* до точки *c* и 3 — область повреждений (от точки *a* до точки *b* (рис. 1, *б*).

Общими признаками морфологии этих поверхностей являются присутствие тонкой пленки расплавленной керамики и большое число перекрывающихся лунок и выступов, имеющих практически сферическую форму. При этом каждая из этих поверхностей имеет собственные отличительные признаки, определяемые коэффициентом взаимного перекрытия лунок и степенью дефектности. Последовательно проанализируем отличительные признаки каждой из этих поверхностей.

Боковая (внутренняя) поверхность отверстия имеет весьма развитый рельеф, сформированный многочисленными выступами и лунками, имеющими размер до 10 мкм (см. рис. 1, *a*). В поверхностном слое керамики имеются многочисленные дефекты в виде микротрещин и пор размерами от 2 до 10 мкм. Глубина измененного слоя составляет 5–20 мкм и зависит от режима прошивки отверстия.

Переходная область, имеющая условно радиусную форму, образуется на пересечении торцевой поверхности заготовки с цилиндрической поверхностью отверстия и распространяется на глубину 0,045–0,055 мм от торцевой поверхности заготовки (рис. 2, *a*). Особенностью морфологии этой поверхности являются многочисленные раковины, расположенные по периметру отверстия и соединенные в кольцевые полости шириной до 30 мкм. Эти дефекты имеют сглаженный рельеф и глубоко проникают в поверхность керамики от торцевой поверхности заготовки в направлении боковой (внутренней) поверхности отверстия (рис. 2, *б*). В непосредственной близости от этих дефектов выявлены многочисленные микротрещины, образовавшиеся в пленке расплавленной керамики.

Морфология поверхности области повреждений на торцевой (исходной) поверхности керамических заготовок сильно отличается от

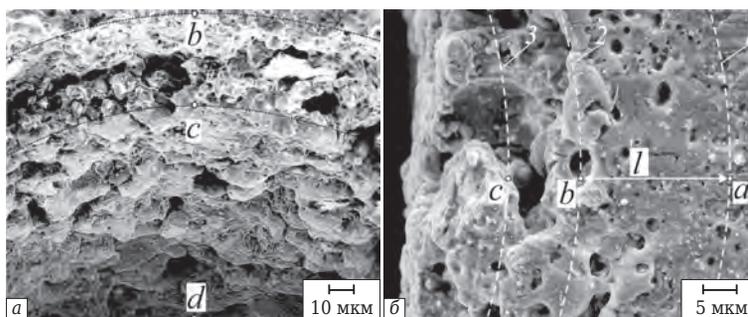


Рис. 1. Общий вид поверхностей отверстия в керамической заготовке после электроэрозионного сверления

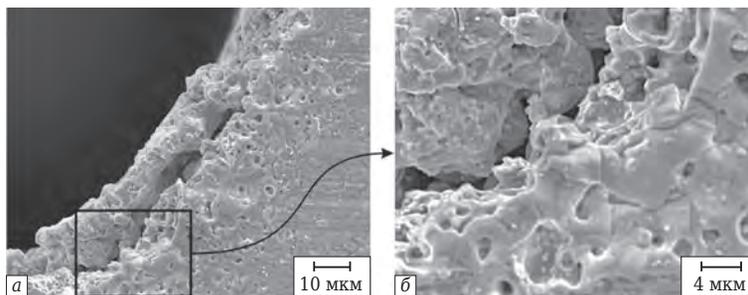


Рис. 2. Морфология поверхности переходной области «глухого» отверстия в керамической заготовке после электроэрозионного сверления

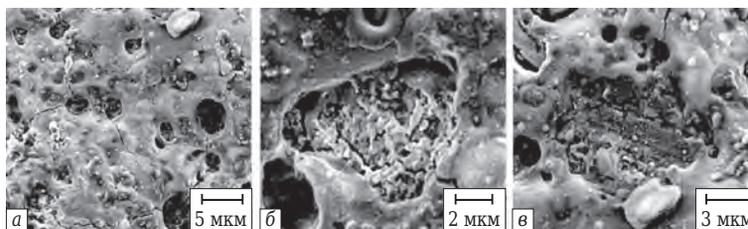


Рис. 3. Морфология поверхности области повреждений «глухого» отверстия в керамической заготовке после электроэрозионного сверления

исходной поверхности керамической заготовки (рис. 3). В общем случае состояние поверхности этой области характеризуется присутствием тонкой пленки неравномерной толщины, образование которой связано с плавлением керамики при электрическом разряде и последующим охлаждением. В непосредственной близости от отверстия торцевая поверхность керамической заготовки полностью покрыта этой тонкой пленкой. На внешней границе области повреждений пленка образуется только на отдельных и не связанных между собой участках поверхности.

В результате детального исследования поверхности области повреждений установлено, что в тонкой пленке имеются многочисленные дефекты в виде трещин, лунок и кратеров разных размеров (см. рис. 3, *a*). Образовавшиеся трещины пронизывают этот тонкий слой, кон-

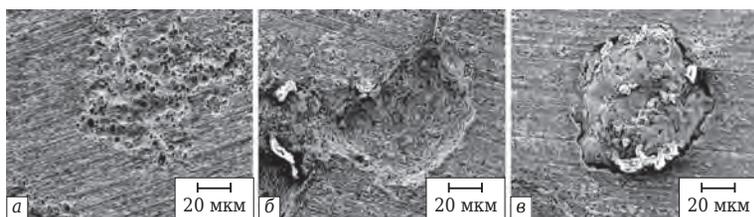


Рис. 4. Разновидности локальных очагов эрозии на поверхности керамики

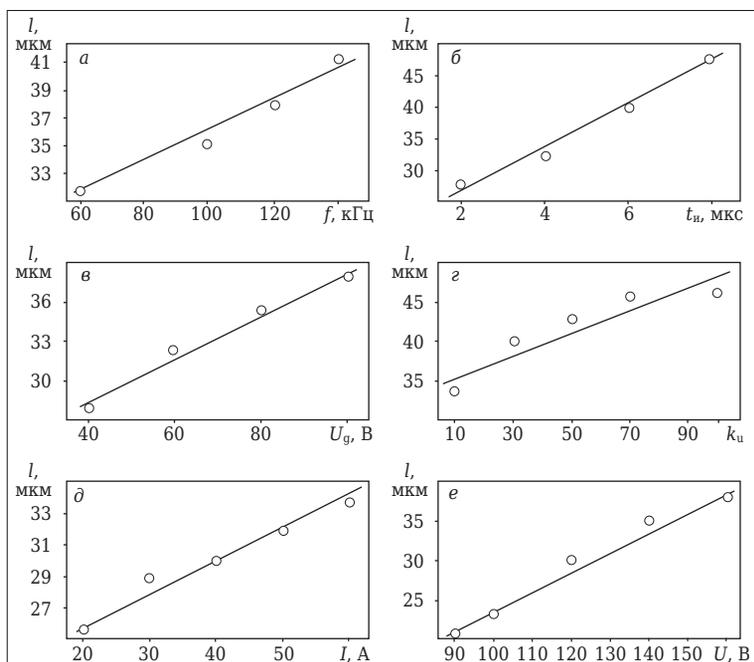


Рис. 5. Влияние технологических режимов на ширину l области повреждений: а — $t_{и} = 5$ мкс, $I = 65$ А, $U = 120$ В, $E = 0,105$ Дж, $U_g = 80$ В, $k_{и} = 70$; б — $f = 120$ кГц, $I = 65$ А, $U = 120$ В, $E = 0,105$ Дж, $U_g = 80$ В, $k_{и} = 70$; в — $f = 120$ кГц, $t_{и} = 5$ мкс, $I = 65$ А, $U = 120$ В, $E = 0,105$ Дж, $k_{и} = 70$; г — $f = 120$ кГц, $t_{и} = 5$ мкс, $I = 65$ А, $U = 120$ В, $E = 0,105$ Дж, $U_g = 80$ В; д — $f = 120$ кГц, $t_{и} = 5$ мкс, $U = 120$ В, $E = 0,105$ Дж, $U_g = 80$ В, $k_{и} = 70$; е — $f = 120$ кГц, $t_{и} = 5$ мкс, $I = 65$ А, $E = 0,105$ Дж, $U_g = 80$ В, $k_{и} = 70$

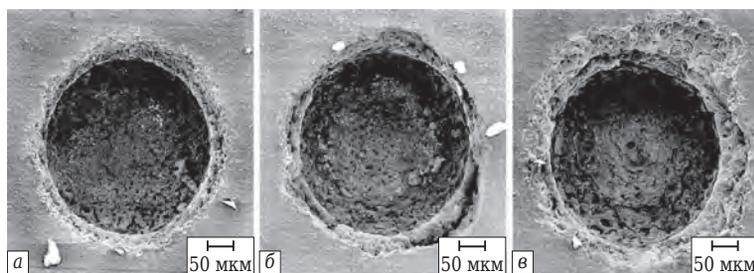


Рис. 6. Классификация «глухих» отверстий малого диаметра, полученных электроэрозионным сверлением керамической заготовки

центрируется вокруг лунок и кратеров, стохастично развиваются в разных направлениях. В одних случаях трещины растут от лунки, создавая замкнутую трещиноватую структуру. В других случаях траектория роста трещины проходит мимо нескольких лунок

(кратеров) и замыкается на лунке, которая значительно удалена от лунки, из которой трещина начала развитие. Природу появления этих трещин можно объяснить термическими напряжениями в тонком слое керамики, которые образуются при быстром нагреве ее поверхности и последующем резком охлаждении в среде рабочей жидкости [7–9].

Лунки, образовавшиеся на этой поверхности, имеют округлую форму размерами от 2 до 6 мкм. На дне кратеров, размеры которых превышают 20 мкм, хорошо просматриваются исходная структура керамики и отдельные микротрещины (см. рис. 3, б). На некоторых участках этой структуры зерна керамики имеют оплавленные края. Края кратеров имеют сглаженные формы. В пленке имеются изолированные участки исходной поверхности керамической заготовки с рисками от алмазных зерен, образованными на операции шлифования (см. рис. 3, в). По мере удаления от отверстия число этих участков и их размеры увеличиваются, и в непосредственной близости от внешней границы этой области картина резко меняется — на исходной поверхности керамики наблюдаются отдельные участки, покрытые тонкой пленкой. Внешняя граница области повреждений на торцевой (исходной) поверхности керамических заготовок имеет весьма нестабильный характер. Одна из причин этой нестабильности — образование локальных очагов эрозии. Наиболее характерные виды этих очагов показаны на рис. 4.

Наиболее часто фиксируются очаги поверхностного оплавления керамики с многочисленными порами, имеющие неправильную форму и нестабильные размеры (см. рис. 4, а). Эти очаги отделены от области повреждений поверхно-

стью, которая не подвержена каким-либо изменениям. Также часто образуются лунки эрозии значительных размеров и глубины, которые соединены с областью повреждений «перешейком» (см. рис. 4, б). В отдельных случаях формируются очаги эрозии, внешний вид которых

напоминает каплю расплавленной керамики, вплавленную в исходную поверхность заготовки (см. рис. 4, в). Эта капля имеет четкую границу в виде глубокой полости по ее периметру. Образование этих дефектов на поверхности керамики можно связать с ее неоднородной структурой, которую формируют соединения с разными токопроводимостью, теплопроводностью и температурой плавления.

Установлено, что технологические режимы электроэрозионной обработки влияют на морфологию всех этих поверхностей, однако в наибольшей степени это влияние относится к области повреждений. Результаты исследования влияния технологических режимов на ширину l (среднее расстояние между окружностями 1 и 2, описывающими внешние границы поврежденной и переходной областей соответственно по результатам замеров в четырех плоскостях; см. рис. 1, б) области повреждений, образовавшейся при сверлении «глухих» отверстий в заготовках из оксидно-карбидной керамики ВОК71, показаны на рис. 5. Видно, что с увеличением значений всех технологических режимов ширина поврежденной зоны увеличивается, однако степень влияния каждого параметра заметно различается. Последовательно проанализируем эти зависимости.

С увеличением частоты импульсов f в диапазоне $f = 60 \div 140$ кГц значение l повышается с 31,7 до 41,2 мкм (см. рис. 5, а). В большей степени на значение l влияет длительность импульсов $t_{и}$, увеличение которой с 2 до 8 мкс приводит к повышению l с 27,5 до 47,5 мкм (см. рис. 5, б). При росте напряжения пробоя U_g в диапазоне от 40 до 100 В значение l возрастает с 27 до 39 мкм (см. рис. 5, в). Увеличение значения l с 34 до 46 мкм зафиксировано при росте коэффициента усиления напряжения k_u с 10 до 100 (см. рис. 5, г). С увеличением силы пикового тока I от 20 до 60 А значение l повышается с 25,6 до 33,8 мкм (см. рис. 5, д). Наибольшее влияние на значение l оказывает рабочее напряжение U : при $U = 90$ В зафиксировано минимальное значение $l = 20,7$ мкм, а при $U = 160$ В $l = 38$ мкм (см. рис. 5, е). Все полученные зависимости с высокой точностью описываются линейной функцией.

На основании анализа морфологии и дефектности поверхностей, образовавшихся при электроэрозионном сверлении отверстий в керамике, классифицировали три типа отверстий, различающихся следующими признаками. В качестве первого признака использовали уровень дефектности керамики в переходной области, а в качестве второго — стабильность формы внешней границы области поврежде-

ний. Первый тип отверстия отличается стабильным контуром внешней границы области повреждений и присутствием прерывистых полостей неглубокого проникновения в переходной области (рис. 6, а). Второй тип отверстия определяется нестабильным контуром внешней границы области повреждений и присутствием практически непрерывной цепи полостей значительных размеров, глубоко проникающих в керамику (рис. 6, б). Третий тип отверстий определяется крайне нестабильным контуром внешней границы области повреждений, а также присутствием непрерывной цепи полостей и локальных разрушений в переходной области (рис. 6, в).

Столь сложное состояние обработанных поверхностей, образовавшихся в результате электроэрозионного сверления отверстий в керамической заготовке, и существенное влияние технологических режимов на их морфологию и дефектность можно объяснить следующими фактами. Во-первых, стохастичность процесса электроэрозионной обработки, который реализуется по механизму локального удаления материала с поверхности керамической заготовки, приводит к образованию большого числа эрозионных лунок разных формы и размера, не имеющих определенной ориентации [10].

Во-вторых, скоротечность этого процесса, связанная с возникновением электрического разряда между ближайшими точками электрода-инструмента и заготовки, определяет действие мощных тепловых импульсов на хаотично расположенные микроучастки заготовки [11]. С учетом низкой теплопроводности керамики вся теплота концентрируется в поверхностных микрообъемах керамики. В результате этого происходит не только локальное расплавление керамики с образованием эрозионной лунки и выбросом материала в межэлектродный промежуток, Большой объем расплавленного материала выводится из зоны обработки рабочей жидкостью, а его незначительная часть покрывает поверхность керамики тонкой пленкой. Под действием термических напряжений в поверхностном слое керамики и тонкой пленке образуются многочисленные трещины.

В-третьих, избирательность этого процесса, связанная с неоднородностью структуры оксидно-карбидной керамики, которая сформирована соединениями с разными электрохимическими свойствами и зёрнами разных формы и размеров, определяет разные скорости образования эрозионных лунок и пор на поверхности керамики. В-четвертых, на возникновение электрических разрядов, особенно в первоначальный момент обработки, существенно вли-

яет микрогеометрия исходной поверхности, обладающая определенным рельефом и набором дефектов после выполнения операции алмазного шлифования [3, 4]. При интенсивном локальном нагреве поверхностного слоя керамики эти дефекты инициируют неконтролируемое разрушение ее поверхностных микрообъемов.

В совокупности эти факты позволяют отметить, что исключить образование измененного слоя на поверхностях керамической заготовки после электроэрозионной обработки отверстий даже при использовании «мягких» технологических режимов не удастся. Необходимо проектировать технологический процесс изготовления керамических деталей с отверстиями малого диаметра с учетом выполнения финишных операций для удаления измененного слоя после электроэрозионного сверления.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Установлено, что при электроэрозионном сверлении «глухих» отверстий образуются новые поверхности со структурой, отличной от структуры керамики, и с высокой степенью дефектности. Показано, что наиболее заметное влияние на ширину области повреждений, образованной на торцевой поверхности керамической заготовки, оказывают длительность импульсов и рабочее напряжение, при увеличении которых ширина поврежденной зоны увеличивается в 1,7 и 1,8 раза соответственно. Меньше на ширину области повреждений влияют частота импульсов, напряжение пробоя,

Библиографический список

1. Григорьев, С. Н. Перспективы применения инструментов с керамическими режущими пластинами в современной металлообработке / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин // Стекло и керамика. — 2011. — № 8. — С. 17–22.

Grigoriev, S. N. Prospects for tools with ceramic cutting plates in modern metal working / S. N. Grigoriev, V. V. Kuzin // Glass and Ceramics. — 2011. — Vol. 68, № 7/8. — P. 253–257.

2. 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.

3. Кузин, В. В. Технология механической обработки деталей из высокоогнеупорной керамики на ос-

коэффициент усиления напряжения и сила пикового тока. Интенсификация этих параметров приводит к увеличению ширины области повреждений в 1,2–1,4 раза. Данную технологию можно применять для предварительного формообразования отверстий малого диаметра в керамических заготовках с последующим применением финишной операции для исправления формы и удаления измененного поверхностного слоя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ К СЕРИИ СТАТЕЙ

В результате выполненных исследований выявлены связи в технологической системе электроэрозионного сверления «глухих» отверстий малого диаметра в деталях из оксидно-карбидной керамики и определена физическая картина формирования их качества. Показано, что этот вид обработки не в полной мере обеспечивает требования к точностным и качественным параметрам обработанных отверстий. Установленные закономерности влияния технологических режимов электроэрозионного сверления на качественные показатели «глухих» отверстий малого диаметра в керамических деталях позволяют обоснованно подойти к их оптимизации и выбору финишной операции обработки.

* * *

Статья подготовлена при поддержке Минобрнауки России при выполнении научно-исследовательской работы в рамках государственного задания.

нове 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. *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. — Precision Machining. — P. 127–131.

5. Григорьев, С. Н. Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике. Часть 1 / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Т. Залай, Ф. Балаж // Новые огнеупоры. — 2014. — № 7. — С. 52–56.

6. Григорьев, С. Н. Технологические особенности электроэрозионной обработки отверстий малого диаметра в высокоплотной керамике. Часть 2 / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, С. Ю. Фёдоров, Т. Залай, Ф. Балаж // Новые огнеупоры. — 2014. — № 9. — С. 49–52.

7. **Григорьев, С. Н.** Влияние тепловых нагрузок на напряженно-деформированное состояние режущих пластин из керамики на основе оксида алюминия / С. Н. Григорьев, В. В. Кузин, Д. Буртон [и др.] // Вестник машиностроения. — 2012. — № 5. — С. 68–71.

Grigor'ev, S. N. Influence of Thermal Loads on the Stress-Strain State of Aluminum-Oxide Ceramic Cutting Plates / S. N. Grigor'ev, V. V. Kuzin, M. N. Morgan, A. D. Batako // Russian Engineering Research. — 2012. — Vol. 32, № 5. — P. 473–477.

8. **Кузин, В. В.** Неоднородность напряжений в поверхностном слое керамики под действием внешней нагрузки. Часть 2. Влияние теплового нагружения / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, В. Н. Ермолин // Новые огнеупоры. — 2013. — № 12. — С. 35–39.

Kuzin, V. V. Stress Inhomogeneity in a Ceramic Surface Layer under Action of an External Load. Part 2. Effect of Thermal Loading / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, V. N. Ermolin // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 54, № 6. — P. 497–501.

9. **Кузин, В. В.** Тепловые и деформационные процессы в поверхностном слое детали из оксидно-кар-

бидной керамики, контактирующей с деталью из никелевого сплава, при нагреве / В. В. Кузин, С. Н. Григорьев, М. А. Волосова // Новые огнеупоры. — 2014. — № 4. — С. 53–59.

Kuzin, V. V. Thermal and Deformation Processes Occurring Within a Component Surface Layer Made from Oxide-Carbide Ceramic in Contact with a Nickel Alloy Component During Heating Loads / V. V. Kuzin, S. N. Grigor'ev, M. A. Volosova // Refractories and Industrial Ceramics. — 2014. — Vol. 55, № 2. — P. 157–163.

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

11. **Елисеев, Ю. С.** Физико-химические методы обработки в производстве газотурбинных двигателей / Ю. С. Елисеев, В. В. Крымов, А. А. Митрофанов, Б. П. Саушкин. — М.: Дрофа, 2002. — 656 с. ■

Получено 18.09.14

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

Представительство Promat GmbH

Департамент «Высокотемпературная изоляция»
Россия, 115477, Москва, ул. Кантемировская, 58
телефон: + 7 495 411 6007, факс: + 7 495 231 7977
Интернет: www.promat.ru, E-mail: hpi@promat.ru

Promat
High Performance Insulation

УНИКАЛЬНЫЕ МИКРОПОРИСТЫЕ ПЛИТЫ STEELFLEX ДЛЯ ИЗОЛЯЦИИ СТАЛРАЗЛИВОЧНЫХ КОВШЕЙ



Достоинства применения в сталковшах:

- Обладает теплопроводностью в 5 раз меньше любых известных теплоизоляционных материалов;
- Не выгорает и не даёт усадку на всём интервале применения;
- Постоянство теплофизических свойств на всём интервале работы сталковша, т.е. температура на обечайке ковша 1-й и последней плавки будет одинаковой;
- Бережно сохраняет электроэнергию и минимизирует затраты;
- Увеличивает объём сталковша;
- Значительно снижает температуру оболочки сталковша;
- Снижает температуру поступающего расплава;
- Увеличивает стойкость рабочего и арматурного слоя;
- Снижает скорость остывания стали;
- Уменьшение времени на ремонты;
- Является защитным барьером в случае прохода металла.

Выпускаемая продукция:

- Микропористая теплоизоляция;
- Керамоволокнистые и поликристаллические плиты, картон, маты, модули и бумага;
- Плиты из силиката кальция;
- Огнеупорный легковесный кирпич;
- Огнеупорный клей для склеивания любых поверхностей;
- Высокотемпературные крепежные системы;
- Жаропрочные бетоны, ткани, ленты, шнуры;
- Фасонные изделия по чертежам заказчика;
- Отвердители и различного рода покрытия;
- Теплоизоляционные материалы для алюминиевой и стекольной промышленности;
- Подготовка проектов теплоизоляции агрегатов;
- Бесплатная доставка каталогов и образцов.

Приглашаем Вас оценить все достоинства эффективного применения продукции PROMAT:

Виртуальный калькулятор расчёта температуры на холодной стенке
<http://www.microthermgroup.com/high/EXEN/site/calculator.aspx>

Ищем партнеров для развития дистрибьюторской сети в регионах.

