

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ: ИМПУЛЬСНЫЙ НАГРЕВ И ОПТИМИЗИРОВАННЫЕ АЛГОРИТМЫ ОБРАБОТКИ ДАННЫХ

© 2024 г. С.Е. Черных^{1,*}, В.П. Вавилов^{2,**}, В.Н. Костин^{1,***},
Ю.И. Комоликов^{1,****}, Д.Ю. Кладов^{2,*****}

¹Институт физики металлов им. М.Н. Михеева УрО РАН,
Россия 620108 Екатеринбург, ул. Софьи Ковалевской, 18

²Национальный исследовательский Томский политехнический университет,
Россия 634028 Томск, ул. Савиных, 7

E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru;
****yikom@yandex.ru; *****dyk10@tpu.ru

Поступила в редакцию 19.07.2024; после доработки 26.07.2024

Принята к публикации 30.07.2024

Проведен обзор типов дефектов при производстве плиток из корундовой керамики и традиционных методов контроля целостности изделий из этого материала. Методом активного теплового контроля с применением импульсного оптического нагрева исследована целостность плиток, содержащих искусственные дефекты. Применена схема двухстороннего теплового контроля с программной обработкой исходных термограмм по методу Паркера. Установлено, что наилучшие результаты по выявлению внутренних дефектов в керамических плитках толщиной 10 мм при тепловой стимуляции с помощью ксеноновых ламп дает метод двустороннего теплового контроля с построением карт температуропроводности.

Ключевые слова: керамика, композит, дефектоскопия, термография, тепловой контроль.

THERMAL TESTING OF CORUNDUM CERAMICS: PULSE HEATING AND OPTIMIZED DATA PROCESSING ALGORITHMS

© 2024 S.E. Chernykh^{1,*}, V. P. Vavilov^{2,**}, V. N. Kostin^{1,***},
Yu. I. Komolikov^{1,****}, D. Yu. Kladov^{2,*****}

¹Mikheev Institute of Metal Physics, Ural Branch, Russian Academy of Sciences, Russia 620108
Yekaterinburg, Sof'i Kovalevskoy st., 18

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk, Savinykh St., 7

E-mail: *suo@mail.ru; **vavilov@tpu.ru; ***kostin@imp.uran.ru;
****yikom@yandex.ru; *****dyk10@tpu.ru

A review of the types of defects in the production of corundum ceramic tiles and traditional methods of integrity testing of products made of this material is carried out. The integrity of tiles containing artificial defects was investigated by the method of active thermal testing using pulsed optical heating. A scheme of two-way thermal testing with software processing of the initial thermograms using the Parker method is applied. It has been established that the best results in detecting internal defects in ceramic tiles with a thickness of 10 mm during thermal stimulation using xenon lamps are obtained by the method of two-way thermal testing with the construction of thermal conductivity maps.

Keywords: ceramics, composite, flaw detection, thermography, thermal testing.

DOI: 10.31857/S0130308224090027

ВВЕДЕНИЕ

В современных условиях одной из ключевых проблем экономического развития становится обеспечение конкурентоспособности продукции. Ее можно обеспечить за счет улучшения качества и четкой ориентации на заказчика. Очевидно, что изготовители продукции не могут привлечь и удержать потребителей, если они не рассматривают качество своей продукции в качестве стратегической цели.

В производстве плоских керамических изделий, как правило, могут встречаться дефекты следующих типов [1—4]:

- деформация — искажение формы и размера изделия;
- осевое смещение деталей;
- трещины;
- наколы — точечные углубления на поверхности;
- засорки — инородные включения (царапающие);
- пузыри и прыщи (вызваны запоздалым выделением газов);
- выбоины, щербины, сколы.

В настоящее время контроль вышеуказанных дефектов в большинстве случаев производят вручную, что приводит к многочисленным ошибкам вследствие большой нагрузки на зрение операторов, требований напряженного внимания, ограничения времени для принятия решения при движении конвейера, т.е. всего, что приводит к быстрому развитию усталости операторов [5, 6].

Основными видами дефектов прессованных изделий являются трещины на боковой поверхности, расслоения и сколы. В некоторых случаях трещины могут быть внешне незаметны, и их можно обнаружить только используя специальные методы контроля или определяя механические характеристики изделий, а также при стендовых и полевых испытаниях. Дефекты внутренней структуры керамических плиток выявляют с помощью различных методов испытаний [7], а наиболее используемыми являются визуальный, капиллярный и рентгеновский методы.

Визуальный метод и капиллярный метод используют для обнаружения поверхностных трещин и рыхлостей и очень редко для обнаружения внутренних дефектов в тонкостенных изделиях, не имеющих в своем составе компонентов, которые ухудшают прохождение света через материал и затеяют общую картину внутренней структуры. При контроле в проходящем свете выявляются трещины, расслоения, раковины, посторонние включения и т.п. Метод капиллярной (цветной) дефектоскопии основан на заполнении полостей дефектов под воздействием капиллярных сил цветоконтрастными составами, в результате чего в тех местах, где имеются поверхностные трещины и рыхлоты, в которые проникли чернила, цвет детали изменяется [1, 2].

Рентгеновский метод является универсальным методом контроля внутренней структуры материала, поэтому он получил значительное распространение. Для просвечивания твердых тел используют рентгеновские аппараты, производящие мягкое (10—60 кВ) излучение. Внутреннюю структуру снимают на рентгеновскую пленку или мозаичные детекторы излучения. Для расширения возможностей метода по обнаружению дефектов внутренней структуры применяют метод компьютерной рентгеновской томографии, при котором съемку одних и тех же участков объекта контроля производят под различными углами. С помощью этого метода выявляют раковины, инородные включения, внутренние трещины размером от десятых долей миллиметра и более [8, 9].

Отечественные и зарубежные исследования в области исследования причин разрушения функциональной керамики показывают, что основной причиной потери ее работоспособности в процессе эксплуатации является хрупкое разрушение [8, 10]. Например, на отказы, вызванные хрупким разрушением, приходится до 55 % всех отказов керамики [11, 12]. Причина этого — низкие прочностные свойства и чувствительность керамики к циклическим нагрузкам и термическим ударам, что является следствием объемных и поверхностных дефектов структуры керамики, формирующихся на различных этапах ее жизненного цикла при изготовлении (прессовании и спекании), механической обработке и эксплуатации.

Например, к дефектам, возникающим в процессе прессования и спекания керамики, относятся внутренняя пористость, структурная неоднородность, конгломераты структурных составляющих, посторонние включения и примеси. Характерными дефектами механической обработки керамики являются вырывы материала и трещины [11].

Задачей настоящей работы было исследование возможности теплового контроля (ТК) объемных и поверхностных дефектов керамики, что может послужить отправной точкой развития научных подходов к повышению надежности и эксплуатационных свойств керамических изделий.

В предыдущей работе [13] мы упоминали, что корундовая керамика применяется во многих областях. С точки зрения материаловедения, современная функциональная керамика представляет собой структурно-неоднородную среду. Керамическую матрицу производят чаще всего на основе оксида алюминия, в котором равномерно распределены включения оксидов кремния, титана, циркония и других химических элементов. При ТК изделий из одного материала химический состав не будет отражаться на качестве результатов, однако представляет интерес исследование влияния примесных катионов на свойства керамики при ТК. Также с этой целью мы исследовали монокорундовую керамику, содержащую 99,5 % Al_2O_3 .

В предыдущем исследовании для обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах был использован активный одно- и двухсторонний ТК с применением галогенных ламп и классической обработки термограмм [13]. Использованный тип источника тепловой стимуляции в совокупности с используемыми методиками обработки данных оказались недостаточно эффективными для уверенного обнаружения ряда дефектов (например, утонения стенки образца), а также четкого определения их границ. В связи с этим в настоящей работе были применены мощный импульсный нагрев с использованием ксеноновых ламп [14], а также оптимизированные алгоритмы обработки исходных данных. Ниже представлены

результаты исследования активного двустороннего ТК плиток из корундовой керамики с искусственными дефектами, имитирующими как воздушные полости, так и утонение стенки образца. Использовали программную обработку полученных термограмм [15] с построением карт теплопроводности.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходного вещества для изготовления образцов применяли оксид алюминия (Al_2O_3) с различным содержанием спекающей добавки на основе MnO_2 . Образцы в виде плиток размером $55 \times 55 \times 10$ мм (рис. 1) изготовили методом шликерного литья в гипсовые формы. После извлечения из формы образцы сушили и подвергали предварительному обжигу при температуре $1100^\circ C$ для достижения механической прочности, достаточной для формирования искусственных дефектов. Подготовленные плитки проходили окончательный совместный обжиг в воздухе при температуре $1550^\circ C$ в течение 2 ч.

Согласно результатам предыдущих испытаний [13], образцы имели плотность от $3,78$ до $3,91$ г/см³, открытую пористость не более 1 %, твердость 16—19 ГПа, прочность на изгиб 280—350 МПа и коэффициент теплопроводности ~ 25 Вт/(м · К).

Для исследования были выбраны четыре дефектных образца №№ 1—4 (светло-коричневого цвета) толщиной 10 мм, бездефектные контрольные образцы № 5 (светло-коричневого цвета) толщиной 10 мм и № 6 (цвет близкий к белому) толщиной 8 мм. Фотография исследованных образцов с сигнатурами проекций внутренних дефектов приведена на рис. 1.

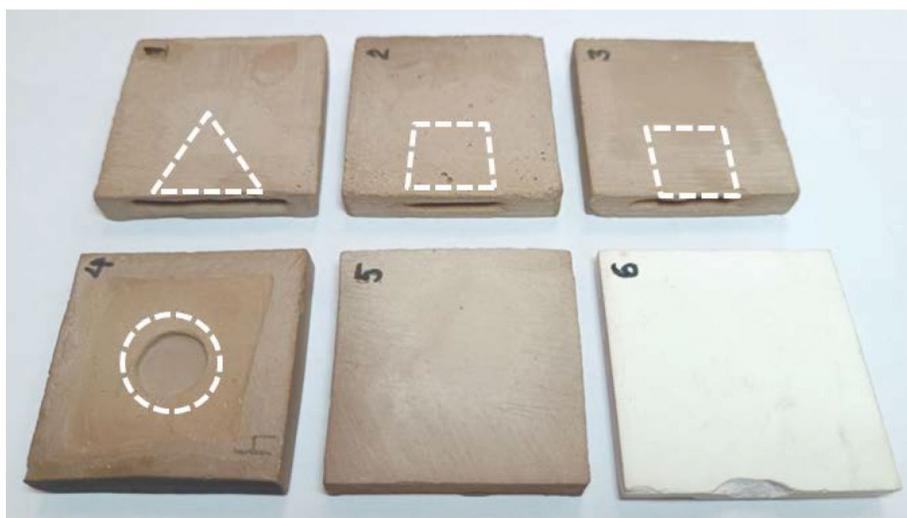


Рис. 1. Фотография образцов с сигнатурами дефектов.

Образцы содержали следующие искусственные дефекты. Образец 1 имел внутреннюю полость треугольной формы с длиной стороны 30 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образцы 2 и 3 имели внутреннюю полость квадратной формы с длиной стороны стороны 17 мм и остаточной толщиной стенки около 3 мм с обеих сторон изделия. Образец 4 имел утонение стенки до 2 мм в форме круга диаметром 14 мм по центру изделия. Бездефектный образец 6, в отличие от остальных образцов, не содержал спекающих добавок и являлся монокорундовым с содержанием Al_2O_3 99,5 %.

Образцы были исследованы с использованием методики двухстороннего активного ТК, предусматривающей бесконтактный оптический нагрев поверхности контролируемого изделия с одновременной регистрацией инфракрасных (ИК) термограмм [16], отражающих распределение температуры на контролируемой поверхности в пространстве и во времени, с помощью тепловизора. Схема ТК приведена на рис. 2.

В качестве импульсного источника нагрева использовали две ксеноновые лампы общей энергией 6,4 кДж и длительностью импульса около 10 мс. Тепловизор Optris PI 450 с температурной чувствительностью $0,06^\circ C$, матрицей из 320×240 элементов и максимальной частотой съемки 30 Гц регистрировал изменение температуры контролируемой поверхности в течение некоторого времени, определяемого длительностью процедуры неразрушающего контроля

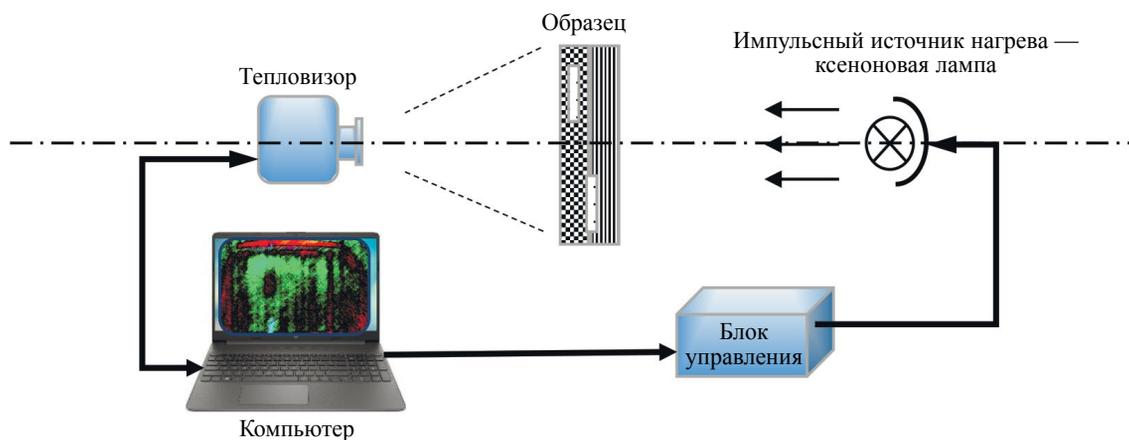


Рис. 2. Схема двухстороннего ТК.

(НК) на обратной стороне изделия для различных образцов. Частота записи выбрали равной 18 Гц, т.е. интервал записи термограмм составлял 55,6 мс.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ОБСУЖДЕНИЕ

В настоящей работе для повышения информативности и достоверности ТК помимо стандартного анализа исходных термограмм использовали построение карт температуропроводности в качестве специфического алгоритма обработки данных.

На рис. 3 показана термограмма контрольного бездефектного образца 5 при двухстороннем ТК с профилем изменения средней температуры в выбранной зоне квадратной формы. В теплофизических измерениях профили температуры такого вида иногда называют Паркеровскими, поскольку их используют для определения температуропроводности материалов a по методу Паркера [17]. Сущность метода состоит в нахождении специфических точек на кривой нагрева (рис. 4) и определении соответствующих характерных времен теплопередачи, используемых для вычисления температуропроводности. Как правило, используют точку половинного сигнала $T_{\max}/2$, и соответствующее ей время $t_{1/2}$, после чего величину a определяют с учетом толщины материала L по формуле Паркера [17]:

$$a = 0,139 \frac{L^2}{t_{1/2}}. \quad (1)$$

Предложен ряд модификаций формулы Паркера, учитывающих влияние не адиабатичность процесса, конечную длительность нагрева и др., однако для построения карт температуропроводности в ТК эти уточнения базового алгоритма не имеют существенного значения.

Поскольку обработка по данному алгоритму происходит во временной области, то считают, что результаты ТК более устойчивы к вариациям амплитудных помех [18]. Алгоритм определения a входит в программу обработки экспериментальных данных ThermoLab Томского политехнического университета.

Результаты для бездефектных образцов 5 и 6 приведены на рис. 3 и 5. Например, для образца 5 температуропроводность определена на уровне $a = 3,13 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Для образца 6 толщиной 8 мм оценка температуропроводности дала $3,77 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$, что отражает изменение физико-химических свойств материала данного изделия (см. фото на рис. 1).

Результаты ТК дефектных образцов 1—4 приведены на рис. 6—9. Оценка температуропроводности в дефектных областях дала величины $(2,5 - 2,9) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$. Сигнатуры дефектов при импульсном нагреве хорошо идентифицируются как на исходных термограммах, так и на картах температуропроводности в особенности.

Также следует отметить, что целью исследования не являлось метрологическое определение температуропроводности, однако результаты, полученные с использованием импульсного нагрева ксеноновыми лампами, являются более надежными по сравнению с длительным нагревом другими оптическими источниками, в частности, галогенными лампами.

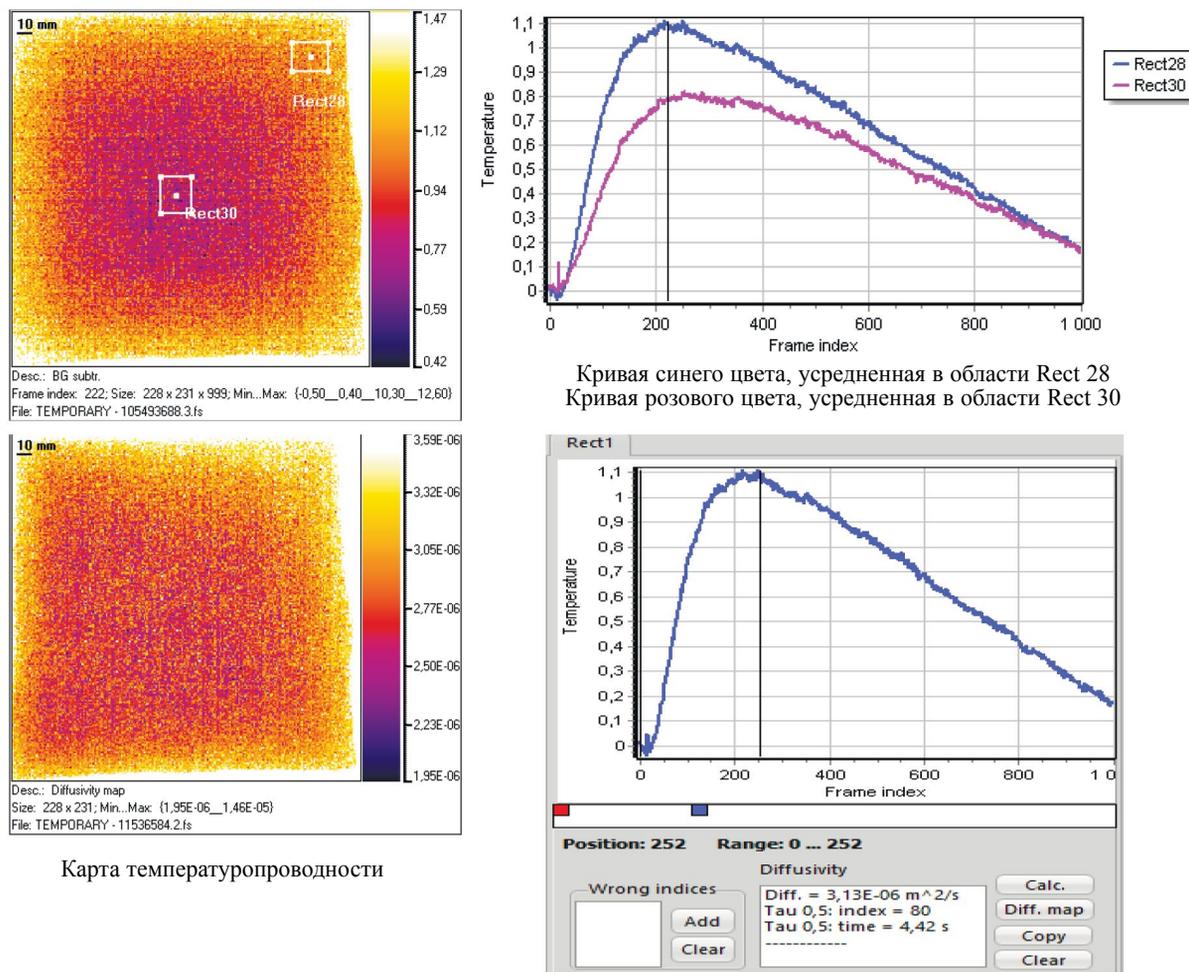


Рис. 3. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК бездефектного образца 5.

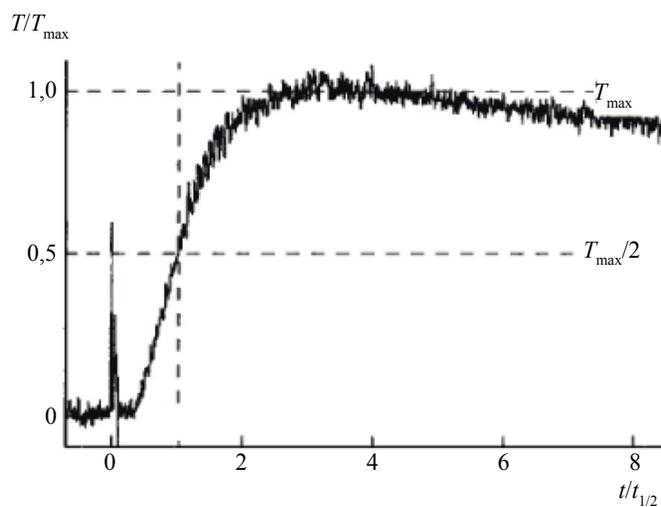
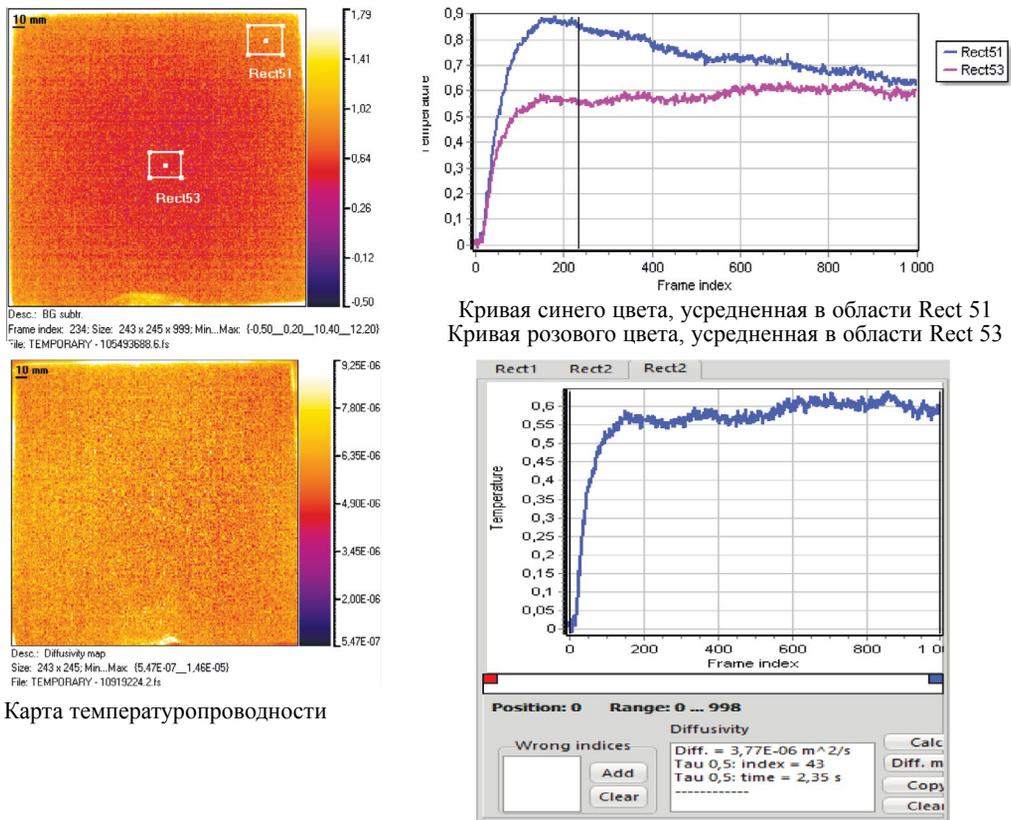


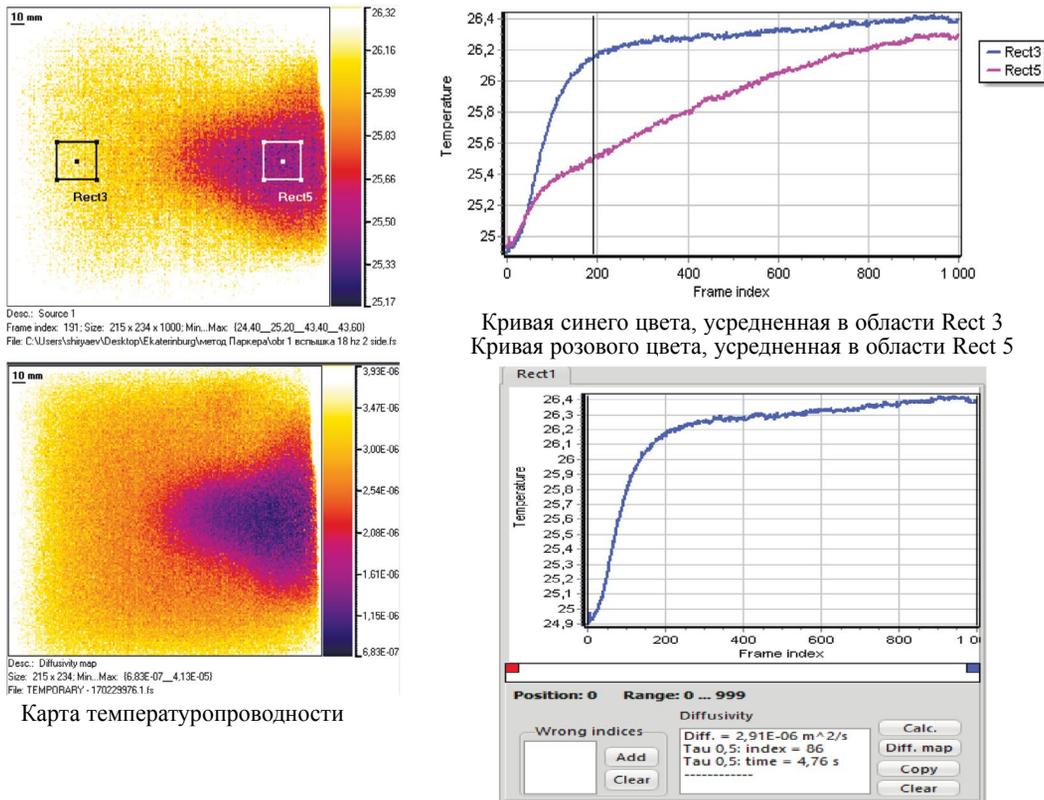
Рис. 4. Кривая нагрева — график зависимости температуры обратной поверхности образца от времени при определении температуропроводности по методу Паркера (ГОСТ Р 57943—2017).



Карта температуропроводности

Кривая синего цвета, усредненная в области Rect 51
Кривая розового цвета, усредненная в области Rect 53

Рис. 5. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК бездефектного образца б.



Карта температуропроводности

Кривая синего цвета, усредненная в области Rect 3
Кривая розового цвета, усредненная в области Rect 5

Рис. 6. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 1.

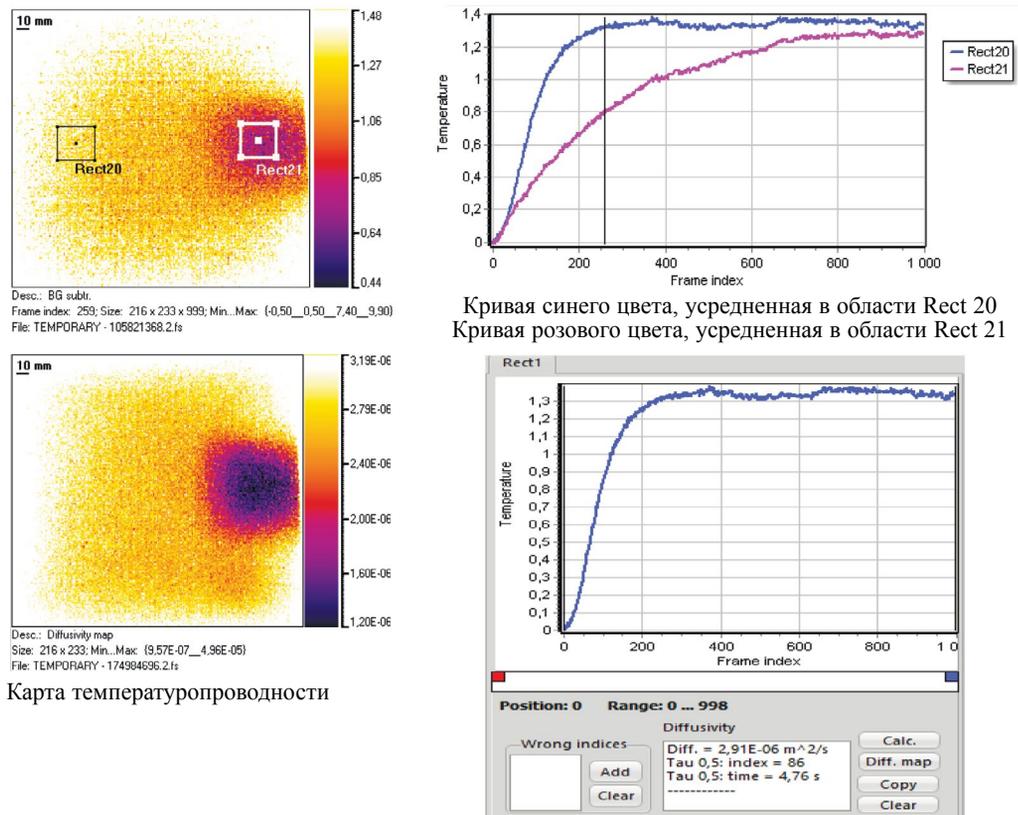


Рис. 7. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта теплопроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 2.

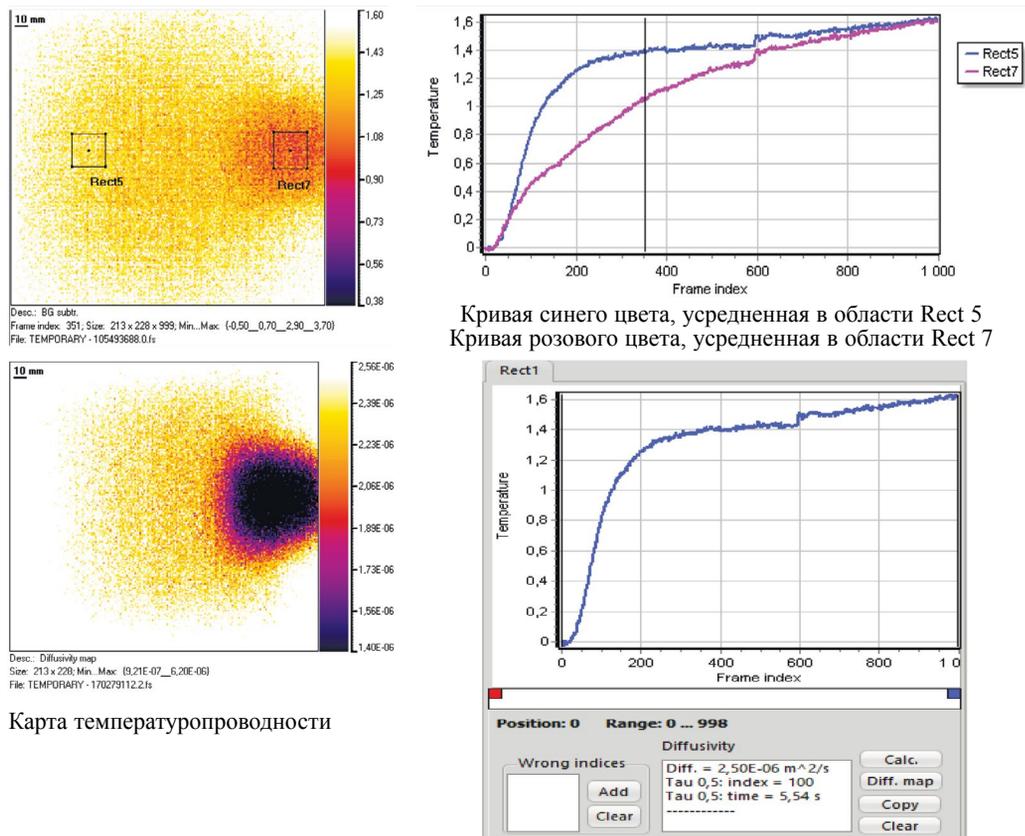


Рис. 8. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта теплопроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 3.

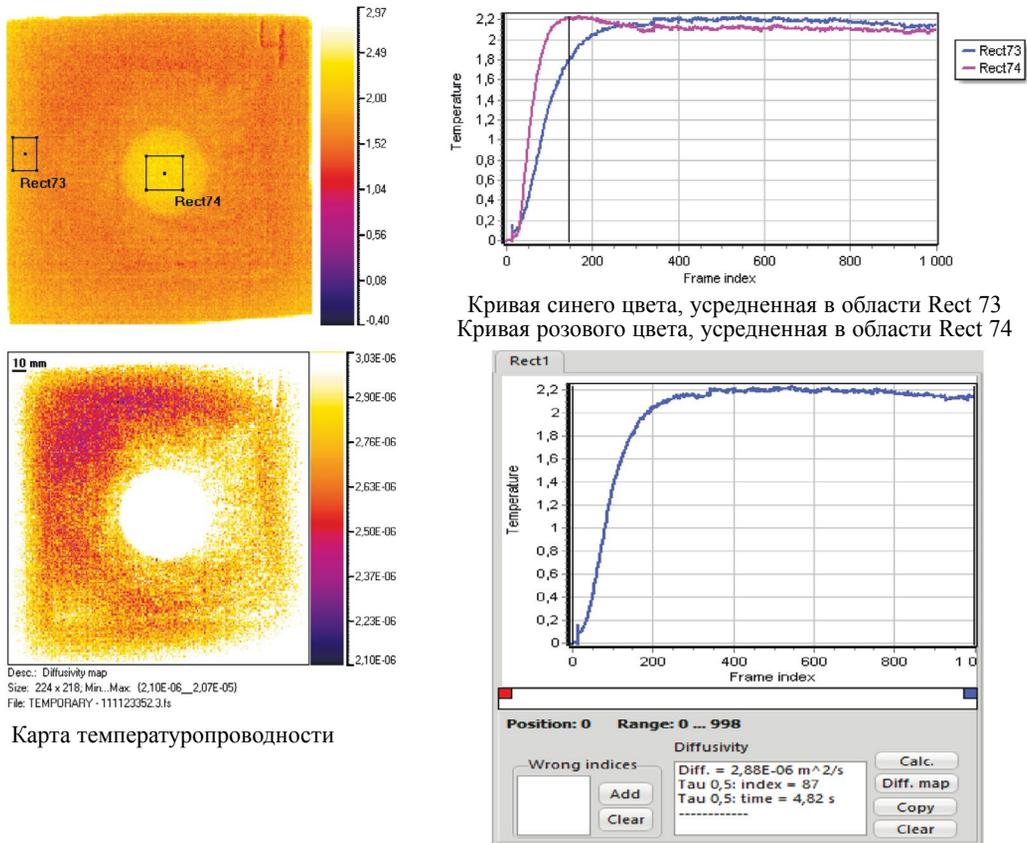


Рис. 9. Исходная термограмма и профиль температуры во времени, а также карта температуропроводности при двухстороннем ТК дефектного образца 4.

ВЫВОДЫ

В активном ТК применение импульсных ксеноновых ламп позволяет идентифицировать скрытые дефекты в корундовой керамике как на исходных термограммах, так и на картах температуропроводности, которые получают путем обработки динамических температурных сигналов во временной области. Надежно определяются как сами дефектные области, так и формы дефектов с учетом диффузии тепла в поперечных направлениях. В частности, в исследованных дефектных образцах корундовой керамики наличие скрытых воздушнонаполненных дефектов приводило к изменению температуропроводности на 7—20 %. Сравнение данных, полученных с использованием метода Паркера для экспериментального определения температуропроводности бездефектных образцов 5 и 6, позволяет сделать вывод о том, что данная теплофизическая характеристика является структурно-чувствительной (изменение температуропроводности составило 17 %) и может применяться в том числе для контроля наличия спекающих добавок в исследуемых керамических материалах.

Результаты исследований показывают, что наиболее эффективным с точки зрения выявляемости дефектов является двухсторонний тепловой контроль при использовании в качестве источников нагрева импульсных ксеноновых ламп с построением карт температуропроводности. Этот подход может быть рекомендован для дефектоскопии структуры плиток из корундовой керамики и обнаружения как внутренних, так и наружных несплошностей, которые могут возникать в процессе производства.

Работа выполнена в рамках государственного задания МИНОБРНАУКИ России (тема «Диагностика», № 122021000030-1).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Андрианов Н.Т., Балкевич В.Л., Беляков А.В., Власов А.С., Гузман И.Я., Лукин Е.С., Мосин Ю.М., Скидан Б.С. Химическая технология керамики / Учеб. пособие для вузов. Под ред. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2012. 496 с.

2. *Гурьева В.А.* Проектирование производства изделий строительной керамики / Учебное пособие. Оренбург: ОГУ, 2013. 179 с.
3. *Тимохова М.И.* Причины возникновения брака в технической керамике при прессовании на пресс-автомате // Стекло и керамика. 2004. Т. 77. № 2. С. 19—25. УДК 666.65.032.6
4. *Kingery W.D., Vandiver P.B.* Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology. New-York; London: Free Press, 1986. 339 p.
5. *Горлов М.И., Емельянов В.А., Ануфриев Д.Л.* Технологические отбраковочные и диагностические испытания полупроводниковых изделий. Минск: Бел. наука, 2006. 367 с.
6. *Karimi M.H., Asemani D.* Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods: Analysis and evaluation // ISA Transactions. 2014. V. 53. P. 834—844.
7. *Zhike Z.* Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
8. *Клюев В.В., Соснин Ф.П.* Теория и практика радиационного контроля / Учеб. пособие для студентов вузов. М.: Машиностроение, 1998. 170 с.
9. *Румянцев С.В., Штань А.С., Гольцев В.А.* Справочник по радиационным методам неразрушающего контроля. М.: Энергоиздат, 1982. 240 с.
10. *Griffith A. A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1921. V. 221. No. 2. P. 163—198 / В книге: Пестриков В.М., Морозов Е.М. Механика разрушения. Курс лекций. СПб.: Профессия, 2012. Приложение 1. С. 435—461.
11. *Бахарев В.П., Верещака А.С., Яковчик Е.В.* Обеспечение качества поверхности и производительности обработки изделий из керамических материалов на операциях доводки фиксированным абразивом // Вестник МГТУ «СТАНКИН». 2011. № 2. С. 56—60.
12. *Hocenski Ž., Keser T.* Failure Detection and Isolation in Ceramic Tile Edges Based on Contour Descriptor Analysis / 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens. 2007. 6 p. DOI: 10.1109/MED.2007.4433713
13. *Черных С.Е., Вавилов В.П., Костин В.Н., Кололиков Ю.И., Кладов Д.Ю.* Тепловой контроль корундовой керамики: классические методики при оптическом нагреве // Дефектоскопия. 2024. № 7. С. 42—52.
14. *Вавилов В.П.* Инфракрасная термография и тепловой контроль (2-е издание). М.: ИД «Спектр», 2013. 545 с.
15. *Вавилов В.П.* Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // Дефектоскопия. 2023. № 6. С. 38—58.
16. *D. Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galietti U.* Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // J. Nondestruct. Eval. 2023. V. 42. No. 27.
17. *Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.* Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. 1961. V. 32. No. 9. P. 1679—1684.
18. *Вавилов В.П., Торгунаков В.Г., Нестерук Д.А., Маринетти С., Бизон П., Гринцато Э.* Определение теплофизических характеристик материалов методом ИК термографии // Известия Томского политехнического университета [Известия ТПУ]. 2006. Т. 309. № 2. С. 130—134.

REFERENCES

1. *Andrianov N.T., Balkevich V.L., Beliakov A.V., Vlasov A.S., Guzman I.Ia., Lukin E.S., Mosin Iu.M., Skidan B.S.* Khimicheskaja tekhnologija keramiki: ucheb. posobie dlja vuzov (Chemical technology of ceramics: a textbook for universities) / Prof. I.Ia. Guzman, Ed. Moscow: OOO RIF «Stroimaterialy», 2012. 496 p. (In Russian).
2. *Gur'eva V.A.* Proektirovanie proizvodstva izdelii stroitel'noi keramiki: uchebnoe posobie (Designing the production of building ceramics: a textbook). Orenburg: OGU, 2013. 179 p. (In Russian).
3. *Timokhova M.I.* Prichiny vzniknovenia braka v tekhnicheskoi keramike pri pressovanii na press-avtomate (The causes of defects in technical ceramics during pressing on a press machine) // Steklo i keramika. 2004. V. 77. No. 2. P. 19—25 (in Russian).
4. *Kingery W.D., Vandiver P.B.* Ceramic Masterpieces. Art, Structure and Technology. New-York; London: Free Press, 1986. 339 p.
5. *Gorlov, M.I., Emel'ianov V.A., Anufriev D.L.* Tekhnologicheskie otrakovochnye i diagnosticheskie ispytaniia poluprovodnikovyx izdelii (Technological rejection and diagnostic tests of semiconductor products). Minsk: Bel. nauka, 2006. 367 p. (In Russian).
6. *Karimi M.H., Asemani D.* Surface defect detection in tiling Industries using digital image processing methods: Analysis and evaluation // ISA Transactions. 2014. V. 53. P. 834—844.
7. *Zhike Z.* Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // Ceramics International. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
8. *Kliuev V.V., Sosnin F.R.* Teoriia i praktika radiatsionnogo kontrolia: Uchebn. posobie dlja studentov vuzov (Theory and practice of radiation testing: Textbook for university students). Moscow: Mashinostroenie, 1998. 170 p. (In Russian).

9. *Rumiantsev S.V., Shtan' A.S., Gol'tsev V.A.* Spravochnik poradiatsionnym metodam nerazrushaiushchego kontrolya (Handbook of radiation non-destructive testing methods). Moscow: Energoizdat, 1982. 240 p. (In Russian).
10. *Griffith A.A.* The phenomena of rupture and flow in solids // Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A. 1921. V. 221. No. 2. P. 163—198 / The mechanics of destruction. A course of lectures., SPb.: Professia, 2012. Prilozhenie 1. P. 435—461 (in Russian).
11. *Bakharev V.P., Vereshchaka A.S., Iakovchik E.V.* Obespechenie kachestva poverkhnosti i proizvoditel'nosti obrabotki izdelii iz keramicheskikh materialov na operatsiakh dovodki fiksirovannym abrazivom (Ensuring the surface quality and processing performance of ceramic products during finishing operations with a fixed abrasive) // Vestnik MGTU «STANKIN». 2011. No 2. P. 56—60 (in Russian).
12. *Hocenski Z., Keser T.* Failure Detection and Isolation in Ceramic Tile Edges Based on Contour Descriptor Analysis / 15th Mediterranean Conference on Control & Automation, Athens, 2007. 6 p. DOI: 10.1109/MED.2007.4433713
13. *Chernykh S.E., Vavilov V.P., Kostin V.N., Komolikh Iu.I., Kladov D.Iu.* Teplovoi kontrol' korundovoi keramiki: klassicheskie metodiki pri opticheskom nagreve (Thermal testing of corundum ceramics: classical techniques for optical heating) // Defektoskopiya. 2024. No. 7. P. 42—52 (in Russian).
14. *Vavilov V.P.* Infrakrasnaia termografiia i teplovoi kontrol' (Infrared thermography and thermal control) (2-e izdanie). Moscow: ID «Spektr», 2013. 545 p. (In Russian).
15. *Vavilov V.P.* Teplovoi nerazrushaiushchii kontrol': razvitie traditsionnykh napravlenii i novye tendentsii (obzor). (Thermal non-destructive testing: the development of traditional directions and new trends (review)) // Defektoskopiya. 2023. No. 6. P. 38—58 (in Russian).
16. *D. Accardi E., Palumbo D., Errico V., Fusco A., Angelastro A., Galietti U.* Analysing the Probability of Detection of Shallow Spherical Defects by Means of Pulsed Thermography // J. Nondestruct Eval. 2023. V. 42. No. 27.
17. *Parker W.J., Jenkins R.J., Butler C.P., Abbot G.L.* Flash method of determining thermal diffusivity, heat capacity and thermal conductivity // J. Appl. Physics. 1961. V. 32. No. 9. P. 1679—1684.
18. *Vavilov V.P., Torgunakov V.G., Nesteruk D.A., Marinetti S., Bizon P., Grintsato E.* Opredelenie teplofizicheskikh kharakteristik materialov metodom IK termografii (Determination of thermophysical characteristics of materials by IR thermography) // Izvestiia Tomskogo politekhnicheskogo universiteta [Izvestiia TPU]. 2006. V. 309. No 2. P. 130—134 (in Russian).
-