

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ КОРУНДОВОЙ КЕРАМИКИ: КЛАССИЧЕСКИЕ МЕТОДИКИ ПРИ ОПТИЧЕСКОМ НАГРЕВЕ

© 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 31.05.2024; после доработки 14.06.2024

Принята к публикации 14.06.2024

Рассмотрены виды дефектов и пути их образования при производстве плиток из корундовой керамики. Методом активного теплового неразрушающего контроля с применением оптического нагрева исследована целостность плиток, содержащих искусственные дефекты. Применены схемы одно- и двухстороннего теплового контроля, а также различные способы программной обработки термограмм. Установлено, что наилучшие результаты по выявлению внутренних дефектов в керамических плитках толщиной 10 мм при тепловой стимуляции с помощью галогенных ламп дает метод одностороннего теплового контроля.

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

THERMAL TESTING OF CORUNDUM CERAMICS: CLASSICAL TECHNIQUES FOR OPTICAL HEATING

© 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

²National Research Tomsk Polytechnic University, Russia 634028 Tomsk

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

*****dyk10@tpu.ru

The types of defects and ways of their formation in the production of tiles from corundum ceramics are considered. The integrity of tiles containing artificial defects has been investigated by the method of active thermal non-destructive testing using optical heating. Single- and double-sided thermal control schemes are applied, as well as various methods of software processing of thermograms. 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 halogen lamps are obtained by the method of unilateral thermal testing.

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

DOI: 10.31857/S0130308224070049

ВВЕДЕНИЕ

Существует два основных вида керамики — кислородосодержащая и бескислородная (карбиды, нитриды), есть промежуточные виды (оксикарбонитриды, оксинитриды и т. п.) и керамокомпозиты. В общем виде кислородосодержащая керамика от бескислородной существенно отличается технологией изготовления (карбиды, нитриды — это горячее прессование) и в большинстве — показателем теплопроводности на один-два порядка [1]. Из кислородосодержащих керамик наибольшее распространение для промышленных применений имеет корундовая керамика, имеющая наивысшие показатели твердости, прочности и химстойкости при минимальной цене. По объему использования в качестве функционального керамического материала корунд превосходит любой другой керамический материал в десятки раз. Технология оксидной керамики традиционная и универсальна для всех видов изделий (кирпичи, плитки для пола и стен, бронепокрытия и т. п.). В различных видах керамики могут возникать дефекты одного и того же типа. В классическом производстве может осуществляться как визуальный контроль, так и выборочный разрушающий контроль образца из партии [2].

Корундовая керамическая ударопрочная, износостойкая и химически стойкая плитка широко применяется в различных отраслях промышленности, в военной и медицинской технике. Керамические оксидные плитки используются для защиты оборудования от износа и химического разрушения при футеровке осадительных центрифуг, предназначенных для концентрации радиоактивных отходов [3, 4]. В композиционной броне для защиты живой силы и военной технике также используются керамические элементы, изготавливаемые в виде плиток [5]. Существует множество примеров экстремального использования корундовых керамических плиток, где особое внимание уделяется качеству, так как в этих условиях любой дефект может привести к катастрофическим последствиям. Функциональные керамические плитки могут быть изготовлены из материала различного состава и иметь предварительно спроектированные стандартные и нестандартные размеры и формы. Основные процессы формования при изготовлении керамических плиток — полусухое прессование и шликерное литье в пористые формы. Весь технологический процесс изготовления керамических плиток, включающий подготовку сырья, формование, сушку и обжиг, отличается возможностью полной автоматизации [6].

Однако формование изделий из керамических порошков осложняется их низкой текучестью, плохим заполнением форм, трудностью удаления воздуха из порошков и шликера. В результате в процессе производства керамической плитки могут возникать следующие дефекты:

1) неравномерная усадка и нарушение правильной геометрии, а также трещины и раковины, наблюдаемые при обжиге плиток;

2) образование скрытых и поверхностных трещин или полное растрескивание плитки;

3) вздутия или раковины внутри изделия;

4) дефекты, сопровождаемые расслоениями и раковинами на поверхности изделия.

Также возможно появление физико-химических дефектов, таких как неоднородность фазового и химического состава [7].

Неразрушающий контроль керамики может проводиться следующими методами: контроль проникающими веществами, ультразвуковой контроль, рентгенография, акустическая эмиссия, лазерная ультразвуковая диагностика, визуально-измерительный контроль, включая машинное зрение, а также инфракрасная термография [8]. На данный момент работы по тепловому контролю корундовой керамики практически отсутствуют. Авторы считают, что данное направление требует развития, в частности при неразрушающем контроле готовых изделий с заданными свойствами. В предыдущей работе авторов [9] установлено, что для обнаружения внутренних дефектов в керамических пластинах может быть использован активный тепловой неразрушающий контроль. Этот способ успешно можно проецировать на все виды плоских изделий из оксидной керамики (циркониевой, магнезиальной, мулитовой, кварцевой и т. д.).

В настоящей работе исследован активный тепловой контроль с использованием оптической стимуляции образцов [10], где представлены результаты исследования плиток из корундовой керамики с внутренними искусственными дефектами типа раковина, поскольку такие дефекты визуально не обнаруживаются, но представляют наибольшую угрозу. В качестве источника нагрева применяли галогенные лампы. Использовалась программная обработка полученных термограмм [11] с применением таких процедур, как фурье-преобразование и вейвлет-анализ.

ОБРАЗЦЫ И МЕТОДИКА ПРОВЕДЕНИЯ ИССЛЕДОВАНИЯ

В качестве исходных вещества для изготовления образцов использовали оксид алюминия (Al_2O_3) с содержанием спекающей добавки на основе MnO_2 . Образцы для исследования в форме плиток $55 \times 55 \times 10$ мм (рис. 1) изготавливали методом шликерного литья в гипсовые формы. После извлечения из формы их сушили и подвергали предварительному обжигу при температуре 1100°C для достижения минимальной механической прочности. Для физико-механических исследований из заготовок вырезали прямоугольные образцы $10 \times 10 \times 40$ мм. В плитках формировали искусственные дефекты. Подготовленные плитки и образцы проходили окончательный совместный обжиг в атмосфере воздуха при 1550°C в течение 2 ч.

Величину твердости керамических образцов, H_v , измеряли с использованием автоматизированной системы FISCHERScope HM2000 HYm при нагрузке 250 г. Для обработки результатов измерений использовали среднее арифметическое из двух измерений. Предел прочности на изгиб определяли на установке «Instron-1185». Открытую пористость, $P_{\text{отк}} (\%)$, определяли по ГОСТ 2409—2014. Плотность спеченных образцов (ρ) определяли методом гидростатического взвешивания по методике ГОСТ 2409—2014, жидкость насыщения — вода. Относительную плотность образцов рассчитывали, исходя из теоретических плотностей компонентов в соответствующих концентрациях.

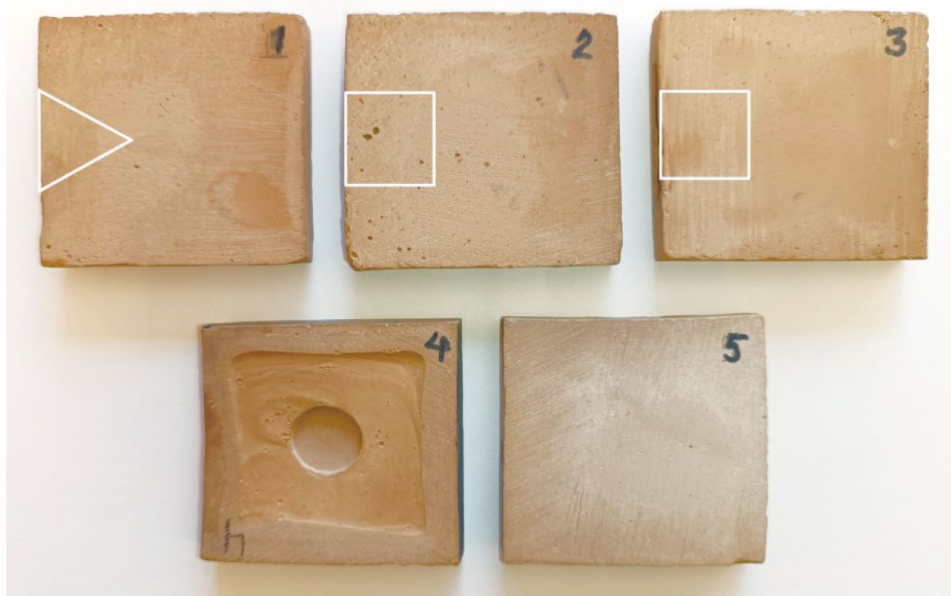


Рис. 1. Фотография образцов с сигнатурами внутренних дефектов.

Теплопроводность материала керамических пластин оценивали согласно методике [12] по результатам измерения температуропроводности на приборе LFA 427 фирмы Netzsch (Германия), использующего лазерный импульсный нагрев в динамической среде аргона, в диапазоне температур от 20 до 1000 °С на образцах диаметром 10 мм и толщиной от 2,5 до 3,5 мм, которые были вырезаны из заготовок образцов для испытания прочности на изгиб. Следует отметить, что для керамических материалов, имеющих сложную гетерогенную структуру и связанные с этим сложные механизмы теплопереноса, применим термин «эффективная теплопроводность». В данном случае, в соответствии с законом Фурье, теплопроводность является коэффициентом пропорциональности между усредненным по объему тепловым потоком (в направлении перпендикулярном толщине образца) и средним сглаженным градиентом температуры.

После обжига плитки 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 белосерого цвета толщиной 10 мм, а также бездефектный контрольный образец № 5 толщиной 10 мм. Фотография исследованных образцов с сигнатурами проекций внутренних дефектов приведена на рис. 1.

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 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.

Образцы исследованы с использованием методики активного теплового контроля (ТК), предусматривающей бесконтактный оптический нагрев поверхности контролируемого изделия с одновременной регистрацией инфракрасных термограмм [13], отражающих распределение температуры на контролируемой поверхности в пространстве и во времени, с помощью тепловизора. Схемы одно- и двухстороннего ТК приведены на рис. 2 и 3.

В качестве источника нагрева использовали две галогенные лампы общей мощностью 4 кВт, нагревающую поверхность объекта контроля за 5 с до 3 °С в односторонней процедуре ТК. Тепловизор Opttris PI 450 с температурной чувствительностью 0,06°С и 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 (НК) на каждой стороне изделия для различных образцов. Частота записи была выбрана равной 18 Гц, т.е. шаг записи термограмм составлял 55,6 мс. При двухстороннем контроле нагрев лампами производили течение 3 с.

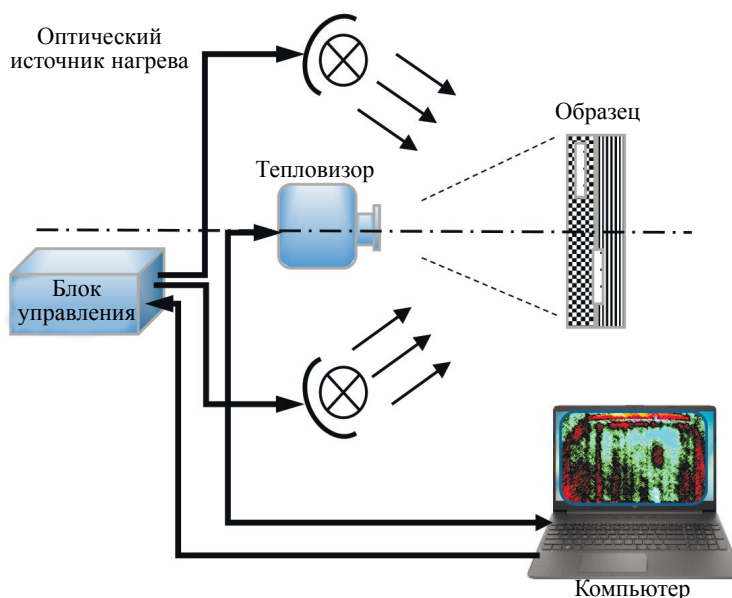


Рис. 2. Односторонний ТК.

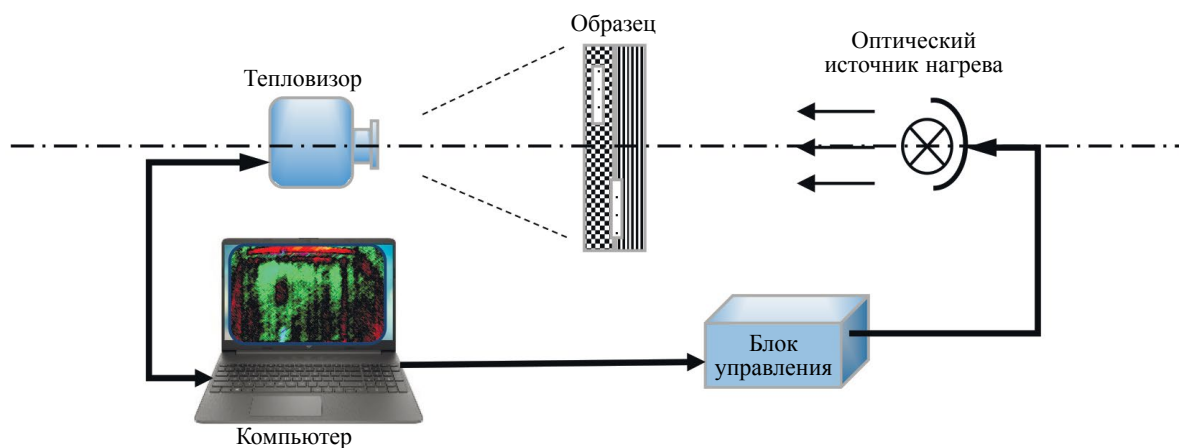


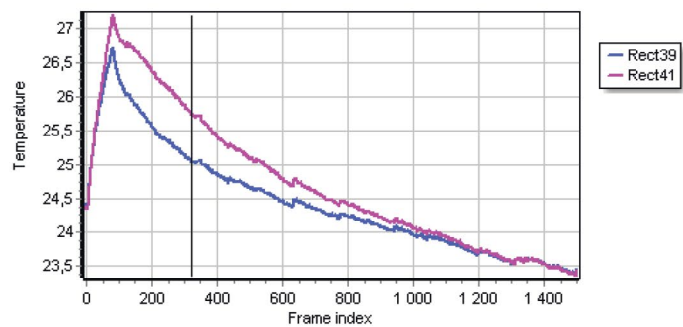
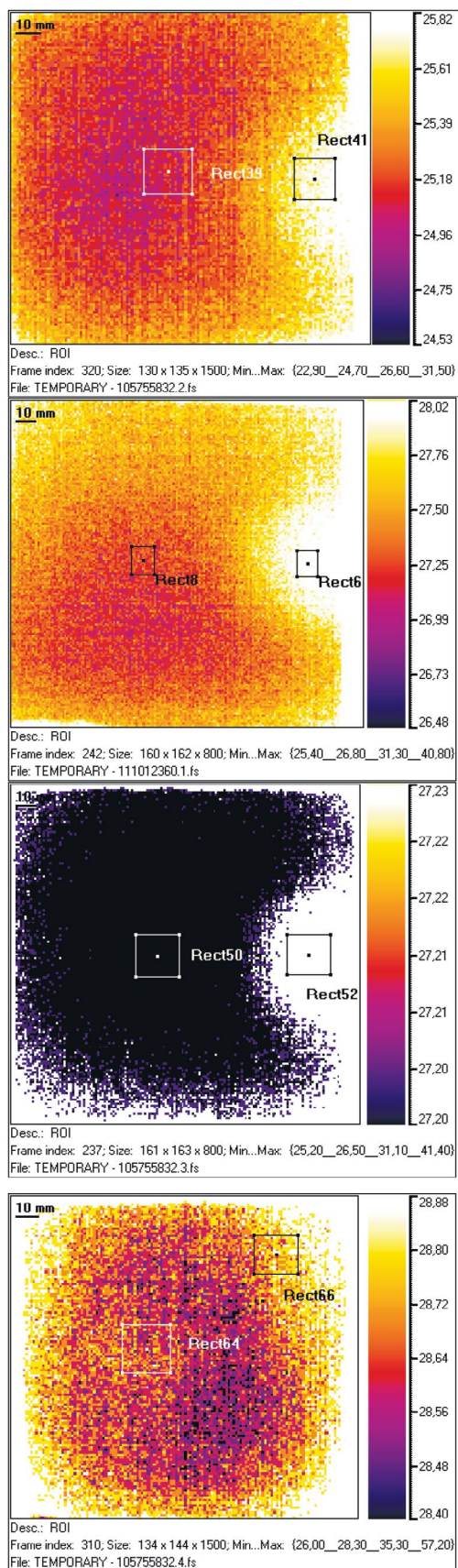
Рис. 3. Двухсторонний ТК.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

1. Одно- и двухсторонний контроль с использованием галогенных ламп

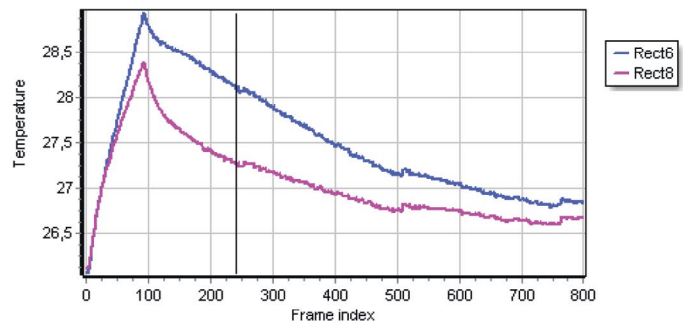
На рис. 4 показаны лучшие с точки зрения информативности термограммы при одностороннем ТК для четырех образцов с профилями изменения средней температуры в двух выбранных зонах квадратной формы в дефектной и бездефектной областях. Согласно теории ТК [10], при равномерном нагреве данные профили близки в начале и конце теплового процесса, а их разность достигает максимума в определенный момент времени, который принимают за оптимальный момент ТК. Например, для образца 1 этот момент наступает в 200-м кадре, что при интервале записи 55,6 мс равно 11,1 с. Аналогично определяют оптимальные времена ТК для других образцов.

Следует заметить, что на термограммах (по крайней мере образцов 1—3) при одностороннем ТК дефектные участки треугольной формы идентифицируются на правой стороне образцов (температурный контраст $\sim 0,8$ °C), однако качество термограмм невысоко, что обусловлено



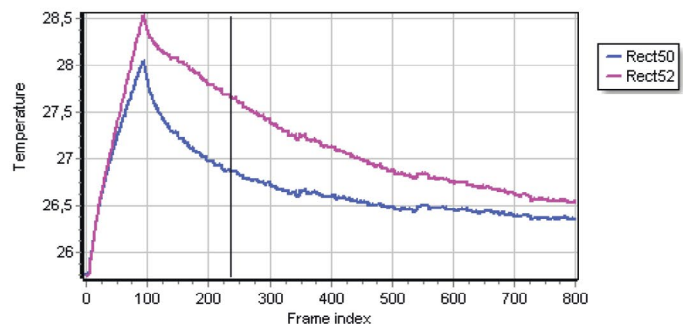
Образец 1

Термограмма 32 из 1499 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



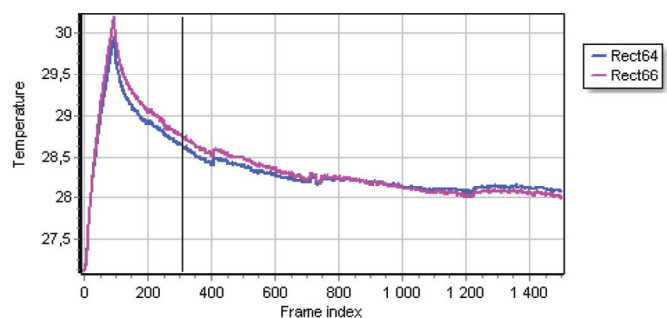
Образец 2

Термограмма 242 из 799 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



Образец 3

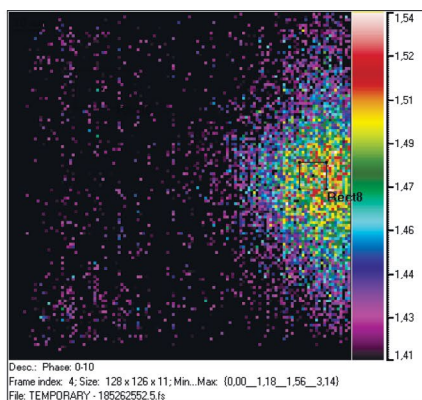
Изображение термограммы 237 из 799 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон



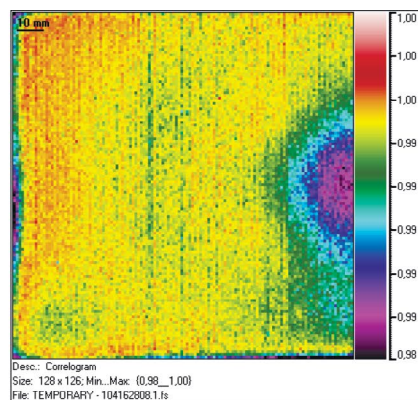
Образец 4

Изображение термограммы 310 из 1499 термограмм и изменение температуры во времени для дефектной и бездефектной зон

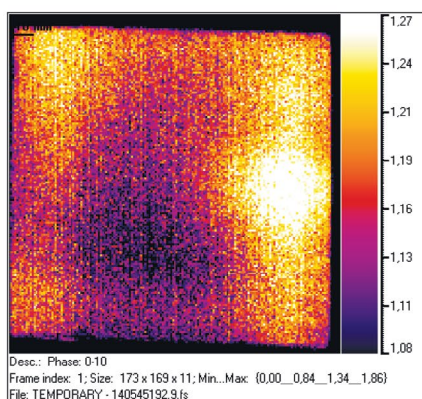
Рис. 4. Исходные термограммы и временные зависимости температуры поверхности образцов 1—4 при одностороннем контроле.



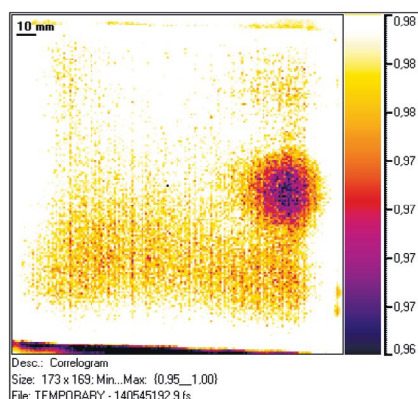
Фурье-преобразование. Фаза 4-й гармоники



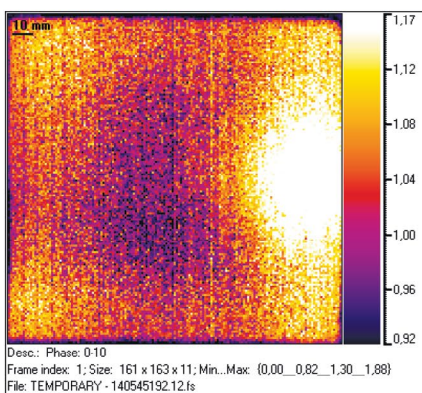
Образец 1



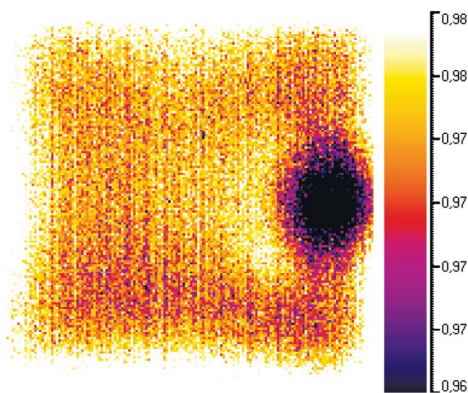
Фурье-преобразование. Фаза 1-й гармоники



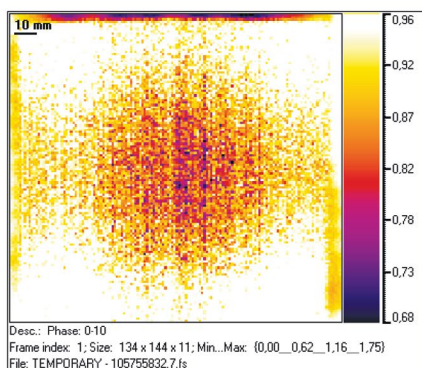
Корреляция с бездефектной зоной



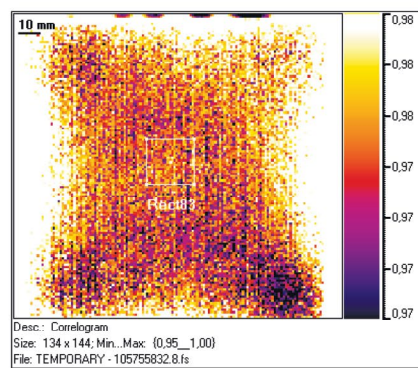
Фурье-преобразование. Фаза 1-й гармоники



Корреляция с бездефектной зоной



Фурье-преобразование. Фаза 4-й гармоники



Корреляция с зоной Rect 83

Образец 4

Рис. 5. Примеры обработки термограмм при одностороннем ТК образцов 1—4.

низким уровнем нагрева (от 0,5 до 3 °С выше начальной температуры) и значительными температурными шумами. Температурный контраст дефектной области для образца 4 при этом составил ~0,1 °С, что соответствует уровню теплового шума.

Известно [14], что информативность и достоверность теплового контроля можно существенно улучшить, применяя ряд алгоритмов, которые, как правило, используют особенности изменения температуры во времени для дефектных и бездефектных участков, например, преобразование Фурье во времени, метод анализа главных компонент, полиномиальная аппроксимация, корреляция и многие другие [15]. Эти алгоритмы входят в программу обработки экспериментальных данных ThermoLab, разработанную в Томском политехническом университете, которая использует большинство алгоритмов обработки данных, принятых в ТК [16]. Пример результатов обработки данных приведен на рис. 5. Наиболее четко дефектная зона (на правой стороне образцов 1—3) выявляется после применения алгоритма корреляции.

Ниже на рис. 6—9 приведены результаты двухстороннего ТК для дефектных образцов. Следует отметить, что, в отличие от случая одностороннего ТК, температура над дефектом (на левой стороне образцов 1—3) ниже, чем в бездефектной области. На исходной термограмме образца 4 (рис. 9), в котором дефект представляет собой утонение основного изделия, зона дефекта также немного теплее на фронте нарастания сигнала, однако в конце процесса эта зона охлаждается быстрее, чем основное изделие.

Обычно считают, что двухсторонний ТК более эффективен, чем односторонний, однако в данных экспериментах толщина изделий была слишком велика для их эффективного прогрева; избыточная температура стороны, противоположной нагреву достигала всего ~0,5 °С. Температурный контраст дефектных областей при этом составил ~0,1 °С.

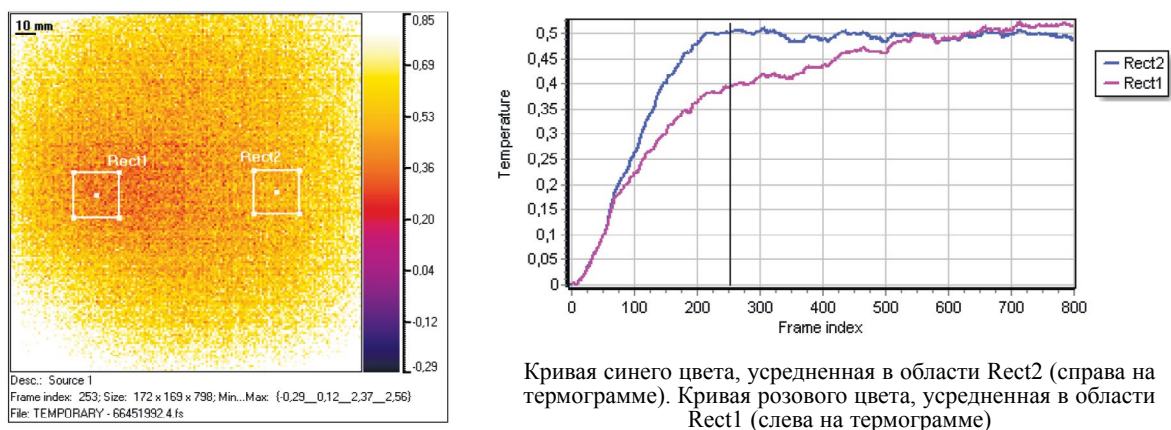


Рис. 6. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 1 (термином Rect обозначены выбранные для анализа дефектные и бездефектные зоны прямоугольной формы).

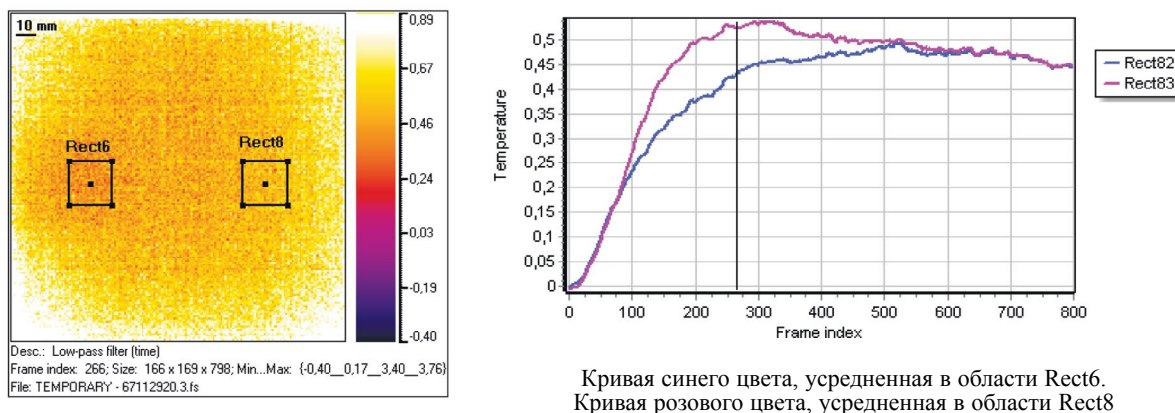


Рис. 7. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 2.

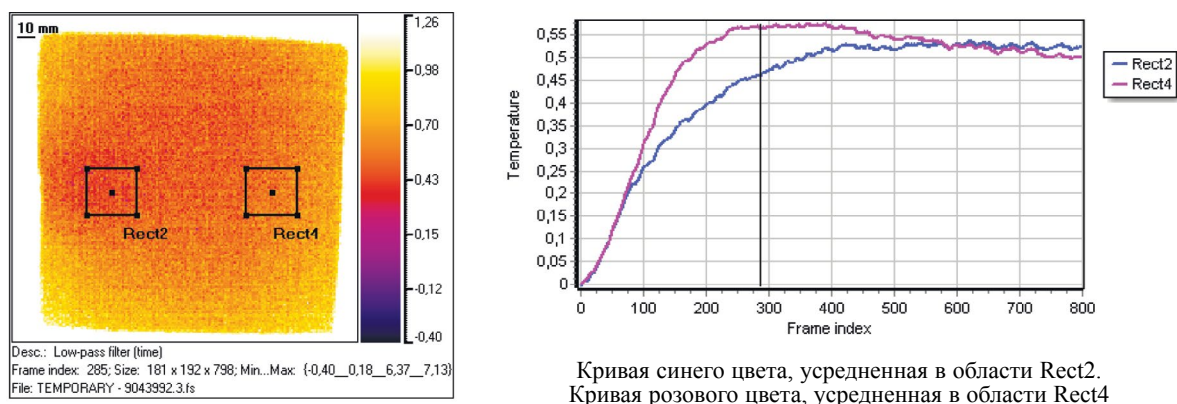


Рис. 8. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 3.

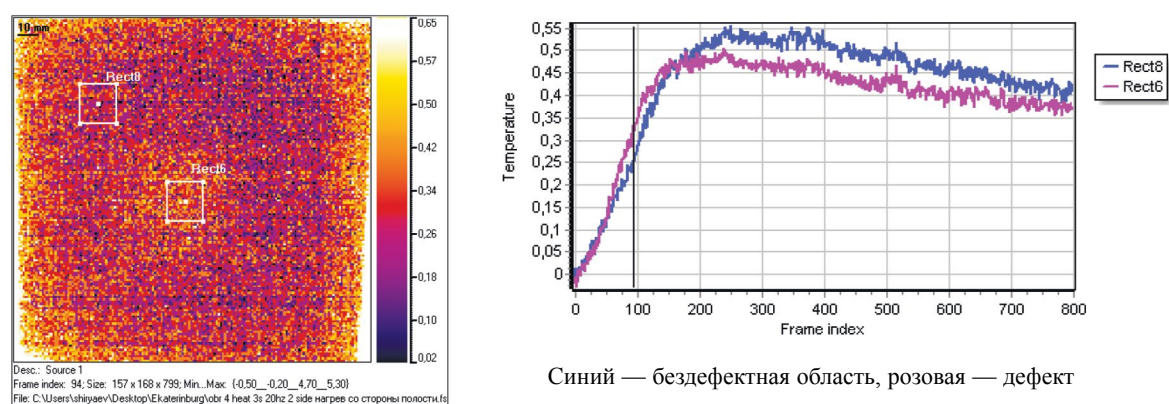


Рис. 9. Исходная термограмма и профиль температуры во времени при двухстороннем ТК дефектного образца 4.

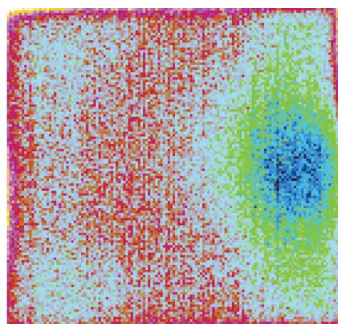
2. Дополнительные алгоритмы обработки при одностороннем ТК

С помощью программы ThermoFit (ТПУ) [17] был применен комплексный вейвлет-анализ к результатам одностороннего ТК образцов 1—4 при нагреве галогенными лампами (рис. 10), в результате чего получены изображения вейвлет-фазы. В качестве ядра вейвлет-преобразования были использованы функции Морле и Гаусса [18]. Видно, что наибольшая контрастность дефектных сигнатур (на правой стороне образцов 1—3) достигается при использовании функции Морле. Интересным моментом, требующим дополнительного анализа, является то, что изначальные сигнатуры дефектов изменяют свою форму на фазовых вейвлет-изображениях.

ВЫВОДЫ

Установлено, что применение оптических средств теплового нагрева дает ряд положительных результатов при выявлении внутренних дефектов в образцах из корундовой керамики.

При использовании галогенных ламп и процедуры одностороннего ТК наилучшие результаты дало применение инструментов «фурье-преобразование» и «корреляция» пакета ThermoLab (ТПУ) по сравнению с исходными необработанными термограммами. Применение комплексного вейвлет-анализа для обработки термограмм также привело к положительным результатам при идентификации дефектов, в особенности на основе функции Морле. Использование двухстороннего ТК оказалось менее эффективным из-за низкой температуры на противоположной стороне изделия ($\sim 0,5$ °C), и, как следствие, незначительного температурного перепада между дефектной и бездефектной областями ($\sim 0,1$ °C), что фактически находится на уровне температурного шума.

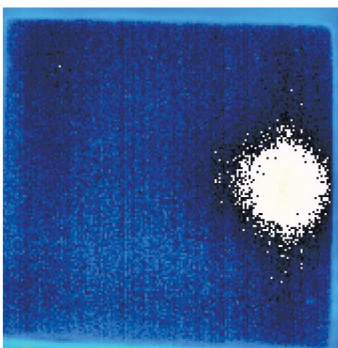


Фаза. Функция Морле

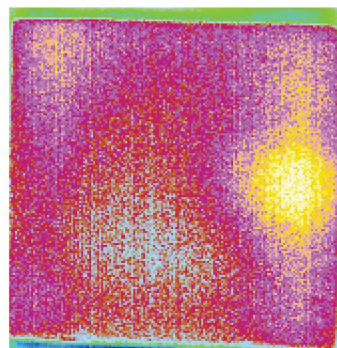


Фаза. Функция Гаусса

Образец 1

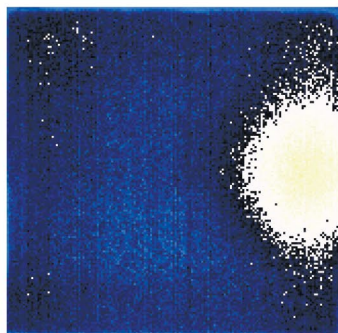


Фаза. Функция Морле

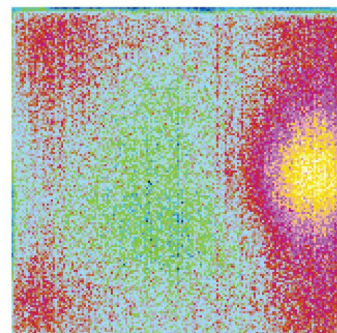


Фаза. Функция Гаусса

Образец 2

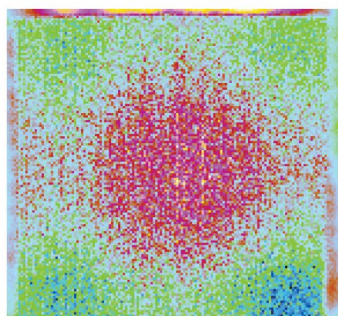


Фаза. Функция Морле

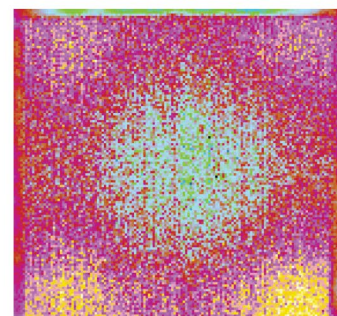


Фаза. Функция Гаусса

Образец 3



Фаза. Функция Морле



Фаза. Функция Гаусса

Образец 4

Рис. 10. Обработка экспериментальных данных с применением комплексного вейвлет-анализа (функции Морле и Гаусса второго порядка).

Дальнейшие исследования будут направлены на использование импульсных оптических источников большой энергии и расширенных процедур обработки исходных термограмм.

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

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шевченко В.Я., Баринов С.М. Техническая керамика. М.: Наука, 1993. 187 с.
2. Семченко Г.Д. Конструкционная керамика и огнеупоры. Харьков: Штрих, 2000. 304 с.
3. Гаршин А.П., Гропянов В.М., Зайцев Г.П. Керамика для машиностроения. М.: Научтехлитиздат, 2003. 380 с.
4. Верещагин В.И., Плетнев П.М., Суржииков А.П., Федоров В.Е. Функциональная керамика. Новосибирск: Наука, 2004. 348 с.
5. Григорян В.А., Кобылкин И.Ф., Маринин В.М., Чистяков Е.Н. Материалы и защитные структуры для локального и индивидуального бронирования. М.: РадиоСофт, 2008. 406 с.
6. Химическая технология керамики: учеб. пособие для вузов / Под ред. проф. И.Я. Гузмана. М.: ООО РИФ «Стройматериалы», 2003. 496 с.
7. Пыжова А.П., Коробкинов В.В., Косов В.С. Дефекты тонкокерамических изделий: причины возникновения и способы устранения / 2-е изд., перераб. и доп. М.: Легпромбытиздат, 1993. 176 с.
8. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // *Ceramics International*. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
9. Черных С.Е., Костин В.Н., Комоликов Ю.И. Тепловой контроль корундовых керамических пластин // *Дефектоскопия*. 2023. № 59. С. 46—54.
10. Вавилов В.П. Инфракрасная термография и тепловой контроль / 2-е издание. М.: ИД «Спектр», 2013. 545 с.
11. Вавилов В.П. Тепловой неразрушающий контроль: развитие традиционных направлений и новые тенденции (обзор) // *Дефектоскопия*. 2023. № 6. С. 38—58.
12. Метод лазерной вспышки в широком интервале температур (LFA427) // NETZSCH-Geratebau GmbH: [официальный сайт]. URL: <http://www.ngb-ta.ru/ru/products/detail/pid.24.html> (дата обращения: 04.02.2024).
13. 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.
14. Вавилов В.П. К выбору оптимального алгоритма обработки инфракрасных термограмм в активном тепловом контроле // *Дефектоскопия*. 2013. № 11. С. 5—14.
15. Вавилов В.П., Маринетти С. Импульсная фазовая термография и тепловая томография на базе преобразования Фурье // *Дефектоскопия*. 1999. № 2. С. 58—71.
16. Vavilov V.P. Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // *Russ. J. Nondestruct. Test.* 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
17. Инструкция по эксплуатации программы ThermoFit Pro. Томск: НИИ ТПУ, 2009. 98 с.
18. Вавилов В.П., Ширяев В.В., Хорев В.С. Обработка результатов активного теплового контроля методом вейвлет-анализа // *Дефектоскопия*. 2011. № 4. С. 70—79.

REFERENCES

1. Shevchenko V.Ia., Barinov S.M. Technical ceramics. M.: Nauka, 1993. 187 p. (in Russian).
2. Semchenko G.D. Structural ceramics and refractories. Kharkov: Shtrikh, 2000. 304 p. (in Russian).
3. Garshin A.P., Gropianov V.M., Zaitsev G.P. Ceramics for mechanical engineering. M.: Nauchtekhlitizdat, 2003. 380 p. (in Russian).
4. Vereshchagin V.I., Pletnev P.M., Surzhikov A.P., Fedorov V.E. Functional ceramics. Novosibirsk: Nauka, 2004. 348 p. (in Russian).
5. Grigorian V.A., Kobylkin I.F., Marinin V.M., Chistiakov E.N. Materials and protective structures for local and individual armoring. M.: RadioSoft, 2008. 406 p. (in Russian).
6. Chemical technology of ceramics : a textbook for universities / Prof. I.Ia. Guzman, Ed. M.: ООО RIF «Stroimaterialy», 2003. 496 p. (in Russian).
7. Pyzhova A.P., Korobkinov V.V., Kosov V.S. Defects in fine ceramic products: causes and methods of elimination / 2-е изд., перераб. и доп. Moscow: Legprombytizdat, 1993. 176 p. (in Russian).
8. Zhike Z. Review of non-destructive testing methods for defect detection of ceramics // *Ceramics International*. 2021. V. 47. No. 4. P. 4389—4397.
9. Chernykh S.E., Kostin V.N., Komolikh Iu.I. Thermal control of corundum ceramic plates // *Defektoskopiya*. 2023. No. 59. P. 46—54 (in Russian).
10. Vavilov V.P. Infrared thermography and thermal control / (2-е издание). M.: ID «Спектр», 2013. 545 p. (in Russian).
11. Vavilov V.P. Thermal non-destructive testing: the development of traditional directions and new trends (review) // *Defektoskopiya*. 2023. No. 6. P. 38—58 (in Russian).
12. The method of laser flash in a wide range of temperatures (LFA427) // NETZSCH-Geratebau GmbH. URL: <http://www.ngb-ta.ru/ru/products/detail/pid.24.html> (Date of application: 02/04/2024) (in Russian).
13. 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.

14. *Vavilov V.P.* On the choice of the optimal algorithm for processing infrared thermograms in active thermal testing // Defektoskopiya. 2013. No. 11. P. 5—14 (in Russian).
 15. *Vavilov V.P., Marinetti S.* Pulse phase thermography and thermal tomography based on the Fourier transform // Defektoskopiya. 1999. No. 2. P. 58—71 (in Russian).
 16. *Vavilov V.P.* Thermal nondestructive testing of materials and products: a review // Russ. J. Nondestruct. Test. 2017. V. 53. No. 10. P. 707—730.
 17. Operating instructions for the ThermoFit Pro program. Tomsk: NII TPU, 2009. 98 p. (in Russian).
 18. *Vavilov V.P., Shiriaev V.V., Khorev V.S.* Processing of the results of active thermal testing by the method of wavelet analysis // Defektoskopiya. 2011. No. 4. P. 70—79 (in Russian).
-