К. т. н. Ю. И. Комоликов¹ (^[]), С. Е. Черных¹, д. т. н. И. Д. Кащеев², д. т. н. В. Н. Костин¹

¹ ФГБУН «Институт физики металлов имени М. Н. Михеева УрО РАН», Екатеринбург, Россия

² ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет», Екатеринбург, Россия

УДК 666.3-4.017:620.179.13

ДЕФЕКТОСКОПИЯ ТРУБЧАТЫХ ОГНЕУПОРНЫХ ИЗДЕЛИЙ МЕТОДОМ ТЕПЛОВОГО КОНТРОЛЯ

Методом теплового контроля проведена дефектоскопия трубчатых огнеупорных изделий. Показано, что метод двустороннего активного теплового контроля применим для обнаружения производственных дефектов керамических роликов. В исследуемых образцах были обнаружены такие дефекты, как трещины и свищи, а также некоторые поверхностные неоднородности.

Ключевые слова: керамические ролики, огнеупорные изделия, неразрушающий контроль, дефектоскопия, тепловой контроль, температурное поле, дефекты.

введение

рубчатые изделия из огнеупорных материа-лов имеют широкую область применения. Во многих отраслях промышленности для высокотемпературной обработки используют специальные туннельные печи, в работе которых важное место занимают керамические ролики, представляющие собой пустотелые трубки из огнеупорного материала. В зависимости от модели печи и условий эксплуатации ролики различаются по длине, диаметру, толщине стенок, содержанию различных элементов. Кроме того, керамические трубки используют для защиты электродов зажигания, термопар, элементов аналитических приборов и др. Для сохранения технических и эксплуатационных параметров оборудования к применяемым керамическим трубкам предъявляют высокие требования, важнейшими из которых являются однородность структуры, отсутствие пор и трещин. Эти и другие специфические для керамических изделий дефекты (трещины, поры, сколы, разнотолщинность) могут образовываться как при изготовлении, так и в процессе эксплуатации. Некоторые дефекты визуально остаются незаметными, однако их присутствие ослабляет изделия и впоследствии становится причиной их разрушения. В настоящей работе представлены

> ⊠ Ю. И. Комоликов E-mail: yikom@yandex.ru

результаты дефектоскопии керамических роликов методом теплового контроля [1].

ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНАЯ ЧАСТЬ

Для исследований были выбраны четыре образца в виде фрагментов с дефектами от огнеупорных роликов. Образцы имели одинаковые размеры: диаметр 30 мм, толщина стенки 2 мм, длина 150 мм. Дефекты имели естественное происхождение (образовались в результате нарушения технологии). Основной химический состав образцов, мас. %: Al₂O₃ 77,5, SiO₂ 19,5, ZrO₂ 3, физические характеристики: плотность 2,47 г/см³, водопоглощение 10 %, пористость 27 %. Характеристики дефектов:

 – образец № 1 с дефектом в виде продольной сквозной трещины по всей длине образца;

– образец № 2 с дефектом в виде сквозного отверстия размерами 0,3×0,2 мм;

 – образец № 3 с дефектом утонения стенки в виде паза шириной 3, длиной 30 и глубиной 1,5 мм на внутренней стороне трубки;

- образец № 4 с дефектами в виде царапины шириной 1, длиной 30 и глубиной 1,5 мм на внутренней поверхности; выбоин размерами 0,6×1,3 и глубиной до 1 мм на наружной поверхности; продольного наплыва материала и выбоин (вмятин) размерами до 1 и глубиной 0,3 мм на наружной поверхности.

Распределение тепловых полей на наружной поверхности образцов фиксировали с помощью инфракрасной камеры FLIR T620bx компании Flir Systems, США. В качестве источника тепловой стимуляции использовали спиральный нагревательный элемент, температура поверхности которого находилась в диапазоне от 230 до 340 °С. Для обеспечения схемы двустороннего теплового контроля [2] нагревательный элемент вводили внутрь объекта контроля [3]. Для определения оптимальных угла съемки, расстояния камеры до объекта и температуры источника тепловой стимуляции было отснято 27 термограмм. После проведения оптимизации окончательную съемку проводили при дистанции наблюдения 300 мм. Длительность теплового воздействия на образцы в каждом эксперименте составляла от 1 до 3 мин. В процессе эксперимента фиксировали температуру бездефектной поверхности образцов, дефектных зон, а также источника тепловой стимуляции.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

На рисунке показаны характерные термограммы дефектных зон образцов. Для лучшего восприятия сводные данные распределения температур и температурные контрасты, обнаруженные на термограммах образцов, приведены в таблице.

Из термограммы образца № 1 (см. рисунок, *а*) видно, что при определенных условиях возможно обнаружение сквозной продольной трещины. Наилучший тепловой контраст достигнут на начальной стадии нагрева при контакте нагревателя с нижней частью образца, когда материал по разные стороны от краев трещины имеет разную температуру, а тепловая волна не может пройти через воздушный зазор трещины. На конечной стадии нагрева при отсутствии контакта нагревателя и образца, а также при последующем его охлаждении на воздухе трещина также выявляется, так как в этом случае она продолжает являться препятствием для равномерного перераспределения тепла при нагреве/остыва-



Термограммы дефектов материала: *а* — образец № 1 с продольной сквозной трещиной; *б* — образец № 2 со сквозным отверстием; *в*, *г* — образец № 4 с выбоиной (*в*) и с наплывом материала (*г*)

Выявляемость дефектов по дифференциации температуры		
Образец	Дефект	Температурный перепад Δ <i>Т</i> между зоной дефекта и фоном
Nº 1	Продольная сквозная трещина	Дефект обнаружен, $\Delta T = 8$ °C
Nº 2	Отверстие (свищ) размерами 0,3×0,2 мм	Дефект обнаружен, $\Delta T = 60$ °C
№ 3, 4	Паз на внутренней стороне	Дефект не обнаружен
Nº 4	Поверхностная неоднородность — пора (выбоина)	Дефект обнаружен, $\Delta T = 9$ °C
№ 4	Поверхностная неоднородность — наплыв материала	Дефект обнаружен, $\Delta T = 12 \ ^{\circ}\text{C}$

нии образца. При этом имеет значение также невысокая теплопроводность самого материала образца.

Из термограммы образца № 2 со сквозным отверстием (см. рисунок, б) можно сделать вывод, что возможно уверенное выявление дефекта этого типа. При этом ΔT составил порядка 60 °C, что является даже избыточным для фиксации с помощью современных тепловизионных средств диагностики. Тот факт, что максимальная температура области отверстия (133 °C) значительно ниже температуры внутреннего нагревателя (240 °C), может указывать на то, что в данном случае, скорее всего, нет прямого просвечивания излучения через отверстие, а происходят отражения теплового излучения от его внутренних стенок.

На термограммах образца № 4 (см. рисунок, *в*, *г*) обнаружены поверхностные неоднородности: выбоина с повышением температуры относительно фона на 9 °С из-за увеличения коэффициента излучения в ее полости (аналог абсолютно черного тела) и уменьшенной теплоотдачи, а также неглубокие вмятины и наплыв материала с понижением температуры относительно фона до 12 °С, что вызвано как изменением коэффициента излучения, так и дополнительным охлаждением на воздухе в этих зонах.

Информативные термограммы образцов № 3 и 4 с дефектами в виде царапины и паза на внутренней стороне керамической трубки по-

Библиографический список

1. **Вавилов, В. П.** Неразрушающий контроль : справочник. В 7 т. Т. 5. В 2 кн. Кн. 1 / *В. П. Вавилов* ; под общ. ред. В. В. Клюева. — М. : Машиностроение, 2004. — 418 с.

2. *Vavilov, V. P.* Thermal nondestructive testing of materials and products: a review / *V. P. Vavilov* // Russ. J. Nondestruct. Test. — 2017. — Vol. 53, № 10. — P. 707–730.

3. **Вавилов, В. П.** Новые идеи в активном тепловом контроле / В. П. Вавилов, А. О. Чулков, Д. А. Дерусова [и др.] // В мире неразрушающего контроля. — 2016. — № 1 — С. 5–7.

4. **Вандельт, М.** Активная термография — эффективный метод неразрушающего контроля крупнога-

лучить не удалось. Можно сделать вывод, что при двустороннем тепловом контроле дефект утонения стенки на внутренней поверхности трубки трудно обнаруживается. В частности, на термограммах естественный дефект в виде царапины, а также дефект в виде паза не видны. Можно предположить, что подобный вид дефектов может быть обнаружен с применением схемы одностороннего теплового контроля при соответствующих температурах внешнего источника нагрева [4, 5].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Применение методики активного двустороннего теплового контроля при исследовании образцов огнеупорных роликов позволило получить результаты, показывающие возможность обнаружения производственных дефектов типа свищей и трещин, а также других поверхностных неоднородностей.

Из термограмм видно, что дефекты изучаемых образцов отчетливо выявляются. Метод получения термоизображений достаточно технологичен и позволяет проводить дефектоскопию непосредственно в технологическом потоке производства трубчатых керамических изделий.

* * *

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки России (тема «Диагностика», № АААА-А18-118020690196-3).

баритных изделий из композиционных материалов / *М. Вандельт, Т. Крёгер, М. Йоханнес* // В мире неразрушающего контроля. — 2016. — № 1. — С. 8-12.

5. *Silva, A. R.* Non-destructive infrared lock-in thermal tests: update on the current defect detectability / *A. R. Silva, M. Vaz, S. Leite* [et al.] // Russ. J. Nondestruct. Test. — 2019. — Vol. 55, № 10. — P. 772–784.

Получено 26.07.21 © Ю. И. Комоликов, С. Е. Черных, И. Д. Кащеев, В. Н. Костин, 2021 г.