

УДК 621.384.3

АКТИВНЫЙ ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ ВРАЩАЮЩИХСЯ ПЕЧЕЙ

В.Г. Торгунаков, М.С. Суханов

ФГНУ НИИ интроскопии. г. Томск

E-mail: vatm@introscopy.tpu.ru

Рассмотрены способы активного воздействия на внешнюю поверхность вращающихся печей для повышения достоверности идентификации дефектов внутреннего слоя при тепловом контроле.

Введение

Пассивный тепловой контроль конструкционных материалов широко применяется в промышленности [1, 2]. Работы по созданию термографической аппаратуры для теплового контроля внешней поверхности вращающихся цементных печей представлены, например, в [3]. При таком контроле локальные отклонения экспериментальных данных от данных, полученных расчетным путем, используют для качественной идентификации дефектов внутренней поверхности корпуса печи. Количественная идентификация дефектов рассмотрена в работе [4]. Активный тепловой контроль состояния внутренней поверхности печей [5, 6] слабо изучен, поэтому авторы решили обратить внимание на вопросы идентификации дефектов при внешнем тепловом воздействии на корпус печи. Для указанной цели рассмотрены орошение водой и обдув воздухом, используемые в цементной промышленности для технологических целей. Поскольку результаты исследований не зависят от того, каким способом получены экспериментальные данные о температуре внешней поверхности – с помощью ИК- или иных датчиков, то в дальнейшем изложении будем придерживаться термина “тепловой контроль”.

Цементная печь (рис. 1) представляет собой трехслойный цилиндр, расположенный под углом к горизонту и вращающийся вокруг собственной оси. В зависимости от типа печи ее диаметр составляет 3...5 м, длина 100...160 м. Обжиг материала (клинкера), перемещающегося вдоль осевого направления печи, осуществляется за счет факельного сжигания топлива. Дефекты, возникающие в слое теплозащитной обмазки, классифицируют как сколы (утонения) и настыли (выпуклости).



Рис. 1. Цементная печь в разрезе

В качестве инструмента исследования активных методов теплового воздействия использована имитационная модель тепловых процессов вращающейся цементной печи, разработанная в ФГНУ НИИ интроскопии [7]. При расчете учитывались: конвективный и лучистый теплообмен с окружающей средой на внешней поверхности печи; теплообмен путем теплопроводности внутри материалов корпуса печи; конвективный и лучистый теплообмен с топливным газом внутри корпуса печи; вращение печи вокруг оси; перемещение сырьевой смеси.

При моделировании использовались следующие исходные данные [10]:

Общие данные:	
Длина расчетной зоны, м	85
Диаметр печи, м	4,5
Степень черноты внешней поверхности	0,9
Время расчета, с	$5 \cdot 10^5$
Степень заполнения печи, %	10
Частота вращения печи, об/мин	1,5
Угол наклона печи, град.	2
Температура окружающей среды, °С	25
Температура орошающей воды, °С	25
Температура газов, °С	1800
1-й слой (стальной корпус):	
Материал – сталь СТ-5	
Толщина, м	0,05
Теплопроводность, Вт/(м·К)	38
Температуропроводность, м ² /с	$7,4 \cdot 10^{-6}$
2-й слой (кирпичная футеровка):	
Материал – кирпич периклазо-хромитовый	
Толщина, м	0,25
Теплопроводность, Вт/(м·К)	2,6
Температуропроводность, м ² /с	$8,6 \cdot 10^{-7}$
3-й слой (теплозащитная обмазка):	
Материал – клинкер	
Толщина, м	0,23
Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,7
Температуропроводность, м ² /с	$7,2 \cdot 10^{-7}$
Клинкер:	
Теплопроводность, Вт/(м·К)	1,7
Температуропроводность, м ² /с	$7,2 \cdot 10^{-7}$
Угол скатывания клинкера, град.	40
Начальная температура, °С	1350

1. Идентификация дефектов при водяном орошении корпуса печи

Рассмотрим, каким образом изменяется тепловой контраст между дефектной и бездефектной областями корпуса печи при различных формах воздействия орошением на ее внешнюю поверхность.

На рис. 2 представлено изменение контраста температур между точкой, расположенной в середине дефектной зоны, и точкой в цельной области для дефектов фиксированной длины 150 см и различной глубины при равномерном по площади печи воздействии водяным орошением интенсивностью $2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$. Из рисунка видно, что изменение контраста после включения орошения происходит монотонно, контраст растет, в первом приближении, по экспоненциальному закону. Это объясняется тем, что рабочий диапазон температур внешней поверхности печи составляет $100 \dots 500 \text{ }^\circ\text{C}$, следовательно тепловой поток, отводимый от печи при кипении и испарении воды, одинаков как для дефектных зон, так и для цельных участков:

$$\Delta Q_{\text{орошения}} = [(T_k - T_0)C_0 + r_0]N_0 \Delta S \Delta t, (*)$$

где $\Delta Q_{\text{орошения}}$ – теплота, расходуемая на нагрев и испарение воды, кДж, $T_k = 100 \text{ }^\circ\text{C}$ – температура кипения воды, T_0 – исходная температура орошающей воды, $C_0 = 4,19 \text{ кДж}/(\text{кг} \cdot \text{K})$ – удельная теплоемкость воды, $r_0 = 2,256 \text{ кДж}/\text{кг}$ – удельная теплота парообразования воды, N_0 – интенсивность орошения, $\text{кг}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$, ΔS – элемент площади, м^2 , Δt – отрезок времени, с. Тепловой поток, поступающий из центра печи, для горячих (дефектных) зон в силу меньшего теплового сопротивления стенки корпуса больше, чем для холодных (бездефектных). Следовательно, дополнительный, фиксированный тепловой поток, см. (*), направляемый на испарение воды, в меньшей степени повлияет на температуру в дефектных зонах и приведет сравнительно холодные зоны к большему охлаждению, чем горячие.

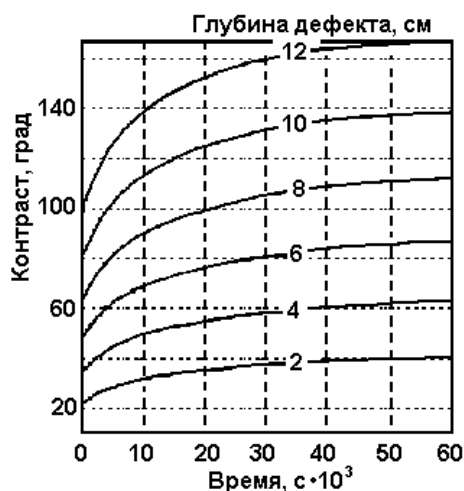


Рис. 2. Изменение контраста температур между точкой, расположенной в середине дефектной зоны, и точкой в бездефектной области при воздействии водяным орошением интенсивностью $2 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$

При использовании *температурного контраста* в качестве признака обнаружения, его рост способствует увеличению достоверности идентификации дефектов. Оптимальное время для контроля наступает по истечении $4 \cdot 10^4$ с после начала стимулирования поверхности. Скорость изменения температурного контраста при орошении падает с течением времени. Наибольшая скорость его изменения сохраняется в течение первых $1 \cdot 10^4$ с, поэтому для идентификации дефектов *по первой производной температурного контраста* целесообразно применять воздействие на поверхность печи в форме прямоугольного импульса указанной длительности. На рис. 3 представлено изменение контраста температур между дефектным и цельным участками корпуса печи для дефектов фиксированной длины 150 см и различной глубины при импульсном воздействии водяным орошением с интенсивностью $4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$.

Из представленной на рис. 4 зависимости видно, что скорость нарастания контраста температур изменяется прямо пропорционально глубине дефекта с коэффициентом пропорциональности $0,35 \text{ мград}/(\text{с} \cdot \text{см})$.

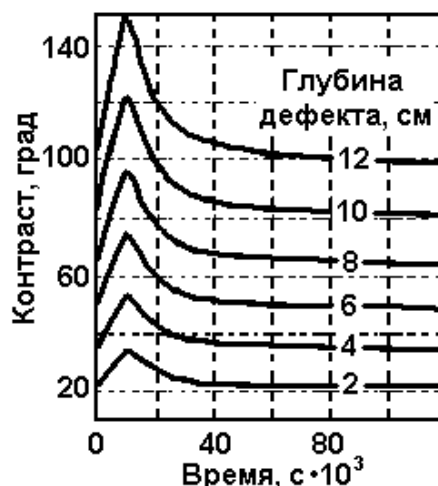


Рис. 3. Изменение контраста температур при импульсном воздействии водяным орошением с интенсивностью $4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ длительностью $1 \cdot 10^4$ с

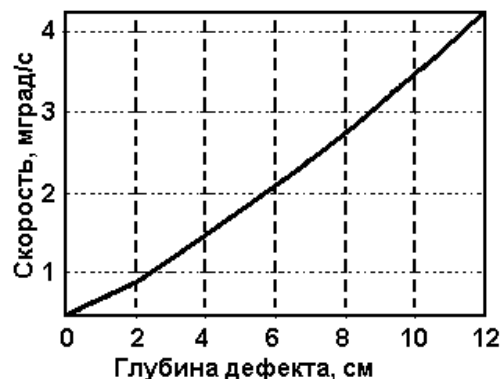


Рис. 4. Скорость нарастания разности температур между цельной и дефектной областями после включения орошения интенсивностью $4 \text{ г}/(\text{м}^2 \cdot \text{с})$ в зависимости от глубины дефекта

Практический интерес представляет зависимость контраста от протяженности дефектов. На рис. 5 приведено изменение контраста температур между точкой, расположенной в середине дефектной зоны, и точкой, удаленной от такой зоны для дефектов различной длины, но фиксированной глубины 12 см.

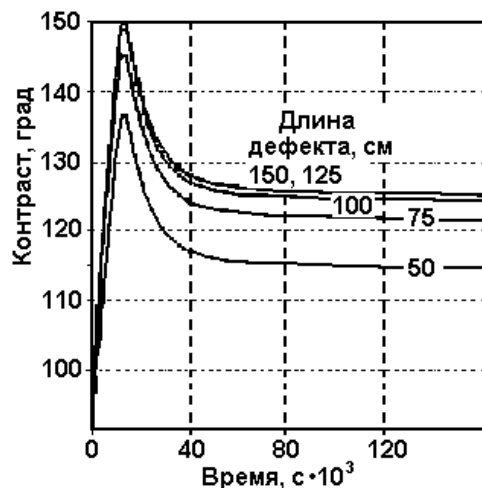


Рис. 5. Изменение контраста температур между точкой в центре дефекта и точкой в бездефектной зоне после включения водяного орошения с интенсивностью 4 г/(м²·с) на время 10 тыс. с и последующего перехода на орошение с интенсивностью 1 г/(м²·с)

Из представленных графиков видно, что влияние соседних бездефектных участков на температуру в центре дефекта (условно бесконечный дефект) начинает сказываться при его поперечных размерах менее 75 см. Характер зависимости скорости нарастания разности температур от длины дефекта представлен на рис. 6.

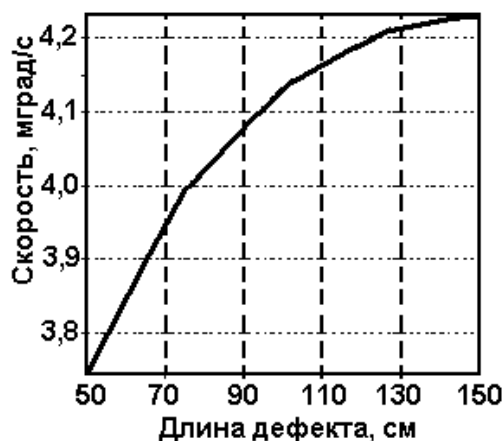


Рис. 6. Скорость нарастания контраста температур после включения орошения интенсивностью 4 г/(м²·с) в зависимости от длины дефекта (глубина дефекта 12 см)

Зависимость, представленная на рис. 6, иллюстрирует тот факт, что изменение скорости нарастания разности температур в гораздо меньшей степени зависит от длины дефекта, нежели температура в дефектной зоне. То есть при активном контроле определение глубины дефекта в меньшей

степени зависит от продольных размеров. Во всем представленном диапазоне длин дефекта (50...150 см) скорость нарастания разности температур изменяется всего на 11,6 %, что в три-четыре раза меньше, чем изменение температуры дефектной зоны для того же диапазона при пассивном контроле, приведенное в работе [8].

2. Идентификация дефектов при воздействии воздушным потоком

Рассмотрим, как влияют размеры дефекта на изменение температурного контраста при воздействии воздушным потоком на внешнюю поверхность печи. На рис. 7 представлена зависимость контраста температур для дефектов различной глубины, но фиксированной длины 150 см.

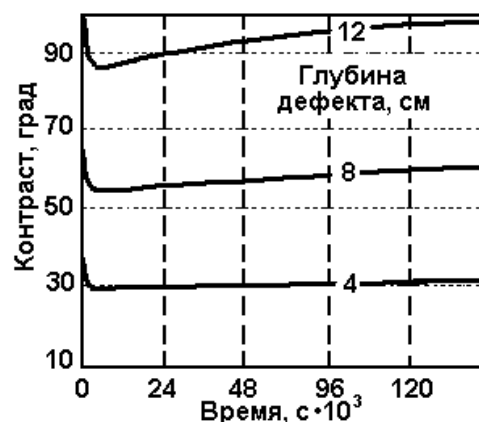


Рис. 7. Изменение контраста температур при воздействии потоком воздуха со скоростью 6 м/с

Из представленных зависимостей видно, что контраст температур при обдуве воздушным потоком на начальном участке уменьшается, но через время порядка 1,0...1,5 · 10⁴ с знак изменения контраста меняется на положительный (нет монотонной зависимости, как это наблюдается при воздействии орошением, но есть четко выраженный минимум контраста). Это указывает на существование оптимального времени для проведения контроля. Уменьшение контраста между дефектной и целевой областями объясняется тем, что поток тепла, отводимый при обдуве, линейно зависит от температуры стенки корпуса:

$$\Delta Q_{\text{обдува}} = \alpha (T_{\text{ст}} - T_0) \Delta S \Delta t,$$

где $\Delta Q_{\text{обдува}}$ – теплота, отводимая при обдуве, Дж, $T_{\text{ст}}$ – температура стенки корпуса, °С, α – коэффициент теплоотдачи, учитывающий конвективную и радиационную составляющую, Вт/(м²·К), рассчитываемый по формулам [9], T_0 – температура воздуха, °С, ΔS – элемент площади, м², Δt – отрезок времени, с.

В установившемся режиме уменьшение контраста незначительно по сравнению с начальным значением. На рис. 8 показано изменение температуры в зоне дефекта, в бездефектной зоне и изменение контраста между этими точками. Становится понятным, что не-

монотонное изменение температурного контраста объясняется неодинаковыми постоянными времени уменьшения температуры в различных точках в зависимости от наличия дефекта и его размеров.

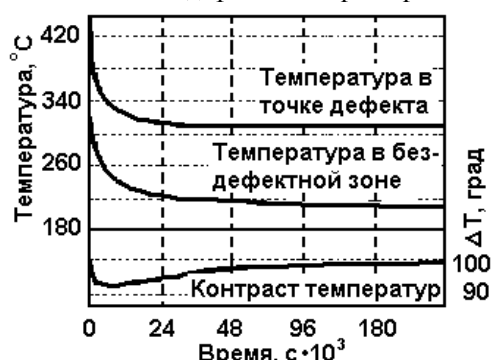


Рис. 8. Изменение температуры и контраста после включения воздушного обдува

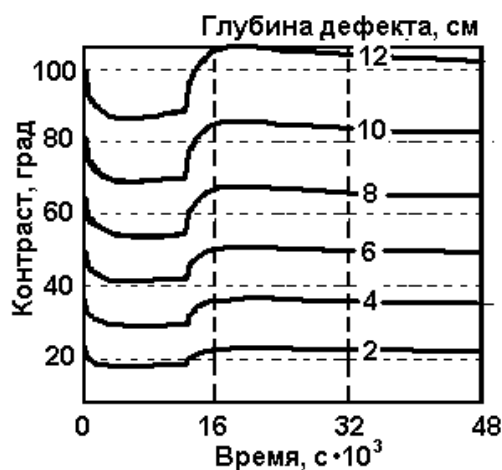


Рис. 9. Переходные процессы изменения контраста температур между точкой в центре дефекта и точкой в бездефектной зоне при импульсном воздействии потоком воздуха со скоростью 6 м/с



Рис. 10. Зависимость скорости убывания температурного контраста от глубины дефекта при импульсном воздействии воздушным потоком

Существование оптимального времени контроля приводит к выводу, что для целей идентификации дефектов внутренней поверхности цементной печи путем теплового воздействия воздушным потоком целесообразно использование импульсного сигнала прямоугольной формы. Импульсное воздействие воз-

душным потоком на внешнюю поверхность приводит к переходным процессам, рис. 9.

Из представленных графиков видно, что наиболее эффективным временем контроля при обдуве являются первые $5 \cdot 10^3$ с. Как и в случае воздействия орошением, скорость изменения температурного контраста может быть использована для определения глубины дефекта — она имеет прямопропорциональную зависимость, рис. 10.

Обсуждение результатов и выводы

Применение активного теплового контроля (орошение водой, обдув воздухом) состояния внутренней поверхности вращающейся цементной печи приводит к повышению достоверности результатов контроля (часто такие воздействия обходятся без материальных затрат — можно использовать выпадение атмосферных осадков либо проводить контроль в ветреную погоду).

Существует принципиальное отличие между орошением и обдувом воздухом — при орошении контраст температур между дефектной и бездефектной точками увеличивается, в то время как при обдуве он уменьшается. Можно выделить следующие аспекты применения активного контроля:

1. При воздействии на внешнюю поверхность печи путем водяного орошения контраст температур между точками дефектной и бездефектной зон монотонно растет (по псевдоэкспоненциальному закону).
2. При воздействии на внешнюю поверхность печи путем обдува воздухом контраст температур между точками дефектной и бездефектной зон сначала уменьшается, а затем на протяжении длительного времени компенсируется. Это объясняется неодинаковыми постоянными времени переходных тепловых процессов для сравниваемых точек корпуса печи.
3. Увеличение температурного контраста при орошении (в некоторых случаях в 1,7 раза) способствует повышению достоверности идентификации дефектов при использовании в качестве обнаружительного признака величины контраста. При обдуве — контраст уменьшается, и данный признак применять нецелесообразно.
4. Скорость изменения контрастного сигнала при орошении и обдуве пропорциональна глубине дефекта и может использоваться в качестве идентифицирующего признака.
5. Для экономии материальных и энергетических ресурсов рекомендуется импульсный характер возмущающего воздействия.
6. Существует оптимальное время для контроля при тепловом воздействии на корпус печи (например, при орошении и наблюдении за контрастом оно составляет 3 ч, при обдуве и анализе скорости изменения температурного контраста эффективными являются первые 1,5 ч).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ободов А.М., Фирсова Н.Е. Пассивный тепловой контроль конструкционных материалов во время эксплуатации // Дефектоскопия. – 1991. – № 11. – С. 77–83.
2. Вавилов В.П., Горбунов В.И. Тепловые методы неразрушающего контроля многослойных структур // Дефектоскопия. – 1981. – № 4. – С. 5–22.
3. Торгунаков В.Г., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Двухуровневая система термографического контроля промышленных теплоустановок // Оптические, радиоволновые, тепловые методы и средства контроля природной среды, материалов промышленной среды: Тез. VII Междунар. научно-техн. конф. – г. Череповец, Россия. – 1997. – С. 45–46.
4. Суханов М.С., Торгунаков В.Г., Яманаев М.С., Чигарев С.Т. Идентификация дефектов внутренней поверхности цементной печи // Известия Томского политехнического университета. – 2002. – Т. 305. – № 5. – С. 179–184.
5. Гардаик Х.О., Роземанн Х., Людвиг Х. Изменение температуры корпуса вращающихся печей для анализа состояния футеровки и обмазки // Цемент-Гипс. – 1984. – № 3. – С. 131–142 (перевод с нем.).
6. Торопов М.А., Волконский Б.В. О механизме образования обмазки при водяном охлаждении вращающихся печей: Новое в науке и технике о цементе. – Л.: Гипроцемент, 1952. – № 1. – С. 14–19.
7. Torgunakov V.G., Sukhanov M.S. Computer Model of Thermal Processes in a Cement Kiln for Application in IR Defectoscopy // 7th European Conference on non-destructive testing. – Copenhagen, 26–29 May, 1998. – P. 2676–2679.
8. Суханов М.С., Торгунаков В.Г. Имитационная модель тепловых процессов цементной печи // Цемент и его применение. – 1999. – № 5. – С. 37–41.
9. Беседин П.В., Трубаев П.А, Нусс М.В. и др. Расчет потерь тепла через корпус цементных вращающихся печей // Цемент и его применение. – 2001. – № 2. – С. 13–17.
10. Теплотехнический справочник / Под общей ред. В.Н. Юренина и П.Д. Лебедева. – Т. 1. – М.: Энергия, 1975. – 728 с.

УДК 548.4.001:621.791.052.08:620.179.16

СИСТЕМА АКТИВНОЙ ДИАГНОСТИКИ ПРОЦЕССА СВАРКИ

А.М. Апасов

Юргинский технологический институт Томского политехнического университета
E-mail: adm@ud.tpu.edu.ru

На основе впервые проведенной раздельной регистрации параметров сигналов акустической эмиссии от источников зарождающихся трещин и непроваров разработаны метод и устройство непрерывного контроля и предотвращения данных дефектов при сварке в реальном масштабе времени.

1. Разработка метода и системы активной диагностики

В основу материалов данной статьи были положены результаты проведенных теоретических и экспериментальных исследований процессов трещинообразования при сварке [1–6], возникновения непровара [7], определения координат дефектов [8], структуры металла сварного шва [9], а также устранения трещиноподобных дефектов [10–12], которые были взяты в качестве исходных данных и позволили разработать метод контроля сварки цилиндрических изделий [13].

Метод основан на приеме и разделении суммарного сигнала акустической эмиссии (АЭ), несущего информацию о дефектах, на сигналы, характеризующие источники зарождающихся непроваров и трещин. Образовавшиеся в процессе сварки зоны непроваров через систему обратной связи дополнительно проплавляют, а источники уже зарождающейся трещины в процессе сварки уничтожают мощным импульсом излучения оптического квантового генератора (ОКГ) [13].

Основное требование, предъявляемое к системе активной диагностики, должно быть таким, чтобы было обеспечено согласование входа данного устройства с выходом измерителя акустических

сигналов, к которому данное устройство подключается. Выходные сигналы измерителя акустических сигналов, в частности ИАС-4, соответствуют ТТЛ-элементам с нагрузочной способностью 4.

В соответствии с этим требованием была разработана система, реализующая данный метод контроля, функциональная схема которой приведена на рис. 1–4.

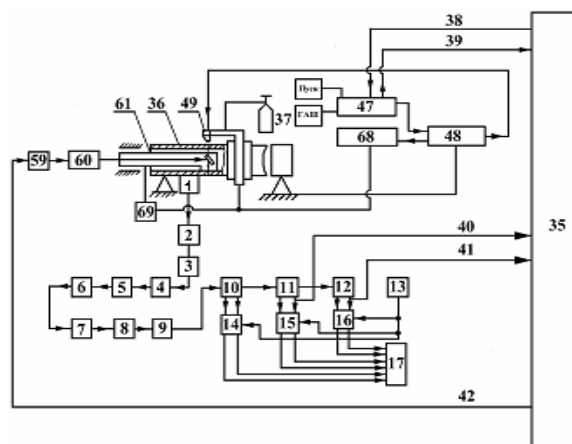


Рис. 1. Функциональная схема сварочного комплекса и системы активного воздействия на зарождающиеся дефекты в процессе сварки