

## ПРОГНОЗИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНОГО РЕСУРСА ЭКСПЛУАТАЦИИ ТЕХНИЧЕСКИХ ОБЪЕКТОВ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ ТЕПЛОВОГО МОНИТОРИНГА

**С.Н. Мешков, А.В. Мягкий, Р.П. Орел, Ю.Е. Хорошайло**

*НТЦ «Термоконтроль» ХНУРЭ, Харьков*

После определенного периода эксплуатации вследствие коррозии от воздействия среды, кавитационной эрозии, растрескивания дефектов сварки, нагрузочного коррозионного растрескивания и ухудшения материала в трубах возникают дефекты. Особую опасность представляют высокотемпературные напорные трубопроводы, которые широко используются на предприятиях энергетики и нефтегазового комплекса. По статистическим данным причиной более 50 % техногенных аварий, взрывов и катастроф являются дефекты трубопроводов.

Тепловой метод позволяет быстро определять места образования дефектов и оценивать толщину стенок для последующей замены критически поврежденных участков.

Для решения важнейшей задачи поиска скрытых дефектов и прогнозирования остаточного ресурса объекта был проведен машинный эксперимент. Была создана теплофизическая модель объекта — высокотемпературного напорного трубопровода (рис. 1) и решена соответствующая прямая задача теплопроводности.

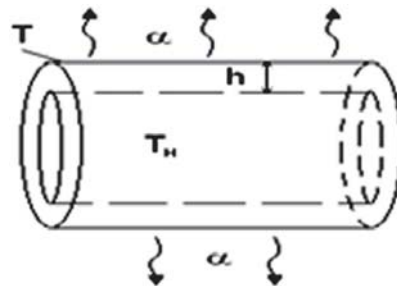


Рис. 1. Теплофизическая модель объекта контроля

Условия решения теплофизической задачи:

- труба нагревается изнутри (граничные условия первого рода) при температуре носителя  $T_n$  и коэффициенте теплоотдачи  $\alpha_1$ .
- снаружи имеется теплоотдача в окружающую среду с коэффициентом теплоотдачи  $\alpha_2$  и температурной среды  $T_c$ .
- коэффициент теплопроводности материала трубы  $\lambda$ .

Согласно сформированной теплофизической модели математическая модель для расчета  $T_h$  была построена на основании следующих соображений:

Тепловой поток через стенку трубы определяется как

$$q = (T_i - T_c) / R_T, \quad (1)$$

где  $R_T$  — значение термического сопротивления стенки трубы

$$R_T = \frac{1}{\alpha_1} + \frac{h}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}. \quad (2)$$

В случае однородного материала уравнение (2) примет вид

$$R_T = \frac{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda}{\lambda \alpha_1 \alpha_2}. \quad (3)$$

После внесения  $R_T$  в уравнение (3) получаем:

$$q = \frac{\lambda \alpha_1 \alpha_2 (T_i - T_c)}{\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda}. \quad (4)$$

С учетом приведенных выражений температура  $T_h$  на поверхности трубы с толщиной стенки  $h$  можно определить из уравнения теплового баланса

Результаты расчета полезного сигнала  $\Delta T_c$ , полученные при различных значениях утонения стенки трубы  $\Delta h$

$h_1$ , мм	12				16					
$T_n$ , °C	200				40	100	200			
$\Delta h$ , мм	2	4	6	8	8	8	2	4	6	8
$\Delta T_c$ , °C	2,3	3,28	4,11	6,92	0,56	1,12	0,34	0,61	1,22	2,83

$$T = \frac{\lambda \alpha_1 \alpha_2 (T_f - T_c)}{(\lambda \alpha_1 + h \alpha_1 \alpha_2 + \alpha_1 \lambda) c \rho}, \quad (5)$$

где  $c$  — теплоемкость материала;  $\rho$  — плотность материала.

Температурный перепад, который вызван утонением стенки трубы (полезный сигнал) определяется выражением:

$$\Delta T_c = T_{h1} - T_{h2}, \quad (6)$$

где  $T_{h1}$  и  $T_{h2}$  — температура на поверхности трубы при толщине стенки  $\Delta h = h_1 - h_2$ .

Результаты, полученные согласно выражению (6) приведены в таблице.

По мере утонения стенки уменьшается термическое сопротивление и на поверхности трубы формируется тепловая аномалия (локальный перегрев). Чувствительность современных тепловизоров составляет 0,05–0,2 °C. Достоверное выделение оператором зон с аномальной температурой, которые соответствуют дефектам, возможно при 3–5 кратном превышении сигнала над шумом. Согласно таблицы, все значения  $\Delta T_c$ , °C превышают порог обнаружения дефектов по указанному критерию, что говорит о перспективности применения теплового метода контроля.

Экспериментально была промоделирована ситуация возникновения и развития тепловой аномалии (рис. 2). В качестве объекта был использован лист металла (2) толщиной 4 мм. С одной стороны, лист нагревался тепловой пушкой (1), а с другой — был установлен тепловизор (3). Тепловизор работал в режиме записи термофильма (покадровой регистрации). Динамика развития температурной аномалии, соответствующей реальному процессу уменьшения температурного сопротивления («утонению стенки») модельного объекта показана на рис. 3.

Если известна динамика термического процесса, то можно предсказать время достижения определенных значений температуры в аномальных точках теплового поля (что в данном случае соответствует утонению стенки трубы). Исходя из принципа подобия, при проведении теплового мониторинга аномальных темпера-

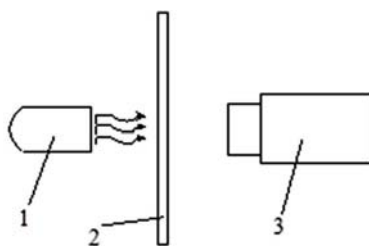


Рис. 2. Схема эксперимента по моделированию процесса изменения теплового сопротивления (утонению) стенки трубы

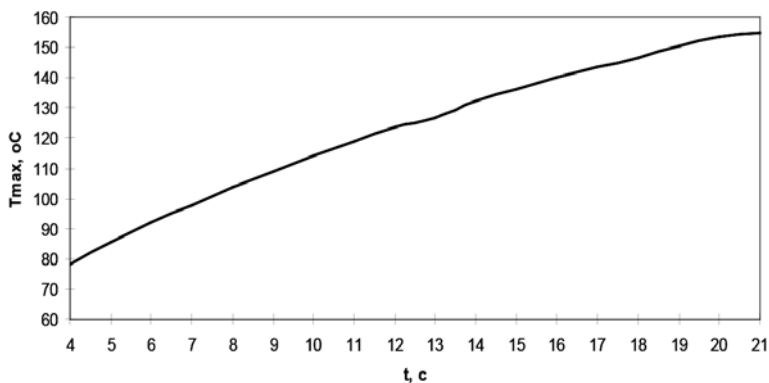


Рис. 3. Динамика тепловой аномалии («утонения стенки») на модельном объекте

турных зон любого технического объекта, можно сделать предположение о времени достижения критического уровня его дефектности.

Проведенные исследования позволяют сделать следующие выводы.

Разработана математическая модель развития дефекта «утонения стенки» для высокотемпературных напорных трубопроводов, которая может быть использована и для других объектов (например — футеровка стен мартеновских печей). Экспериментально промоделирована динамика термического процесса. Показано, что тепловизионный мониторинг позволяет прогнозировать время достижения критических значений температуры и оценивать остаточный ресурс эксплуатации технического объекта для принятия своевременного управленческого решения.

## ПРИМЕНЕНИЕ ТЕПЛОВОГО МЕТОДА ДЛЯ КОНТРОЛЯ ИЗДЕЛИЙ АВИАЦИОННОЙ ТЕХНИКИ

**В.А. Стороженко, С.Н. Мешков, Р.П. Орел**

*НТЦ «Термоконтроль» Харьковского национального университета радиоэлектроники*

Процедура теплового контроля заключается в тепловом воздействии на объект контроля и регистрации возникающего при этом нестационарного температурного поля на его поверхности. Информацией о скрытых дефектах служат локальные аномалии температурного поля, обычно оцениваемые по амплитудному критерию (температурному контрасту): абсолютному –  $\Delta T$  или относительному –  $\Delta T/T$  [1].

В лаборатории НТЦ «Термоконтроль» разработаны методики теплового контроля охлаждаемых лопаток турбин высокого давления и теплозащитных покрытий.

Для решения поставленных задач на начальных этапах работы были проведены следующие исследования:

- построены теплофизические модели объектов контроля, определены наилучшие (с точки зрения выявления дефектов) режимы теплового воздействия;
- определены ожидаемые величины сигналов от дефектов различного типа, а также параметры оптимальных режимов проведения ТНК (мощность и время теплового воздействия, время регистрации термограммы);
- проведены экспериментальные исследования на реальных образцах (лопатках, изделиях с теплозащитными и сотовыми покрытиями) с целью проверки и уточнения результатов теоретического анализа;
- создано программное обеспечение для обработки результатов и определения критериев качества проконтролированных изделий;
- разработаны и созданы опытные стенды для проведения ТНК лопаток турбин и изделий с теплозащитными и сотовыми покрытиями в лабораторных условиях.

Для лопаток турбин задачей ТНК является обнаружение таких дефектов как засорение каналов охлаждения, поверхностные и подповерхностные трещины (прожиг).

Существующие методики ТНК засорения каналов используют продувку лопатки горячим воздухом при постоянном давлении, или же продувку холодным воздухом предварительно нагретой лопатки. Оценка дефектности производится путем сравнения с эталоном и носит качественный характер (решение принимается на основании субъективных выводов оператора) [2].

Основным препятствием для распознавания дефектов непосредственно по термограмме является неоднородность коэффициента излучения контролируемой поверхности. Его локальные значения влияют на видимую температуру поверхности объекта контроля (ОК) и оказывают сильное маскирующее действие при выявлении дефектов. Создано много программ и алгоритмов снижения шума, вызванного флуктуациями излучательно-поглощательных свойств ОК, однако шумовые характеристики ОК в ТНК мало изучены и поэтому простые фильтрующие алгоритмы, как правило, малоэффективны.

Проведенные теоретические и экспериментальные исследования показали, что амплитудный критерий дефектности при ТНК лопаток является неприемлемым, т.к. не позволяет однозначно идентифицировать дефект на фоне помех.

Был предложен временной критерий дефектности, который позволяет получать информацию о развитии во времени температурного поля лопатки из регистрируемого термофильма и выделять дефекты на фоне помех