

ТЕПЛОВОЙ КОНТРОЛЬ БЕЗОПАСНОСТИ ЭКСПЛУАТАЦИИ СОСУДОВ, РАБОТАЮЩИХ ПОД ВНУТРЕННИМ ДАВЛЕНИЕМ

В настоящее время в газовой, нефтехимической, аэрокосмической и других отраслях промышленности широко используются емкости из полимерных композиционных материалов (ПКМ), работающие под повышенным внутренним давлением. Важнейшим условием обеспечения безаварийной эксплуатации потенциально опасных объектов является обследование технического состояния объектов с применением диагностических методов анализа, в том числе в условиях эксплуатации объекта.

Имеются неоднократные попытки решить эту проблему различными методами дефектоскопии – ультразвуковым, методом акустической эмиссии, методом акустического контактного течеискания и т.п. Однако зачастую это не приводило к желаемым результатам:

1. Традиционные методы дефектоскопии позволяют обнаруживать макродефекты (размером свыше 60–100 мкм), в то время как нарушения герметичности изначально обуславливаются, как правило, микродефектами (микротрещины, микропоры и т.п. с размерами в пределах 60–100 мкм).
2. Микродефекты в основном образуются в процессе нагружения контролируемого объекта внутренним давлением, а методы дефектоскопии, как правило, технически трудно реализуемы в процессе нагружения изделий. Кроме того, это опасно с точки зрения техники безопасности, т.к. для проведения дефектоскопии около изделия должен находиться оператор-дефектоскопист.

Таким образом, актуальна задача создания дистанционного метода дефектоскопии сосудов, работающих в условиях высокого внутреннего давления (СВД), позволяющего локализовать внутренние микро- и макродефекты с высокой степенью достоверности.

Недостатки традиционных методов дефектоскопии СВД в достаточной степени могут быть устранены при использовании теплового (тепловизионного) метода диагностики. На практике предлагаемый метод может быть использован для диагностики технического состояния емкостей, работающих в условиях избыточного внутреннего давления: отсеков космических аппаратов, ракетных двигателей, трубопроводов, герметичных сосудов, барокамер и т.п. Особенно эффективно применение данного метода при испытании потенциально опасных объектов – изделий, к которым предъявляются высокие требования по герметичности и надежности контроля, когда ограничено время нагружения изделия избыточным давлением и требуется установить не только наличие открытых течей, но и внутренние микродефекты, которые впоследствии могут привести к аварии.

Суть метода обнаружения дефектов микро- и макроразмеров заключается в следующем.

В процессе нагружения контролируемого изделия средой – жидкостью или газом под давлением – изделие «растягивается» и «раскрываются» микродефекты (трещины, поры и т.п.), а среда с температурой, отличной от окружающей, через микродефекты проникает на

поверхность (рис.1) контролируемого объекта либо в поверхностный слой и создает участки с аномальными значениями температуры. Таким образом, создается признак участка, содержащего микродефект, влияющий на герметичность изделия.

Аномалии температурного поля будут образовываться и в том случае, если микродефекты не выходят на поверхность изделия. Среда проникает в материал, приближается к поверхности и, не выходя на поверхность, также образует на поверхности температурные аномалии. В этом случае предлагаемый способ позволит обнаружить потенциально опасные участки изделия, которые при различных изменениях режимов эксплуатации могут привести к нарушению герметичности изделия. При этом тепловой метод диагностики минимально травмирует контролируемое изделие за счет того, что процесс нагружения изделия внутренним давлением прекращается при достоверном обнаружении дефектов (как показывает практика, давления в 15–20% от максимально допустимого достаточно для достоверного определения дефектов).

Участки поверхности с температурными аномалиями регистрируются в процессе нагружения изделия тепловизионной аппаратурой и после соответствующей обработки представляются в виде термограммы. Обработка заключается в обнаружении аномалий на фоне шумов и помех, при необходимости идентификации микродефектов по температурным аномалиям, оп-

ределении координат и характеристик микродефектов.

При проведении тепловизионных обследований поле обзора тепловизионной аппаратуры должно превышать размеры потенциально опасных участков на поверхности, а температурная разрешающая способность тепловизора должна обеспечивать обнаружение на поверхности температурных аномалий.

По результатам регистрации температурного поля сосуда строят дефектограмму, производят идентификацию дефектов, определяют их координаты и характеристики.

Среда перед подачей в сосуд должна быть нагрета до температуры, превышающей температуру поверхности сосуда.

В силу высокой стоимости экспериментальной отработки предлагаемого метода контроля был использован метод математического моделирования. При этом учитывались следующие аспекты:

- сильно выраженная анизотропия и неоднородность материала конструкции, содержащей слои с различающимися на несколько порядков модулями упругости, что приводит к существенной зависимости напряженного состояния от граничных условий и, следовательно, к невозможности использования упрощенных расчетных моделей;

- влияние структуры материала (схемы армирования и порядка чередования слоев композита с различным направлением армирования) на прочность оболочки баллона (ее стойкость к расслоениям).

Кроме этого, для решаемых задач применительно к комбинированному баллонам давления характерна необходимость одновременно рассмотрения различных аспектов деформирования при сравнительно широком спектре форм и структур рассматриваемых элементов конструкций – от расчета напряженного состояния баллона в целом до определения концентрации напряжений на границе раздела слоев, вблизи фланцев, дефектов типа трещин, включений и т.п.

Процесс решения задачи теоретических исследований включает следующие основные этапы:

1. Вывод основных (разрешающих) уравнений рассматриваемого физического поля для конечного элемента.

2. Выбор рациональных типов конечных элементов (КЭ) и аппроксимация искомым переменных внутри КЭ через их значения в выбранных узловых точках с помощью базисных функций (функций формы).

3. Объединение уравнений элементов в единую систему для всей расчетной области.

4. Решение общей системы уравнений, вычисление параметров поля (перемещений, напряжений или деформаций) и определение поведения (изменение характеристик) микродефектов в конструкции баллона давления при его нагружении внутренним давлением.

5. Решение нелинейной нестационарной задачи теплопроводности в 3-мерной области с подобластями для определения температурного поля на поверхности объекта.

Для вывода разрешающих уравнений в выбранном варианте МКЭ использован известный вариационный экстремальный подход, позволяющий обойтись без введения упрощающих гипотез статической или кинематической природы, а также с максимальной точностью учесть структурные неоднородности исследуемых конструкций.

Согласно этому подходу, поле перемещений определяется на основе вариационного принципа Лагранжа из условия минимума потенциальной энергии конструкции:

$$\Phi = \frac{1}{2} \int_V e dV - \int_S \mathbf{P}_s \mathbf{u} dS - \int_V \mathbf{P}_v \mathbf{u} dV \rightarrow \min, \quad (1)$$

где Φ – потенциальная энергия деформации;

V и S – объем и граница тела соответственно;

\mathbf{u} – вектор перемещений;

\mathbf{P}_s – вектор внешних поверхностных нагрузок;

\mathbf{P}_v – вектор объемных нагрузок;

e – плотность потенциальной энергии деформации.

Плотность потенциальной энергии деформации определяется как работа возникающих в теле напряжений на приращениях деформаций из соотношения:

$$e = \int_0^\epsilon \sigma^T d\epsilon = \sigma_0^T \epsilon + \epsilon_0^T D \epsilon - \alpha^T T D \epsilon + \frac{1}{2} \epsilon^T D \epsilon, \quad (2)$$

полученного с учетом связи между напряжениями и деформациями вида:

$$\sigma = D (\epsilon + \epsilon_0 - \alpha T) + \sigma_0, \quad (3)$$

где σ – вектор напряжений;

D – матрица упругих параметров;

ϵ – вектор деформаций;

ϵ_0 – вектор начальных деформаций;

α – вектор коэффициентов температурных деформаций;

T – температура, отсчитанная от исходного состояния;

σ_0 – вектор начальных напряжений.

Разрешающая система линейных алгебраических уравнений относительно вектора узловых перемещений КЭ получается из условия минимума его потенциальной энергии (1) в виде:

$$\mathbf{K}_k \mathbf{v}_k = \mathbf{P}_k, \quad (4)$$

где $\mathbf{K}_k = \int_{V_k} \mathbf{B}^T \mathbf{D} \mathbf{B} dV$ – матрица жесткости элемента;

\mathbf{P}_k – результирующий вектор узловых нагрузок на элемент.

Из решения системы (4) находят перемещения узлов КЭ, по которым определяют перемещения \mathbf{u} , деформации ϵ и напряжения σ в выбранных точках КЭ.

Рассмотрим равномерно нагруженный внутренним давлением круговой цилиндр с дефектом типа трещина, образованный внутренним податливым и наружным силовым слоями (рис.1). Расчетная схема изображена на рис. 2.

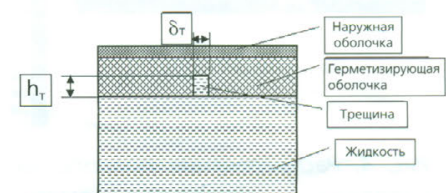


Рис. 1. Исследуемая модельная область

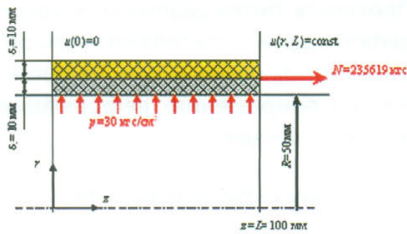


Рис. 2. Расчетная схема цилиндрической части комбинированного баллона давления

При проведении расчетов рассматривались дефекты герметизирующего слоя типа радиально ориентированных трещин. Наличие трещины моделировалось отсутствием силовой связи между соседними элементами, стыкующимися друг с другом в плоскости, перпендикулярной оси вращения. Некоторые характерные результаты расчетов в виде графического изображения полей деформаций приведены на рисунках 3, 4.

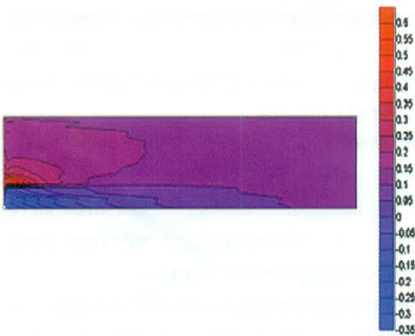


Рис. 3. Распределение продольных напряжений σ_z (кгс/мм²) в герметизирующем слое с трещиной глубиной 3 мм при чисто кольцевом армировании силовой оболочки ($V=0$)

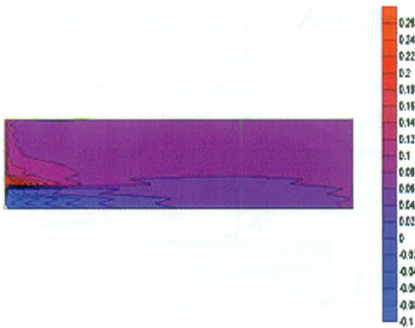


Рис. 4. Распределение продольных напряжений σ_r (кгс/мм²) в герметизирующем слое с трещиной глубиной 3 мм при чисто кольцевом армировании силовой оболочки ($V=0$)



Рис. 5

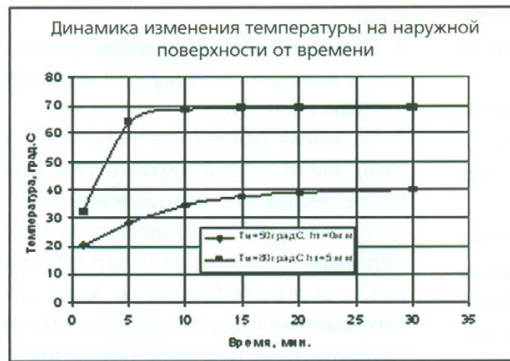


Рис. 6

Для исследования процесса образования температурного поля на наружной поверхности баллона давления вследствие просачивания жидкости к наружной поверхности через макродефекты решена трехмерная нестационарная задача нелинейной теплопроводности применительно к рассматриваемой конструкции с подобластями (рис. 4) с соответствующими граничными и начальными условиями:

$$\frac{dQ(r,t)}{dt} + \text{div}J(r,t)=0, \quad (5)$$

где $Q(r,t)$ и $J(r,t)$ – соответственно объемная плотность тепловой энергии и плотность теплового потока, определяемые:

$$Q(r,t) = p(r) \cdot C_p(r) \cdot T(r,t) \\ J(r,t) = -\lambda(r) \frac{dT(r,t)}{dr}, \quad (6)$$

где $T(r,t)$ – температура, $p(r)$ – плотность среды, $C_p(r)$ – ее удельная теплоемкость, $\lambda(r)$ – теплопроводность.

На рис. 5–8 в виде графиков приведены некоторые результаты расчетов. Из графиков рис. 5–8 видно, что температурные аномалии, пригодные для достоверной идентификации дефектов, проявляются при давлении уже свыше 5–10% от разрушающего давления баллонов.

Экспериментальные исследования предлагаемого способа направлены на решение двух задач: – анализ работоспособности предлагаемого способа контроля и его возможности при применении в реальных условиях эксплуатации; – анализ достоверности контроля по сравнению с прототипом и снижения «травмируемости» контролируемого изделия.



Рис. 7

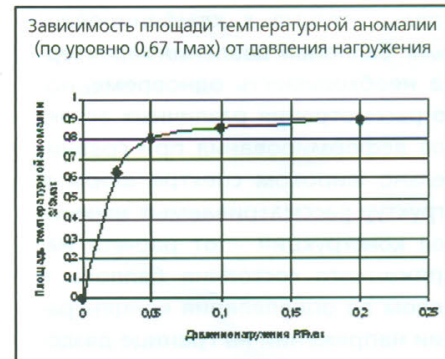


Рис. 8

Экспериментальные исследования теплового метода контроля баллонов давления проводились на установке, функциональная схема которой приведена на рис. 9.

В качестве экспериментального изделия использовался двухслойный баллон: наружный слой – стеклопластик, внутренний слой – резиноподобное герметизирующее покрытие. В резиноподобном герметизирующем покрытии изготовлены 12 искусственных дефектов с различными геометрическими характеристиками.

Установка работает следующим образом.

Контролируемое изделие заполняется жидкостью, температура которой превышала температуру окружающей среды. С помощью специальной системы осуществлялось повышение внутреннего давления жидкости.

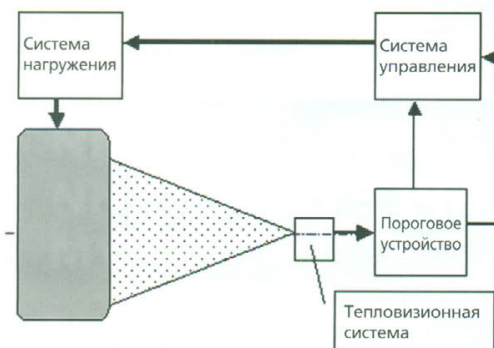


Рис. 9. Функциональная схема контроля

В процессе нагружения баллона тепловизионной системой осуществлялась регистрация температурного поля. Видеоизображение температурного поля передавалось в блок обработки информации, где осуществлялась обработка информации с целью:

- обнаружение аномальных участков на фоне неоднородностей и помех,
- определение характеристик дефектов.

На рисунке 10 в качестве примера приведен баллон высокого давления, нагруженный горячей водой с

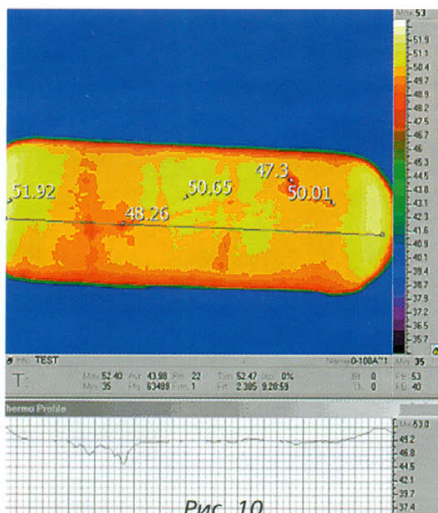


Рис. 10

температурой 60°C до 100 атм. На графике (термо-профиль) наблюдается температурная неоднородность поверхности нагруженного баллона ($\Delta t \approx 2,5^\circ\text{C}$), по которой можно судить о возможном наличии дефектных мест (расслоений, утолщений) в стенке изделия.

На рис. 11 приведена зависимость, построенная по результатам экспериментальных исследований.

Эксперименты и теоретические исследования показали, что начиная с давления 5–10% от максимально допустимого тепловой контроль обеспечивает достоверное обнаружение дефектов и их идентификацию с погрешностью не более 15%.

Это обеспечивает меньшую травмируемость изделия без ущерба для достоверности контроля, дает значительный экономический эффект за счет снижения энергозатрат и затрат труда при проведении испытаний. Кроме того, меньшая травмируемость позволяет снизить количество повторно возникающих дефектов.

Проведенные экспериментальные исследования показали, что метод контроля обеспечивает наряду с диагностикой технического состояния герметичности объ-

ектов по стандартной существующей методике достоверное обнаружение микродефектов в процессе контроля. В дальнейшем эта информация была использована для целенаправленного ремонта изделий. Это позволило снизить процент брака изделий, существенно повысить их качество и получить значительный экономический эффект на предприятии-изготовителе. По результатам работы разработана методика диагностики технического состояния тепловым методом со-



Рис. 11

судов, работающих под внутренним давлением.

**В.Ю. КУТЮРИН,
Т.Е. ТРОИЦКИЙ-МАРКОВ,
О.Н. БУДАДИН**

Список литературы

1. Тепловой неразрушающий контроль изделий / Будадин О.Н., Потапов А.И., Колганов В.И. и др. – М.: Наука, 2002.
2. Мурашов В.В., Румянцев А.Ф. Дефекты монолитных деталей и многослойных конструкций из полимерных композиционных материалов и методы их выявления. Часть 1. – «Контроль. Диагностика», 2007, №4, с. 23–31.
3. Кузнецов А.М., Лившиц В.И., Хисматуллин Е.Р. и др. Сосуды и трубопроводы высокого давления: Справочник. – Иркутск, 1999 – 600 с.

НОВИНКИ ЛИТЕРАТУРЫ

Инженерные основы теплового контроля. Опыт практического применения: Монография / З.Г. Сакихов, О.Н. Будадин, Е.Н. Ишметьев, А.П. Щетинин, Т.Е. Троицкий-Марков и Е.В. Абрамова, – М: ИД МИСиС, 2008, 476 с.

В монографии обобщены и систематизированы современные достижения в области метода и средств теплового неразрушающего контроля с точки зрения его широкого практического применения в различных отраслях промышленности.

Представлен комплексный инженерный подход к созданию технологий теплового контроля: от теоретических основ, включающих теорию инфракрасного излучения, инженерный расчет параметров теплового контроля и оптимальное построение систем, аппаратуры и методик, до нормативно-правового обеспечения и методической базы с учетом последних нормативных документов.

Приведены примеры разработки основ методик теплового контроля технического состояния и энергоэффективности и опыт практического применения в различных отраслях промышленности: металлургии, строительстве, ЖКХ, электроэнергетике, теплоэнергетике, контроля потенциально опасных специальных объектов и т.п.

Монография предназначена для специалистов, аспирантов и студентов, разрабатывающих методики, изучающих и применяющих на практике метод и средства теплового неразрушающего контроля в различных отраслях промышленности для оценки технического состояния материалов, изделий и конструкций.

Вступительное слово

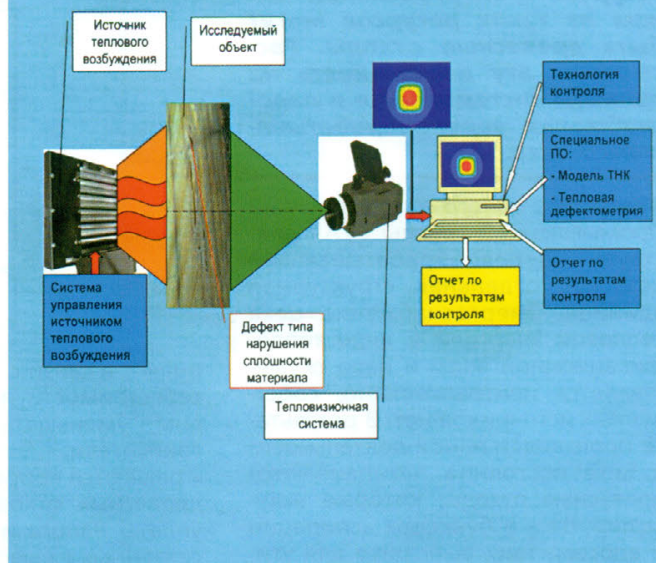
В последние пятнадцать лет в России наметилась тенденция увеличения числа техногенных аварий и катастроф. Одна из основных причин этого явления – большая изношенность основных фондов (на некоторых предприятиях уровень износа составляет до 80%). По различным оценкам, стоимость восстановления основных фондов в России в настоящее время составляет сумму более 800 млрд. долларов США.

Единственным способом снижения роста техногенных аварий и катастроф является 100%-ный контроль и диагностика технического состояния с определением остаточного ресурса изделий и конструкций на всех стадиях их производства и эксплуатации. Своевременно обнаружить и распознать потенциально опасные зоны, узлы, детали – значит принять превентивные меры по ремонту не всего объекта в целом, а его конкретной части.

Инвестиционная привлекательность, а следовательно, и высокий инновационный потенциал этой сферы обеспечиваются тем, что общественное значение диагностики и неразрушающего контроля будет интенсивно возрастать по мере старения основных фондов, устойчивого роста тарифов и цен на энергоносители.

В настоящее время акцент делается на создание компьютеризированной аппаратуры контроля и методов первичной обработки информации, и практически от-

Инженерные основы теплового контроля. Опыт промышленного применения



сутствуют разработки методов анализа внутренней структуры материалов и изделий на основе данных неразрушающего контроля.

В настоящей монографии даны инженерные основы принципиально новых технологий и программно-аппаратных средств для решения широкого круга задач по комплексной диагностике состояния городского хозяйства и промышленных объектов со сложными эксплуатационными характеристиками, в т.ч. с обнаружением и распознаванием параметров внутренних дефектов на основе прогрессивного метода тепловой дефектометрии, с численной оценкой фактического состояния зданий, сооружений, технических устройств и их остаточного эксплуатационного ресурса.

Безусловно, данная монография выходит в печати своевременно и будет с пользой служить для обучения и аттестации широкого круга специалистов в области диагностики эксплуатационного состояния строительных, энергетических и промышленных объектов.

*В.В. КЛЮЕВ,
президент Российского общества
неразрушающего контроля (РОНКТД),
президент 10 ЕСМП, член Европейской академии,
директор ЗАО «НИИИИ «МНПО «Спектр»,
академик РАН, докт. техн. наук., проф.*




Энергослужба предприятия

Plant Power Engineering Magazine

НОВОСТИ ОБЗОРЫ АНАЛИЗ ОПЫТ ЭКСПЛУАТАЦИИ

www.energosp.ru

№4 (34)/2008



ПЕРСПЕКТИВЫ
Энергоносители будут дорожать
ускоренными темпами
стр. 4



ОБОРУДОВАНИЕ
В мировых рекордах
компрессора ГА с впрыском масла
стр. 30

ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ АППАРАТУРА
О «диагностических» функциях
приборов учета тепловой энергии
стр. 47