

Изобретение относится к области неразрушающего контроля и прогнозирования долговечности конструкций и может быть использовано для определения напряжений в стенках элементов конструкций, в частности, толстой плиты, трубы и резервуара (котла) испытывающих нестационарные тепловые воздействия для определения характеристик остаточной прочности и ресурса.

Наиболее близким к заявляемому является способ неразрушающего контроля конструкций с использованием падающих ультразвуковых волн [1], включающий схему вырабатывающую ультразвуковые импульсы и позволяющую производить измерения от двух преобразователей разного типа. Один из преобразователей измеряет сумму двух основных напряжений, а другой преобразователь измеряет разность между этими напряжениями. Микро ЭВМ обеспечивает построение распределения напряжений с использованием опорного сигнала получаемого на основе предыдущих корреляционных данных. Ультразвуковые импульсы направляют на конструкцию и регистрируют их отражения от передней и задней поверхностей при этом находят время, требующееся на прохождение импульса через конструкцию, а по измеренным величинам судят о напряжениях в конструкции путем сравнения данных с предыдущими измерениями.

Недостатком известного способа является низкая точность при определении остаточного ресурса конструкции, обусловленная невозможностью определять распределение напряжений по толщине стенки конструкции, а дает только усредненное значение напряжений, не позволяет рассчитывать термические напряжения для определения долговечности конструкции, так как известный способ не может определять эти величины.

В основу изобретения поставлена задача создание способа неразрушающего контроля конструкций при тепловом воздействии и повышение его точности.

Поставленная задача решается за счет того, что направляют ультразвуковые импульсы на конструкцию и регистрируют их отражение от передней и задней стенки, находят временной интервал между этими импульсами, причем производят многократное непрерывное измерение последовательных временных интервалов между импульсами в процессе теплового нагружения конструкции, определяют по длительности соседних временных интервалов температурное поле в стенках конструкции и его изменение по времени, рассчитывают напряжения в конструкции, находят их наибольшие значения, и по ним судят о долговечности и остаточном ресурсе конструкции.

Предложенный способ позволяет достоверно определять долговечность и остаточный ресурс конструкций при тепловом нагружении и повысить точность контроля за счет непрерывной регистрации в ходе эксплуатации температурных полей, а также распределения напряжений в стенке конструкции.

Сущность заявляемого способа поясняется на примере контроля цилиндрического сосуда, подвергаемого изнутри нестационарному тепловому воздействию (нагрев, охлаждение), вызывающему изменение теплового потока через стенку сосуда. При этом изменяется среднеобъемная температура стенки. Уравнение теплового баланса в рассматриваемом случае имеет вид

$$\dot{\langle T \rangle} = \frac{Q(t)}{cL}, \quad (1)$$

где $\langle T \rangle$ - среднеобъемная температура стенки;

$Q(t)$ - разность тепловых потоков через поверхность стенки;

c - средняя теплоемкость единицы объема;

L - толщина стенки;

t - время,

точка в $\langle T \rangle$ обозначает производную во времени.

В начальной стадии процесса, когда температура внешней поверхности стенки не успевает заметно измениться, перепад температуры и обусловленные ими термонапряжения достигают максимальной величины. При этом температурный профиль в стенке определяется уравнением теплопроводности

$$a \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{\partial T}{\partial t},$$

где a - температуропроводность;

x - расстояние от внутренней стенки по нормали от оси цилиндра;

t - время,

и имеет вид

$$T(x,t) = \frac{1}{\sqrt{\pi c \lambda}} \int_0^t \frac{Q(t-z)}{\sqrt{z}} e^{-\frac{x^2}{4az}} dz, \quad (2)$$

(Карслоу Г. Егер Д. Теплопроводность твердых тел. - М.: Наука, 1964. - С.80).

где λ - теплопроводность.

Изменение среднеобъемной температуры $\langle T \rangle$ моделируется изменением времени τ прохождения акустического сигнала.

Очевидно, что

$$\tau_0 = \frac{2L}{V_0}, \quad (3)$$

где τ_0 - временной интервал между акустическими импульсами, отраженными от наружной и внутренней стенки цилиндра в исходном состоянии при отсутствии изменения теплового потока

V_0 - скорость акустических волн в исходном состоянии.

Поскольку скорость V акустических волн определяется упругими модулями стенки (Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М. Теория упругости. - М.: Наука, 1965. - С.131), а эти последние зависят от температуры (Францевич И.Н.,

Воронов Ф.Ф., Бакута С.А. Упругие постоянные металлов и неметаллов: Справ. - К.: Наук. думка, 1982), как и толщина стенки L , то время τ также является функцией температуры. В линейном приближении по изменению температуры эту зависимость можно представить в виде

$$\tau(t) = \tau_0 [1 + A(\langle T \rangle - T_0)], \quad (4)$$

где T_0 - исходная средняя температура стенки, не зависящая от времени;

A - температурный коэффициент, являющийся константой материала, имеющий порядок величины $10^{-4}K^{-1}$ и определяемый предварительно экспериментально на данном изделии по изменению τ $\langle T \rangle$ или расчетным путем.

Поскольку, согласно (4)

$$\tau = \tau_0 A \langle T \rangle, \quad (5)$$

то из (1), (2) и (5) следует выражение для температурного профиля, исходя из измеренных в хронологической последовательности величин временных интервалов τ

$$T(x, t) = \frac{V_0}{2 A \sqrt{\pi a}} \int_0^t \frac{\tau(t-z)}{\sqrt{z}} e^{-\frac{x^2}{4az}} dz. \quad (6)$$

Используя выражение для температурного профиля по толщине стенки $T(x, t)$, согласно (6), рассчитывают искомые температурные напряжения в стенке цилиндрического сосуда (Мелан Э., Паркус Г. Температурные напряжения, вызываемые стационарными температурными полями. - М.: Физматгиз, 1958).

$$\sigma_{rr}(r, t) = \frac{\alpha E}{2(1-\mu)} \left(1 - \frac{R_i^2}{r^2}\right) [\langle T(R_a, t) \rangle - \langle T(r, t) \rangle],$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\varphi\varphi}(r, t) = & \frac{\alpha E}{2(1-\mu)} \left[1 + \frac{R_i^2}{r^2}\right] \langle T(R_a, t) \rangle + \\ & + \left(1 - \frac{R_i^2}{r^2}\right) \langle T(r, t) \rangle - 2T(r, t), \end{aligned} \quad (7)$$

$$\sigma_{zz} = d_{rr} + \sigma_{\varphi\varphi}$$

$$\langle T(r, t) \rangle = \frac{2}{r^2 - R_i^2} \int_{R_i}^r x T(x - R_i, t) dx$$

$$\langle T(R_a, t) \rangle = \frac{2}{R_a^2 - R_i^2} \int_{R_i}^{R_a} x T(x - R_i, t) dx, \quad (8)$$

где α - коэффициент термического расширения материала конструкции;

E - модуль Юнга;

μ - коэффициент Пуассона;

R_i, R_a - соответственно внутренний и наружный радиусы цилиндра;

$r = R_i + x$ - расстояние от оси цилиндра.

Дополнительные возможности представляет способ при определении напряжений, вызываемых изменением давления рабочего тела внутри сосуда. Промежуточным вариантом является совместное действие на стенку сосуда изменения давления и температуры.

Обусловленные давлением внутри сосуда напряжения (Мелан Э., Паркус Г. Термоупругие напряжения вызываемые стационарными температурными полями. - М.: Физматгиз, 1958. - С.53).

$$\sigma_{rr}(x, t) = \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} p(t) \left[1 - \frac{R_a^2}{(R_i + x)^2}\right],$$

$$\sigma_{\varphi\varphi}(x, t) = \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} p(t) \left[1 + \frac{R_a^2}{(R_i + x)^2}\right],$$

$$\sigma_{zz} = \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} p(t) \quad (9)$$

где $p(t)$ - текущее значение давления;

t - время;

R_a, R_i - наружный и внутренний радиусы стенки сосуда;

x - расстояние от внутренней стенки по радиусу.

Напряжения (9) также влияют на время $\tau(t)$ прохождения акустического эхо-сигнала (через изменение плотности и модулей упругости материала стенки). Эта зависимость, аналогично (4), может быть выражена через изменение $\Delta\sigma$ шпура тензора напряжений

$$\alpha(t) = \sum_i \sigma_{ii} = 3p(t) \frac{R_i^2}{R_a^2 - R_i^2} \quad (10)$$

и в линейном приближении по величине $\Delta\sigma$ имеет вид

$$\tau(t) = \tau(0) \left(1 + A_p \frac{\Delta\sigma}{E} \right), \quad (11)$$

где t - текущее значение времени;

$\tau(t)$ - время прохождения эхо-сигнала в напряженном состоянии;

$\tau(0)$ - время $\tau(t)$ в момент $t = 0$, до начала нестационарного режима;

$\Delta\sigma = \sigma(t) - \sigma(0)$ - изменение шнура напряжений в нестационарном режиме;

E - модуль Юнга;

A_p - безразмерный коэффициент порядка единицы, определяемый более точно в калибровочном эксперименте.

Из (10) и (11) следует

$$\frac{\tau(t) - \tau(0)}{\tau(0)} = 3A_p \frac{R_f^2}{R_a^2 - R_f^2} \cdot \frac{p(t) - p(0)}{E} \quad (12)$$

где $p(t)$ - текущее значение давления;

$p(0)$ - начальное давление при;

t - время.

С применением формулы (12) по известным величинам A_p , R_i , R_a и E , а также измеряемым $\tau(0)$, $p(0)$, $p(t)$ рассчитывают изменение $\tau(t)$ в нестационарном режиме, обусловленное изменением давления.

В случае совместного действия температуры и давления из измеренного значения $\tau(t)$ выделяют часть, обусловленную изменением температуры стенки конструкции. Таким образом, например, в расчете остаточного ресурса конструкции при изменении давления внутри сосуда учитывают, напряжения, обусловленные этим изменением по формуле (9).

Для установления остаточного ресурса конструкции определяют из (7) наибольшие значения напряжений для каждого i -го цикла нагружения, по известной кривой усталости для данного материала находят долговечность N_i , соответствующую этим напряжениям, устанавливают число n циклов нагружения и соответствующую поврежденность, исходя, например, из правила линейного суммирования усталостных повреждений (Серенсен С.В. Шнейдерович Р.М. Прочность при малоцикловом нагружении. Основы методов расчета и испытаний. - М.: Наука, 1975. - С.90; Махутов Н.А. Деформационные критерии разрушения и расчета элементов конструкций на прочность. - М.: Машиностроение, 1981. - С.48):

$$\delta = \sum_{i=1}^n \frac{1}{N_i},$$

а остаточный ресурс определяют из выражения

$$t_{ост} = t_{пр} (1 - \delta),$$

где $t_{пр}$ - проектный ресурс.

Если напряжение конструкции ниже предела усталости, то $N_i \rightarrow \infty$ и соответственно $\frac{1}{N_i} \rightarrow 0$, т.е. эти значения напряжений не дают вклада в поврежденность.

Предложенным способом были определены термомеханические напряжения в образце-свидетеле фрагмента стенки корпуса реактора ВВЭР-440 Ровенской АЭС (сталь 15Х2МФА). В образец, один конец которого разогревался до температуры 100К, непрерывно вводились импульсы ультразвука с интервалом в 1с. Измерялись временные интервалы τ между импульсами, отраженными от передней и задней поверхности образца. До разогрева образца длительность интервала τ составила 53мкс и измерялась при разогреве в соответствии с выражением (4). По изменению длительности соседних временных интервалов τ определялся температурный профиль в образце по формуле (6) и его изменение во времени, определялись из (7) напряжения в образце. Их наибольшее значение составило 290МПа, которому соответствует долговечность

$$\delta = \frac{1}{N} = 0,03\%$$

$N = 3 \cdot 10^3$ циклов до разрушения. Поврежденность δ за один цикл составила . Измерения времени задержки τ проводились с помощью оригинальной прецизионной аппаратуры, позволяющей измерять временные интервалы с точностью до 1нс, а результаты расчета контролировались прямыми измерениями температуры термопары, на концах и посередине образцов. Сопоставление температур измеряемых контрольными термопарами и определенных описанным способом не превышает 3%, что находится в пределах погрешности показаний термопар.

Расчет температурного профиля и напряжений в образце проводился по специальной программе на IBM-PC286.

Точность определения указанных величин по сравнению с известными способами повышается в 5 - 10 раз, т. к. известные способы основываются лишь на грубой оценке средних величин напряжений из температурных перепадов. Так, например, температурные напряжения обычно определяют по формуле $\sigma = \alpha E \Delta T$ (где α - температурный коэффициент расширения, E - модуль Юнга материала, ΔT - изменение температуры за цикл теплового нагружения в прогнозируемом нестационарном режиме). Это формула дает лишь приблизительную оценку средних термических напряжений, а не их распределение по толщине стенки конструкции (Лэнджер В.Ф. Расчет сосудов давления на малоцикловую долговечность, Journ. of Basic Engineering, 1962, русск. изд.: журнал Техническая механика, №3, 1962 - Труды американского общества инженеров-механиков. Эта методика оценки термонапряжений повсеместно принята в расчетах сосудов и по настоящее время.

Повышение точности контроля в предлагаемом способе пропорционально повышению точности

определения разности между средней температурой конструкции и средней температурой слоя, на границе которого находят напряжения (см. формулу (7), и как показали расчеты на ЭВМ, определение этой разности в 5 - 10 раз (в зависимости от координаты границы слоя) точнее, чем оценка средних температурных перепадов.

Указанные преимущества, выражающиеся в повышенной точности способа контроля, особенно существенны при неоднородном материале стенки конструкции, например в многослойных конструкциях, в особенности из разнородных материалов. Применение при реализации способа бесконтактных измерений с помощью электромагнитной генерации и регистрации акустических волн, основанной на явлении объемной магнитострикции в изделиях из ферромагнитных материалов (Дефектоскопия, 1986, №3, с.35 - 41, Гуревич С.Ю., Гальцев Ю.Г., Каунов А.Д., Система для бесконтактного УЗ контроля труб при высоких температурах), значительно расширяет диапазон рабочих температур конструкций, подлежащих контролю и обеспечивает возможность использования способа для нужд активного контроля конструкций непосредственно в ходе эксплуатации.

Реализация способа возможна как в лабораторных условиях, так и в промышленности.