

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД КОНТРОЛЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ КАНАЛОВ ЯДЕРНЫХ РЕАКТОРОВ ТИПА РБМК НА ОСНОВЕ ЭФФЕКТА АКУСТОУПРУГОСТИ

М. А. Трофимов

Обнинский институт атомной энергетики, г. Обнинск



Проведен анализ теоретических работ, посвященных эффекту акустоупругости. Рассмотрены модули второго и третьего порядка, их количественная оценка. На основе результатов анализа предложено обоснование метода контроля напряженного состояния металла технологических каналов ядерных реакторов типа РБМК.

Контроль состояния технологических каналов (ТК) является одной из основных задач диагностики оборудования ядерных реакторов типа РБМК. ТК состоит из циркониевой части, которая находится в активной зоне ядерного реактора, и стальной, расположенной вне активной зоны (рис. 1). Между ТК и графитовой кладкой расположены упругие графитовые кольца. Величина зазора между ТК с графитовыми кольцами и графитовой кладкой составляет 3 мм. В результате процессов термодинамической ползучести и радиационного роста диаметры канальных труб увеличиваются, а отверстий в графитовых блоках уменьшаются [1]. Это приводит к выбору “зазора” и заклиниванию ТК. При этом в металле ТК создаются механические напряжения, которые могут привести к разрушению ТК. Особенно важным является измерение напряжений металла ТК в районе внутреннего стыка переходников сталь – цирконий, где чаще всего появляются трещины в стенках ТК.

К настоящему времени накоплен большой опыт контроля геометрических параметров ТК. Разработаны системы контроля искривления, диаметра, толщины стенки ТК, сплошности металла ТК [2,3]. В данной работе предлагается ультразвуковой метод контроля напряженного состояния металла ТК.

Для ультразвукового контроля напряженного состояния металла ТК используется нелинейный акустический эффект акустоупругости. Впервые эффект акустоупругости был обнаружен Бенсоном и Раельсоном [4]. Открытие этого эффекта позволило создать новый метод неразрушающего контроля напряженного состояния металла в различных конструкциях. Исследованию этого метода посвящены многочисленные теоретические и экспериментальные работы зарубежных и отечественных исследователей. Наиболее полная информация дана в фундаментальных работах [5-8].

$$+ \frac{1}{3!} \frac{\partial^3 \Phi(U_{ik})}{\partial U_{ik} \partial U_{ij} \partial U_{qr}} U_{ik} U_{ij} U_{qr} + \dots \quad (3)$$

Физическая нелинейность определяется коэффициентами, стоящими перед членами высшего порядка малости.

Для описания закономерностей распространения упругих волн в напряженных изотропных телах применяется линеаризованная теория акустоупругости, построенная с использованием одной форм упругого потенциала – трех инвариантного упругого потенциала Мурнагана:

$$\Phi = \frac{\lambda + 2\mu}{2} J_1^2 - 2\mu J_2 + \frac{\lambda + 2\bar{m}}{3} J_1^3 - 2\bar{m} J_1 J_2 + n J_3, \quad (4)$$

где $J_1 J_2 J_3$ – главные инварианты тензора деформации Грина; λ, m, n – постоянные Мурнагана, которые не зависят от компонентов тензора деформации и определяются термодинамическим состоянием металла, λ и μ – постоянные Ламе.

Упругий потенциал типа Мурнагана представляют также в виде:

$$\Phi = \frac{1}{2} \lambda A_1^2 + \mu A_2 + \frac{a}{3} A_1^3 + b A_1 A_2 + \frac{c}{3} A_3, \quad (5)$$

где A_1, A_2, A_3 – алгебраические инварианты, связанные с главными инвариантами тензора деформации Грина соотношениями:

$$J_1 = A_1; J_2 = \frac{1}{2}(A_1 - A_2); J_3 = \frac{1}{6}(A_1^3 + 3A_1 A_2 + 2A_3). \quad (6)$$

Уравнения зависимости скорости ультразвуковых волн от механических напряжений выражаются через модули упругости: постоянные Ляме λ и μ ; коэффициент Пуассона ν ; модуль Юнга E ; модуль всестороннего сжатия k и модули Мурнагана λ, m, n .

В изотропном теле скорость распространения ультразвуковых волн не зависит от направления распространения волны, а зависит только от типа волны: продольной V_{l0} или сдвиговой $V_{\tau 0}$. Если к телу приложена сила в направлении оси z , то в нем могут распространяться две продольные волны со скоростями V_{zz} и $V_{xx} = V_{yy}$ и три сдвиговые волны: $V_{yz} = V_{xz}$; $V_{yx} = V_{xy}$; $V_{zy} = V_{zx}$.

Относительное изменение скорости различных типов волн при действии механического напряжения σ определяется выражениями:

$$\frac{\Delta V_{zz}}{V_{l0}} = \frac{\sigma}{a_1} \left[\lambda + \frac{\lambda + \mu}{\mu} (4\lambda + 10\mu) \right] + \frac{\sigma}{a_1} (2l + 4 \frac{\lambda + \mu}{\mu} m); \quad (7)$$

$$\frac{\Delta V_{yy}}{V_{l0}} = \frac{\sigma}{a_1} (4\lambda + 2 \frac{\lambda^2}{\mu}) + \frac{\sigma}{a_1} (2 \frac{\lambda m}{\mu} - 2l); \quad (8)$$

$$\frac{\Delta V_{yz}}{V_{\tau 0}} = \frac{\sigma}{a_2} (\lambda + 2\mu) + \frac{\sigma}{a_2} (\frac{\lambda \cdot n}{4\mu} + m); \quad (9)$$

$$\frac{\Delta V_{yx}}{V_{\tau 0}} = \frac{\sigma}{a_2} 2\lambda + \frac{\sigma}{a_2} (\frac{\lambda + \mu}{2\mu} n - m); \quad (10)$$

$$\frac{\Delta V_{zy}}{V_{\tau 0}} = \frac{\sigma}{a_2} (4\lambda + 4\mu) + \frac{\sigma}{a_2} (m + \frac{4n}{4\mu}); \quad (11)$$

$$\frac{V_{yz-yx}}{V_{\tau 0}} = -\frac{\sigma}{8\mu^2}(4\mu + n); \quad (12)$$

$$\frac{\Delta V_{zy-yx}}{V_{\tau 0}} = \frac{\sigma}{2\mu}, \quad (13)$$

где a_1 и a_2 – координаты точки в исследуемом образце.

$$a_1 = 6k_0(\lambda + 2\mu); a_2 = 6k_0\mu.$$

$$\Delta V_{yz-yx} = \Delta V_{yz} - \Delta V_{yx}; \Delta V_{zy-yx} = \Delta V_{zy} - \Delta V_{yz}.$$

В случае всестороннего гидростатического сжатия выражения для акустоупругости имеют вид:

$$\frac{\Delta V_{lp}}{V_{l0}} = \frac{p}{a_1}(7\lambda + 10\mu) + \frac{p}{a_1}(4m + 6l); \quad (14)$$

$$\frac{\Delta V_{\tau p}}{V_{\tau 0}} = \frac{p}{a_2}(3\lambda + 6\mu) + \frac{p}{a_2}(3\bar{m} - \frac{n}{2}). \quad (15)$$

Зная значения коэффициентов, можно определить зависимость относительно изменения скорости от механического напряжения. Относительное изменение скорости можно записать в общем виде:

$$\frac{\Delta V_{\bar{m}n}}{V_{r0}} = (\beta_{\sigma_1} + \beta_{\sigma_2}) \cdot \sigma, \quad (16)$$

где $\beta_{\sigma_1} = \beta(\lambda, \mu)$ – акустоупругий коэффициент, определяемый постоянными упругости второго порядка Ламе λ и μ и обусловленный геометрической нелинейностью; $\beta_{\sigma_2} = \beta_{\sigma}(\lambda, \mu, l, m, n)$ – акустоупругий коэффициент, зависящий как от постоянных Ламе, так и от постоянных упругости третьего порядка Мурнагана l, m, n и обусловленный физической нелинейностью. В табл.1 приведены значения коэффициентов β_{σ_1} и β_{σ_2} для сталей, рассчитанных по их значениям упругих модулей.

Таблица 1

Значения коэффициентов β_{σ_1} и β_{σ_2} для сталей, рассчитанных по их значениям упругих модулей

Материал	Акусто- упругий коэфф.	$\frac{\Delta V_{zz}}{V_{l0}}$	$\frac{\Delta V_{yy}}{V_{l0}}$	$\frac{\Delta V_{yz}}{V_{\tau 0}}$	$\frac{\Delta V_{yx}}{V_{\tau 0}}$	$\frac{\Delta V_{zy}}{V_{\tau 0}}$
Никелевая сталь 535	β_{σ_1}	0,113	0,027	0,034	0,027	0,09
	β_{σ_2}	-0,126	-0,033	-0,1	-0,03	-0,1
Сталь 60С2Н2А	β_{σ_1}	0,111	0,031	0,032	0,031	0,09
	β_{σ_2}	-0,21	-0,045	-0,102	-0,048	-0,1
Сталь ЭП-56	β_{σ_1}	0,117	0,028	0,035	0,028	0,092
	β_{σ_2}	-0,323	-0,043	-0,152	-0,075	-0,152

Подставив значения акустоупругих коэффициентов β_{σ_1} и β_{σ_2} в выражение продольной или сдвиговой волны, получим относительное изменение скорости ультразвука продольной или сдвиговой волн в соответствующем направлении (выражения 7-15).

Прозвучивание стенок технологического канала осуществляется продольными и поперечными волнами, формируемыми блоком ультразвуковых преобразователей (рис. 2), имеющего возможность вращаться и перемещаться внутри канала при

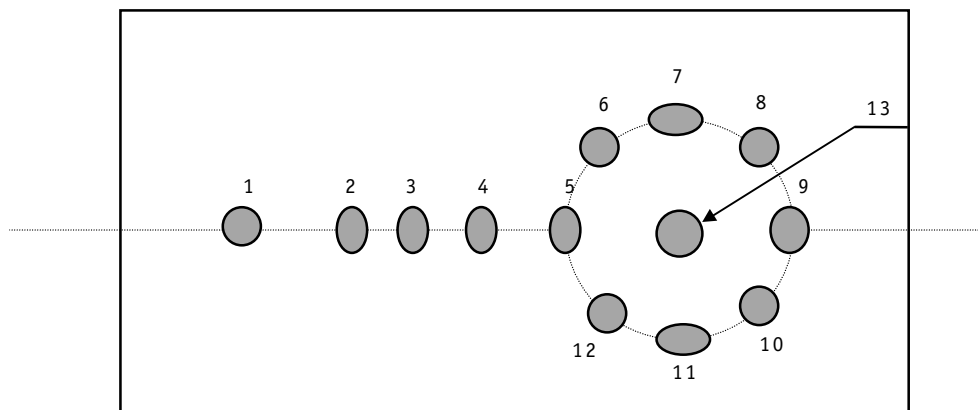


Рис. 2. Общий вид блока ультразвуковых преобразователей: 1,13 - прямые ПЭП; 2,3,4,5,6,7,8,9,10,11,12 - наклонные ПЭП

помощи специального механизма. Частота излучаемого ультразвука $f=5$ МГц (подбор частоты проводился на основании расчетов и экспериментальных результатов). Для обеспечения распространения поперечной ультразвуковой волны под углом 45° (угол определен экспериментально и на основании расчетов) в металле стенки канала угол наклона преобразователей выбран $21^\circ 37'$ (рассчитан на основании закона Снеллиуса). Система контроля содержит тринадцать преобразователей. Это позволяет определять скорости продольных и поперечных волн на данном участке канала. Поперечная волна формируется в металле стенки технологического канала 9 излучающим, а принимается 2, 3, 4, 5 пьезопреобразователями. Таким образом получаем четыре диаграммы амплитуд поперечных волн. С помощью пьезопреобразователей 1 и 13, ориентированных перпендикулярно, определяется скорость продольной волны и измеряется расстояние до стенки канала, что обеспечивает контроль параллельности блока УЗП и образующей канала. Преобразователями 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12 производится ультразвуковой контроль на наличие несплошностей. Экспериментально установлено, что время прихода поперечной УЗ волны, при прикладывании напряжений, уменьшается на 3-8 мкс. Таким образом, измеряя скорости продольных и поперечных ультразвуковых волн, можно определить упругие постоянные E , G , K , ν (модуль упругости, модуль сдвига, модуль объемного сжатия, коэффициент Пуассона) и, следовательно, оценить поведение материала в условиях напряженного состояния. Точное измерение скоростей дает возможность определить также упругие постоянные высшего порядка, зависимости деформаций от напряжений. Контроль производится путем построчного перемещения УЗП по окружности трубы.

Для реализации данного способа измерения относительного состояния в материале ТК необходимо знать значения скоростей продольной и сдвиговых волн в ненапряженном состоянии.

В настоящее время в проблемной лаборатории "Контроль и диагностика АЭС" Обнинского института атомной энергетики проводится практическая реализация данного метода контроля напряженного состояния металла ТК.

Список литературы

1. Белянин Л.А., Лебедев В.И., Гарусов Ю.В. и др. Безопасность АЭС с канальными реакторами. Конструкция активной зоны. - М.: Энергоатомиздат, 1997.
2. Трофимов А.И. Ультразвуковые системы контроля искривлений технологических каналов ядерных реакторов. - М.: Энергоатомиздат, 1994.

3. Трофимов А.И., Виноградов С.А., Балдин В.Д. и др. Техника многофункциональной диагностики технологических каналов ядерных реакторов с использованием автоматизированного позиционного электропривода // Известия вузов. Ядерная энергетика. – 1997. – №6.
4. Benson R.W., Raelson V.G. Aconstoelasticity // Product Engineering. – 1959. – №29. – P. 56 – 59.
5. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику - М.: Наука, 1966.
6. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. - Киев: Наукова думка, 1977.
7. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. - Кишинев: Штиинца, 1981.
8. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. - Кишинев: Штиинца, 1991.
9. Труэлл Р., Эльбаум Ч., Гик Б. Ультразвуковые методы в физике твердого тела (пер. с англ.) / Под ред. И.Г. Михайлова. - М.: Мир, 1972.

Поступила в редакцию 10.11.99.

ABSTRACTS OF THE PAPERS

УДК 621.039.566

Calculation of the Resource Performances of Equipment under Nonlinear Effects of Degradation Processes \ O.M. Gulina, N.L. Sal'nikov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 5 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 4 titles.

The method of nonlinear summation of damages for calculation of the resource performances of equipment working under corrosion and the change of modes of operation conditions is developed. Parameter describing the process of degradation of a material under these conditions is introduced, and the equation for estimation of this parameter is obtained. For the solution of the problem the statistics on failures of equipment and the dependence of time before failure from parameters of medium and performances of a material is utilized.

УДК 620.179.16

Ultrasonic Method of Control of Stressed State of a Metal for Technological Channels of RBMK-type Nuclear Reactors on the Basis of Acousto-elasticity Effect \ M.A. Trofimov; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 6 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, 9 titles.

The analysis of theoretical investigations devoted to the acoustic elasticity effect is carried out. Modules of the second and the third order and their quantitative assessments are considered. On the basis of the analysis results the theoretical basing of the control method of stressed state for the metal of technological channels of RBMK-type nuclear reactors is proposed.

УДК 62-762.6: 62-13.621.318

Magnetic End Sealing \ Jan Fidler; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 4 pages, 2 illustrations, 1 table. – References, titles.

End sealing of rotated heat installations, such as steam turbines, used both for classical heat power stations and for NPPs are very important from the point of view of providing the tight and reliability of equipment. To secure the sealing between the rotors are usually used the labyrinth noncontact sealings. Besides the classical noncontact and contact sealings tested by long-lived operational experience, the magnetic end sealings with the powder seal have been developed. However, the field of their applicability is restricted. The opportunities of usage this sealings are discussed in the paper.

УДК 620.179.1: 621.039.004.58

Calculation of Optimal Travel Velocity of a Transducer during Nondestructive Control of NPP's Lengthy Objects \ V.V. Chegodaev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 3 pages, 1 illustration. – References, 3 titles.

The calculation of optimum velocity based on the main criteria of optimization of travel velocity of a transducer (in particular minimization of the control time and parameters of minimal defects) are given. The basing of the calculation using the V.A. Kotelnikov theorem is given. The expression for evaluation of the maximal travel velocity of the transducer is obtained and the example of calculation is given.

УДК 621.039.526

Optimization of the Characteristics of Inherent Self-Protection of Fast Reactors Cooled Potassium-Heavy Metal Alloys \ A.M. Kuzmin, V.S. Okunev; Editorial board of journal "Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika" (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 1999. – 9 pages, 5 tables. – References, 5 titles.

Some optimal inherent safety characteristics of LMFRs cores cooled with K-Pb and K-Bi alloys are analysed and presented in this paper. The core concept is based on the BN-800