

# ИЗМЕРЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ И ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ АЭС НА ОСНОВЕ ТЕОРИИ АКУСТОУПРУГОСТИ

**А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов**

*Обнинский институт атомной энергетики ИАТЭ НИЯУ МИФИ  
249040, Калужская область, г. Обнинск, Студгородок, д.1*



Представлены результаты теоретического обоснования и экспериментальных исследований метода измерения напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС на основе теории акустоупругости, а также способы их технической реализации. Устройства измерения напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС, работающие на основе теории акустоупругости, позволяют оперативно измерять остаточные напряжения по высоте сварного соединения, обнаруживать места образования трещин. Применение таких устройств дает возможность проводить раннюю диагностику сварных соединений, что позволит повысить безопасность эксплуатации АЭС.

**Ключевые слова:** акустоупругость, сварные соединения, напряженное состояние, ранняя диагностика.

## **ВВЕДЕНИЕ**

Главные циркуляционные трубопроводы Ду 850, корпус реактора, 111-ый шов приварки «горячего» коллектора теплоносителя первого контура к патрубку Ду 1200 парогенератора ПГВ-1000 являются наиболее напряженными элементами конструкции АЭС с реакторами типа ВВЭР-1000. Технологические каналы, сварные швы трубопроводов Ду 300 КМПЦ и главных циркуляционных трубопроводов Ду 800 являются наиболее напряженными элементами конструкции АЭС с реакторами типа РБМК-1000.

В состав главного циркуляционного контура ядерной энергетической установки водородного типа ВВЭР-1000 входят реактор и четыре циркуляционных петли, каждая из которых включает в себя горизонтальный парогенератор, главный циркуляционный насос и главный циркуляционный трубопровод с условным диаметром 850 мм (Ду 850), соединяющий оборудование петли с реактором (рис. 1).

© **А.И. Трофимов, С.И. Минин, М.А. Трофимов, 2016**

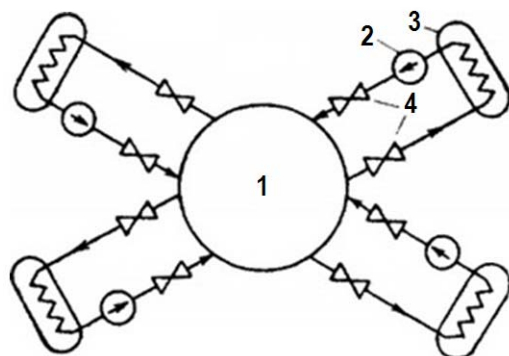
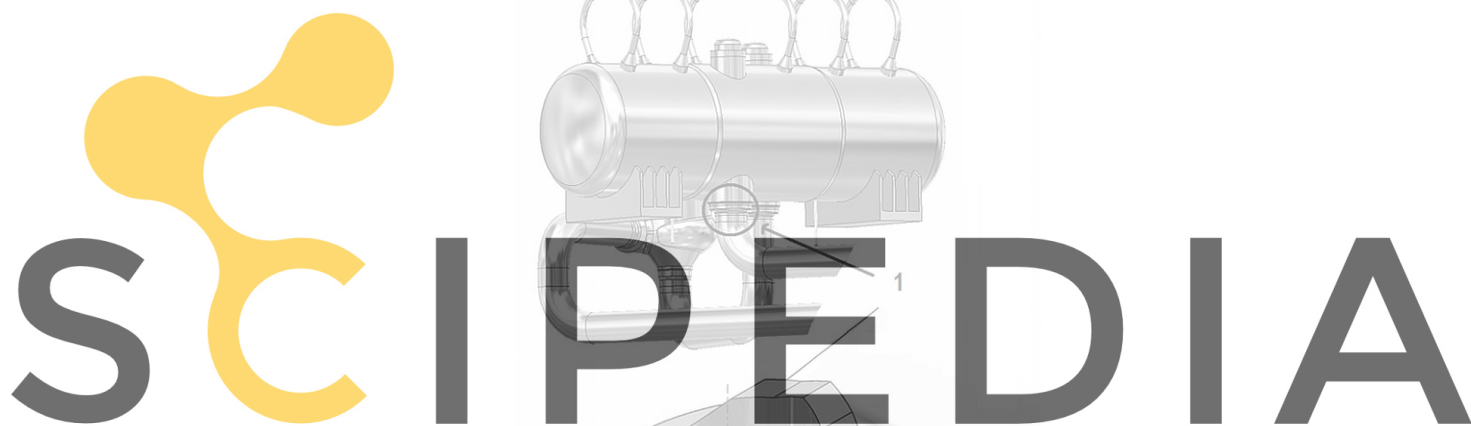


Рис. 1. Принципиальная схема реактора ВВЭР-1000: 1 – реактор; 2 – ГЦН; 3 – парогенератор; 4 – арматура



Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

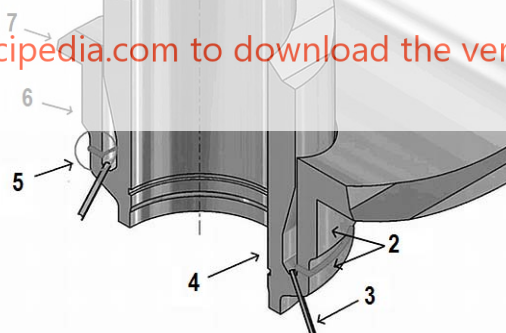


Рис. 2. Внешний вид парогенератора ПГВ-1000: 1 – сварной шов №111; 2 – места концентрации напряжений; 3 – патрубок продувки Ду 800; 4 – коллектор; 5 – зона разрушения сварного шва №111; 6 – патрубок парогенератора; 7 – корпус парогенератора

Энергия деления ядерного топлива в активной зоне реактора отводится теплоносителем, прокачиваемым через нее главными циркуляционными насосами. Из реактора «горячий» теплоноситель по главным циркуляционным трубопроводам поступает в парогенераторы, где отдает тепло котловой воде второго контура и затем главными циркуляционными насосами возвращается в реактор. Вырабатываемый во втором контуре парогенераторов сухой насыщенный пар поступает на турбины турбогенератора. Корпус реактора представляет собой вертикальный цилиндрический сосуд и состоит из фланца, зоны патрубков, опорной обечайки и цилиндрической части с эллиптическим днищем. Парогенератор ПГВ-1000 представляет собой однокорпусный теплообменный

аппарат горизонтального типа. Опыт эксплуатации парогенераторов ПГВ-1000, начиная с 1998 г., показывает, что в зоне сварного соединения № 111 (рис. 2) регулярно зарождаются и растут эксплуатационные трещины. В ряде случаев трещина проходит через всю толщину стенки корпуса (70 мм) до образования течи теплоносителя.

На сварные соединения технологического оборудования, циркуляционных трубопроводов реакторов ВВЭР-1000 и РБМК-1000, по которым перемещается теплоноситель, действует большое количество внешних нагрузок: собственный вес и вес теплоносителя, внутреннее давление, пульсации давления, температурные напряжения, наличие зон концентрации напряжения в местах соединения с патрубками. В результате в сварных соединениях возникают напряжения, которые при определенной величине могут привести к разрушению металла.

### **АКУСТИЧЕСКИЙ МЕТОД ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ МЕТАЛЛА**

Физические методы измерения механических напряжений получили значительное развитие в 1980-1990-х гг. Важные результаты были достигнуты в области рентгеновских, акустических, магнитных и тензометрических методов контроля.

США с начала 1980-х гг. лидируют в исследованиях магнитошумовых методов. В Европе с середины 1980-х гг. развиваются акустические методы контроля (Франция, Германия, Швейцария). В Японии с начала 1980-х гг. развиваются рентгеновские методы.

Практически единственным методом, позволяющим оперативно проводить измерение напряженного состояния металла по толщине технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС, является акустический метод, основанный на измерении скорости, амплитуды и частоты акустического сигнала при прохождении его через контролируемую среду. По зависимости скорости и затухания ультразвуковых волн в материале от его состава, структуры и преимущественной ориентации зерен определяют упругостные и прочностные характеристики. Измерение скорости продольных и поперечных волн в поликристаллических материалах дает возможность получить численные значения модулей упругости, а в монокристаллических – констант упругой анизотропии [1, 2].

Метод ультразвукового контроля напряженного состояния металла основан на нелинейном акустическом эффекте акустоупругости. Впервые этот эффект был обнаружен Бенсоном и Раельсоном [3]. Открытие этого эффекта позволило создать новый метод неразрушающего контроля напряженного состояния металла в различных конструкциях – акустическую тензометрию. Акустическая тензометрия основана на регистрации изменения скорости распространения упругих волн под влиянием напряжения в объекте контроля. Известно, что изменение скорости пропорционально величинам напряжения или деформации в объекте контроля. Важное достоинство акустической тензометрии – контроль напряжений не только на поверхности, но и внутри объекта. Установлено, что амплитуда сигнала уменьшается при напряжениях растяжения и увеличивается при напряжениях сжатия, т.е. существует зависимость амплитуды от величины и знака напряжений. Более сильная зависимость наблюдается при напряжениях сжатия. Скорость волны, поляризованной вдоль действующих напряжений, не равна скорости волны, поляризованной поперек напряжений. Различие в скоростях тем больше, чем значительнее приложенные напряжения. По разности скоростей можно судить о величине и знаке напряжений. В Обнинском институте атомной энергетики (ИАТЭ НИЯУ МИФИ) разработано и изготовлено автоматизированное устройство измерения напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС на основе теории акустоупругости (рис. 3).

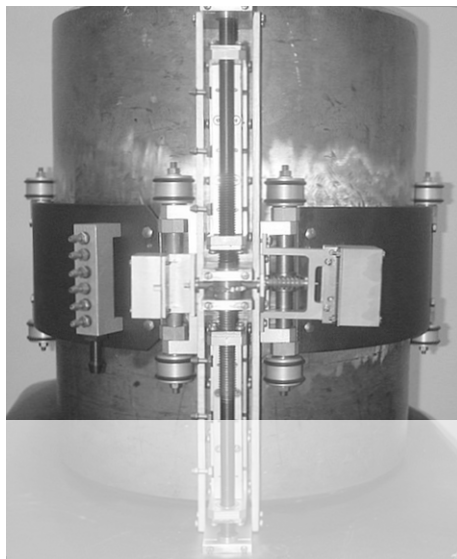


Рис. 3. Автоматизированное устройство измерения напряженного состояния сварных соединений технологического оборудования и циркуляционных трубопроводов АЭС

Разработаны и изготовлены автоматизированные устройства измерения напряженного состояния металла стенок технологических каналов реакторов РБМК-1000 и корпуса реактора ВВЭР-1000. Блоки ультразвуковых преобразователей приведены на рис. 4 и 5.

SCIPEDIA

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark

Рис. 4. Ультразвуковой блок для измерения напряженного состояния металла стенок технологических каналов реакторов РБМК-1000

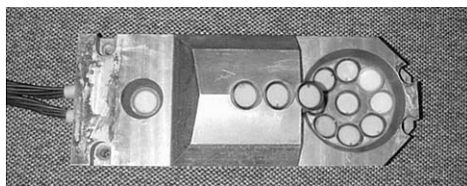


Рис. 5. Ультразвуковой блок для измерения напряженного состояния металла корпуса реакторов ВВЭР-1000

### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

Проведены экспериментальные исследования для материалов, применяемых на АЭС с реакторами ВВЭР-1000 и РБМК-1000, показывающие зависимость амплитуды и скорости ультразвуковой волны от величины действующих напряжений (рис. 6 – 8). Из рисунков 6 и 7 видно, что при увеличении сжимающих напряжений скорости продольной и поперечной волн и их амплитуды возрастают. Величина амплитуды ультразвуковой волны изменяется также от акустического контакта между ультразвуковым преобразователем и поверхностью контролируемого трубопровода, поэтому для практических целей используется измерение скорости ультразвуковой волны в зависимости от напряжений.

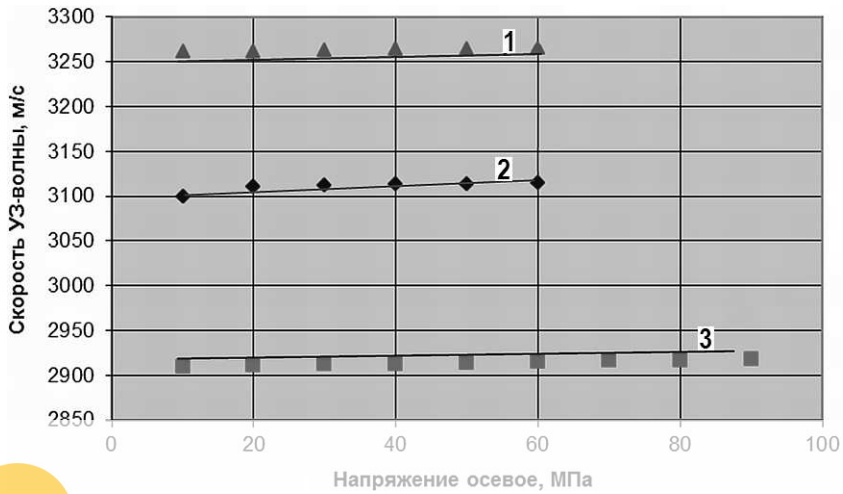


Рис. 6. Характеристики зависимости скорости поперечных волн от механических напряжений для сталей: 1 – ZrNb; 2 – сталь 08X18H10T; 3 – сталь Ст3

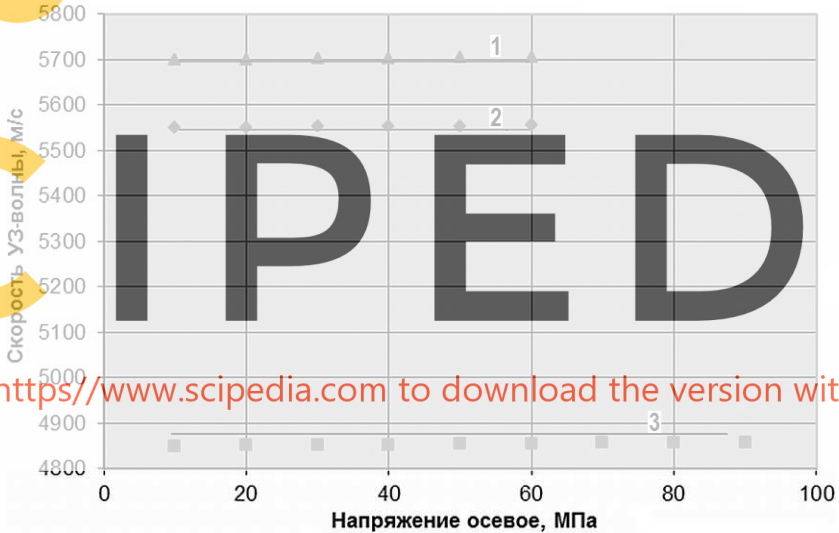


Рис. 7. Характеристики зависимости скорости продольных волн от механических напряжений для сталей: 1 – ZrNb; 2 – сталь 08X18H10T; 3 – сталь Ст3

### РАСЧЕТ НАПРЯЖЕНИЙ

Для оперативности проведения измерений в случае двухосного напряженного состояния напряжения можно вычислить по формулам [4]

$$y_z = K_1((t_{01}t_3/t_{03}t_1) - 1) - K_2((t_{02}t_3/t_{03}t_2) - 1), \quad (1)$$

$$y_t = K_1((t_{02}t_3/t_{03}t_2) - 1) - K_2((t_{01}t_3/t_{03}t_1) - 1), \quad (2)$$

где  $y_z$  – осевые напряжения, МПа;  $y_t$  – окружные напряжения, МПа;  $t_1$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной в осевом направлении при текущем уровне напряжений, мкс;  $t_{01}$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной в осевом направлении при начальном уровне напряжений, мкс;  $t_2$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной в окружном направлении при текущем уровне напряжений, мкс;  $t_{02}$  – задержка импульса упругой сдвиговой волны, поляризованной в окружном направлении при начальном уровне напряжений, мкс;  $t_3$  – задержка импульса упругой продольной волны при текущем уровне напряжений, мкс;

$t_{03}$  – задержка импульса упругой продольной волны при начальном уровне напряжений, мкс;  $K_1, K_2$  – коэффициенты упругоакустической связи для двухосного напряженного состояния, МПа.

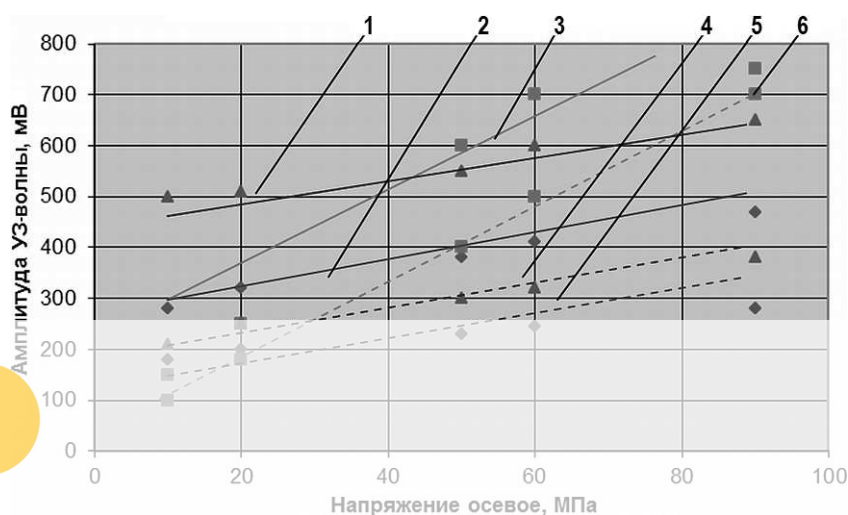


Рис. 8. Характеристики зависимости амплитуды поперечных и продольных волн в сталях от механических напряжений: поперечных волн 1 – ZrNb; 2 – 08X18H10T; 3 – Ст3 и продольных волн 4 – ZrNb; 5 – 08X18H10T; 6 – Ст3

Для одноосного напряженного состояния можно записать соотношения

$$y_z = D((t_{01}t_2/t_{02}t_1) - 1) \quad \text{либо} \quad y_z = D_1((t_{01}t_3/t_{03}t_1) - 1), \quad (3)$$

$$y_t = D((t_{02}t_1/t_{01}t_2) - 1) \quad \text{либо} \quad y_t = D_1((t_{02}t_3/t_{03}t_2) - 1), \quad (4)$$

где  $D, D_1$  – коэффициенты упругоакустической связи для одноосного напряженного состояния, МПа.

Если величины  $t_0$  и  $t_{03}$  различаются существенно (более чем на 1,5 – 2%), то материал считают анизотропным, и расчет двухосного напряженного состояния необходимо выполнять по формулам [5 – 8]

$$y_z = K_1^{\parallel} ((t_{01}t_3/t_{03}t_1) - 1) - K_2((t_{02}t_3/t_{03}t_2) - 1), \quad (5)$$

$$y_t = K_1^{\perp} ((t_{02}t_3/t_{03}t_2) - 1) - K_2((t_{01}t_3/t_{03}t_1) - 1), \quad (6)$$

где  $K_1^{\parallel}, K_1^{\perp}$  – коэффициенты упругоакустической связи для напряжений, действующих вдоль и поперек направления образующей трубы или технологического оборудования.

Одноосное напряжение в анизотропном материале можно рассчитать по общепринятым соотношениям [9 – 16], используя выражения

$$y_z = D_1^{\parallel} ((t_{01}t_2/t_{02}t_1) - 1), \quad (7)$$

$$y_t = D_1^{\perp} ((t_{02}t_1/t_{01}t_2) - 1), \quad (8)$$

где  $D_1^{\parallel}, D_1^{\perp}$  – коэффициенты упругоакустической связи для одноосного напряжения, действующего вдоль и поперек направления образующей трубы соответственно.

Экспериментально полученные значения напряжений с погрешностью 14% совпадают со значениями напряжений, вычисленных по вышеприведенным формулам.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показана возможность теоретически рассчитать и экспериментально измерить напряженное состояние наиболее напряженных элементов конструкций АЭС с реакторами

типов ВВЭР-1000 и РБМК-1000 с помощью метода, основанного на эффекте акустоупругости. Применение данного метода позволяет обеспечить раннюю диагностику сварных соединений АЭС.

### Литература

1. Кудрявцев П.И. Остаточные сварочные напряжения и прочность соединений. – М.: Машиностроение, 1964. – 95 с.
2. Пухтер О.С. Влияние собственных напряжений, возбуждаемых в материале, на пределе упругости. // Чехословацкая тяжелая промышленность. – 1961. – №1. – С. 4-11.
3. Benson R.W., Raelson V.J. From ultrasonics to a new stress-analysis technique. // Acoustoelasticity. - Product Eng. – 1959. – Vol. 30. – PP. 56-59.
4. Гуца О.И. Анализ неоднородных полей остаточных напряжений в сварных соединениях. // Автоматическая сварка. – 1994. – №7. – С. 3-5.
5. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустические методы контроля напряженного состояния материала деталей машин. – Кишинев: Штиинца. – 1981. – 146 с.
6. Гузь А.Н., Махорт Ф.Г., Гуца О.И. Введение в акустоупругость. – Киев: Наукова думка. – 1977. – 150 с.
7. Зарембо Л.К., Красильников В.А. Введение в нелинейную акустику. – М.: Наука. -1966. – 237 с.
8. Бобренко В.М., Вангели М.С., Куценко А.Н. Акустическая тензометрия. – Кишинев: Штиинца. – 1991. – 267 с.
9. Анисимов В.А., Куценко А.Н. Ультразвуковая диагностика напряженного состояния элементов конструкций космических аппаратов. / Материалы научно-технической конференции «ЛЕОТЕСТ-98». – М.: – 1998. – С. 43-46.
10. Бобренко В.М., Куценко А.Н., Рудаков А.С. Акустическая тензометрия – новое направление в неразрушающих испытаниях материалов. // Дефектоскопия. – 1989. – №4. – С. 93-94.
11. Field G., Dunn J., Cheadle B. Analysis of the pressure tube failure at Pickering NGS «А» unit 2. // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1985. – Vol. 24. – № 3. – PP. 181-188.
12. Ells C., Coleman C., Chow C. Properties of a CANDU calandria tube. // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1985. – Vol. 24. – № 3. – PP. 215-233.
13. Causey A., Norsworthy A., Schulte C. Factors affecting creep sag of fuel channels in CANDU calandria tube. // Canadian Metallurgical Quarterly. – 1985. – Vol. 24. – № 3. – PP. 207-214.
14. Baron J., Dolbey M., Erven J. Improved pressure tube inspection in Candu reactors. // Nuclear Engineering International. – 1981. - Vol. 26. – № 321. – PP.45-48.
15. Fitchard E.E. Randomly simulated borehole tests accuracy of directional survey methods. // Oil and Gas Journal. – 1981 June. – Vol. 79. – № 26. – PP. 140-150.
16. Wolf C.J.M., de Wardt J.P. Borehole Position uncertainty – analysis of measuring methods and derivation of systematic error model. // Journal of Petroleum Technology. – 1981. – Vol. 33. – № 12. – PP. 339 - 350.

Поступила в редакцию 29.12.2015 г.

### Авторы

Трофимов Адольф Иванович, заведующий кафедрой «Автоматика, контроль и диагностика АЭС», профессор, доктор техн. наук  
E-mail: atrofimov@obninsk.ru

Минин Сергей Иванович, доцент, кандидат техн. наук  
E-mail: akid@inbox.ru

Трофимов Максим Адольфович, профессор, доктор техн. наук  
E-mail: trofimovma@mail.ru

UDC 534.6.08

## MEASUREMENT OF THE STRESSED STATE OF WELDED JOINTS IN THE NPP PROCESS COMPONENTS AND CIRCULATION PIPELINES BASED ON ACOUSTOELASTICITY THEORY

Trofimov A.I., Minin S.I., Trofimov M.A.

Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering,  
National Reserarch Nuclear University «MEPhI»  
1 Studgorodok, Obninsk, Kaluga reg., 249040 Russia

### ABSTRACT

The results of the theoretical study and experimental research of the measurement method of the stressed state of welded joints of technological equipment and the circulating piping of NPPs based on the theory of acoustoelasticity, and ways of their technical implementation.

Depending on the speed and attenuation of ultrasonic waves in a material by its composition, structure and preferred orientation of the grains determine uprugosti and strength characteristics. Measurement of the velocity of longitudinal and shear waves in polycrystalline materials allows to obtain the numerical values of the elastic modulus and single-crystal constants elastic anisotropy. The device for measuring the stress state of welded joints of technological equipment and the circulating piping of NPPs, based on the theory of acoustoelasticity, allow us to measure the residual stresses along the height of the welded connection, to find places of formation of cracks. The use of such devices will allow for early diagnostics of welded joints, which will enhance the safety of NPP operation.

Acoustic tenzometric based on registration of change of the velocity of propagation of elastic waves under the influence of stresses in the test object. It is known that the change of speed is proportional to the magnitude of stress or strain in the test object. At the Obninsk Institute for Nuclear Power Engineering designed and manufactured automated device of measurement of the stressed state of welded joints of technological equipment and the circulating piping of NPPs based on acoustoelasticity theory.

**Key words:** customproject, welded joints, stress condition, early diagnosis.

### REFERENCES

1. Kudryavtsev P.I. Residual welding stresses and strength of connections. Moscow. Mashinostroenie Publ., 1964. 95 p. (in Russian).
2. Pochtar O.S. Effect of stresses generated in the material at the elastic limit. *Czechoslovak heavy industry*. 1961, no. 1, pp. 4-11.
3. Benson R.W., Raelson V.J. From ultrasonics to a new stress-analisis technique. *Acoustoelasticity. Product Eng.* 1959, v. 30, pp. 56-59.
4. Gushcha O.I. Analysis of inhomogeneous fields of residual stresses in welded joints. *Automatic welding*. 1994, no. 7, pp. 3-5 (in Russian).
5. Bobrenko V.M., Vangeli M.S., Kutsenko A.N. Acoustic methods of monitoring the stress state of the material parts of machines. Chisinau. Stiintsa Publ., 1981. 146 p. (in Russian).
6. Guz' A.N., Makhort F.G., Gushcha O.I. Introduction to customproject. Kiev. Naukova Dumka Publ., 1977. 150 p. (in Russian).
7. Zarembo L.K., Krasil'nikov V.A. Introduction to nonlinear acoustics. Moscow. Nauka Publ.,



1966. 237 p. (in Russian).

8. Bobrenko V.M., Vangeli M.S., Kutsenko A.N. Acoustic tenzometric. Chisinau. Stiinta Publ., 1991. 267 p. (in Russian).

9. Anisimov V.A., Kutsenko A.N. Ultrasound diagnostics of the stress state of structural elements of the spacecraft. Materials of the scientific-technical conference «LEOTEST-98». Moscow, 1998, pp. 43-46 (in Russian).

10. Bobrenko V.M., Kutsenko A.N., Rudakov A. S. Acoustic stress measurement – a new direction-tion in non-destructive materials testing. *Defektoskopiya*. 1989, no. 4, pp. 93-94 (in Russian).

11. Field G., Dunn J., Cheadle B. Analysis of the pressure tube failure at Pickering NGS «A» unit 2. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1985, v. 24, no. 3, pp. 181-188.

12. Ells C., Coleman C., Chow C. Properties of a CANDU calandria tube. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1985, v. 24, no. 3, pp. 215-233.

13. Causey A., Norsworthy A., Schulte C. Factors affecting creep sag of fuel channels in CANDU calandria tube. *Canadian Metallurgical Quarterly*. 1985, v. 24, no. 3, pp. 207-214.

14. Baron J., Dolbey M., Erven J. Improved pressure tube inspection in Candu reactors. *Nuclear Engineering International*. 1981, v. 26, no. 321, pp. 45-48.

15. Fitchard E.E. Randomly simulated borehole tests accuracy of directional survey methods. *Oil and Gas Journal*. 1981 June, v. 79, no. 26, pp. 140-150.

16. Wolf C.J.M., de Wardt J.P. Borehole Position uncertainty – analysis of measuring methods and derivation of systematic error model. *Journal of Petroleum Technology*. 1981, v. 33, no. 12, pp. 339-350.

#### Authors

Trofimov Adol'f Ivanovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: atrofimov@obninsk.ru

Minin Sergey Ivanovich, Associate Professor, Cand. Sci. (Engineering)

E-mail: akid@inbox.ru

Trofimov Maxim Adol'fovich, Professor, Dr. Sci. (Engineering)

E-mail: trofimovma@mail.ru

S C I P E D I A

Register for free at <https://www.scipedia.com> to download the version without the watermark