

УЛЬТРАЗВУКОВОЙ МЕТОД СНЯТИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В СВАРНЫХ СОЕДИНЕНИЯХ ЦИРКУЛЯЦИОННЫХ ТРУБОПРОВОДОВ И ОБОРУДОВАНИЯ АЭС

**А.И. Трофимов, С.И. Минин, В.Н. Дементьев, М.А. Трофимов,
А.И.Осипов**

*Обнинский государственный технический университет атомной энергетики,
г. Обнинск*



Проведен анализ состояния работ по снижению остаточных напряжений в сварных соединениях оборудования АЭС. Приведены результаты теоретических и экспериментальных исследований ультразвукового метода снятия остаточных напряжений в сварных соединениях в процессе сварки циркуляционных трубопроводов АЭС.

Работоспособность и надежность сварных конструкций определяется работоспособностью и надежностью сварного соединения, несущая способность которого значительно уступает несущей способности основного металла. Это обстоятельство связано с возникающими в процессе сварки остаточными напряжениями. В процессе эксплуатации остаточные напряжения складываются с напряжениями, создаваемыми внешними нагрузками, и являются основной причиной разрушения металла сварных конструкций.

Решение проблемы снижения остаточных напряжений приобретает особое значение при повышении работоспособности и надежности сварных конструкций ответственного назначения, в том числе конструкций энергоблоков АЭС, где в процессе эксплуатации создаются высокие местные напряжения элементов несущих конструкций. На энергоблоках АЭС с реакторами РБМК-1000 в процессе эксплуатации зафиксированы образования трещиновидных дефектов в сварных соединениях трубопроводов ДУ-300 мм, на энергоблоках с реакторами ВВЭР-1000 и ВВЭР-440 – в сварных соединениях парогенераторов ПГВ-1000 и ПГВ-440.

Анализ результатов исследований причин образования трещиновидных дефектов в сварных соединениях трубопроводов ДУ-300 мм, выполненных из сталей аустенитного класса 08Х18Н10Т, показал, что образование и развитие трещиновидных дефектов происходит по механизму межкристаллитного растрескивания под напряжением, возникающим в процессе эксплуатации при термосиловом нагружении. Причинами данного явления являются наличие значительных остаточных напряжений и структурной нестабильности металла сварных соединений [1].

© **А.И. Трофимов, С.И. Минин, В.Н. Дементьев, М.А. Трофимов, А.И.Осипов, 2009**

В настоящее время для снижения остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов и оборудования АЭС применяются метод термического отпуска и деформационные методы.

Термический отпуск заключается в равномерном нагреве сварного соединения в течение определенного промежутка времени, выдержке при фиксированной температуре и медленном охлаждении. Отпуск проводится в специальных печах, в которые погружается вся сварная конструкция. При ремонтных работах проводится местный отпуск сварных соединений с помощью специальных нагревательных устройств. При местном отпуске в области сварного соединения создаются градиенты температур. На границах горячего и холодного металлов неизбежно возникают собственные остаточные напряжения.

Деформационные методы основаны на создании в металле сварного соединения местной пластической деформации, противоположной сварной. Для снижения остаточных напряжений циркуляционных трубопроводов ДУ-300 мм на энергоблоках АЭС с реакторами РБМК-1000 широко применяется метод обжатия. При обжатии в околошовной зоне сварного соединения создаются сжимающие напряжения, которые компенсируют остаточные напряжения растяжения. Деформационные методы позволяют снизить уровень остаточных напряжений в околошовной зоне, но не устраняют структурную нестабильность металла сварного шва и зоны термического влияния. Высокотемпературная термическая обработка оказывает влияние и на структуру металла сварного соединения.

Авторами [2–5] предложен ультразвуковой метод снятия остаточных напряжений в процессе сварки. Особенность метода заключается в том, что при ультразвуковой обработке сварного соединения в процессе сварки происходит комплексное воздействие ультразвука как на термодеоформационные процессы в околошовной зоне, так и на процессы кристаллизации металла сварного шва. Результатом воздействия является существенное снижение остаточных напряжений в околошовной зоне и формирование однородной мелкозернистой структуры металла сварного шва и зоны термического влияния.

Схема реализации способа показана на рис. 1. Ультразвуковой излучатель установлен на расстоянии L от оси сварного шва. Величина расстояния L , мощность и угол наклона α ультразвукового излучателя зависят от структуры металла и толщины сварных конструкций.

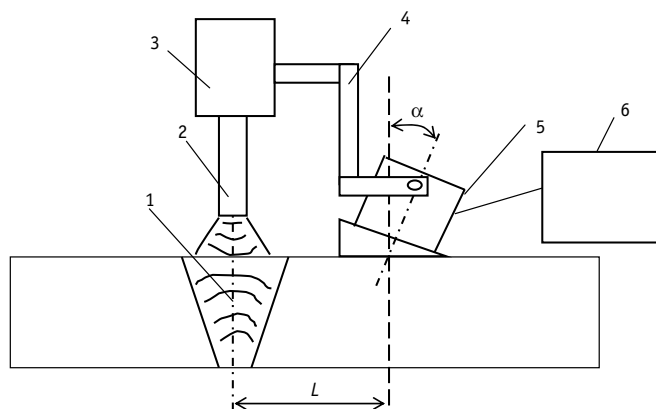


Рис. 1. Функциональная схема устройства воздействия ультразвука на околошовную зону в процессе сварки: 1 – сварной шов; 2 – электрод; 3 – держатель; 4 – кронштейн; 5 – ультразвуковой излучатель; 6 – ультразвуковой генератор

Ультразвуковой излучатель создает поле ультразвуковых колебаний во всей области сварного соединения, которое оказывает воздействие на процессы кристаллизации металла в сварочной ванне и формирования структуры металла и внутренних напряжений в металле околошовного пространства.

Механизм снятия остаточных напряжений в околошовной зоне заключается в следующем. Как известно, остаточные напряжения создаются в процессе сварки, главным образом, за счет термдеформационных процессов. В результате неравномерного нагрева, обусловленного воздействием концентрированного источника теплоты, в зоне термического влияния происходит упругопластическое деформирование металла. Ненагретые участки препятствуют свободному расширению нагретых участков, что приводит к возникновению упругих и пластических деформаций и, соответственно, остаточных напряжений в металле сварного соединения.

Образование остаточных напряжений при деформации металла можно проиллюстрировать на следующем примере. На рис. 2 приведены кривые деформирования образца металла выше предела текучести (точка A) и разгрузки. Процесс нагружения образца проходит по кривой OAC , а процесс разгрузки, который можно представить как приложение напряжения σ_1 с обратным знаком, будет проходить по кривой CAB . При этом участок AB , близкий к прямой, примерно параллелен участку нагружения OT . Зависимость между напряжением и деформацией ниже предела текучести металла соответствует металлу, находящемуся в упругом состоянии. Остаточная деформация, сохраняющаяся после разгрузки, равна

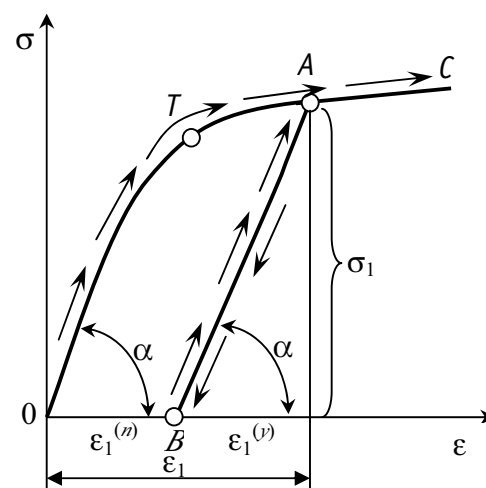


Рис. 2. Кривые деформирования и разгрузки

$$\varepsilon_1^{[n]} = \varepsilon_1 - \varepsilon_1^{(y)}. \quad (1)$$

Повторный процесс нагружения пойдет уже по кривой BAC .

Механизм образования остаточных напряжений в процессе сварки в литературных источниках иллюстрируется на следующем примере. По краю образца металла в виде пластины перемещается источник нагрева с максимальным нагревом в точке O (рис. 3а). В пластине возникают продольные сжимающие напряжения σ_x . Если напряжения не достигают предела текучести металла, они создают упругие деформации, распределение которых проходит по кривой BD . После полного остывания образца металла напряжения становятся равными нулю. Остаточные напряжения в этом случае отсутствуют.

На рисунке 3б показан пример, когда металл образца имеет предел текучести $\sigma_T = 400$ МПа. В этом случае сжимающие продольные напряжения σ_x возрастают, достигая предела текучести в точке A_1 . На участке A_1B_1 происходит пластическая деформация укорочения, а напряжение не изменяется и равно напряжению предела текучести $\sigma_x = \sigma_T = 400$ МПа. Затем напряжение уменьшается по кривой $B_1C_1D_1$, которая эквидистантна кривой BD , перенесенной с рис. 3а. В точке C_1 сжимающие напряжения переходят в растягивающие и после полного остывания (точка D_1) сохраняются как остаточные растягивающие напряжения.

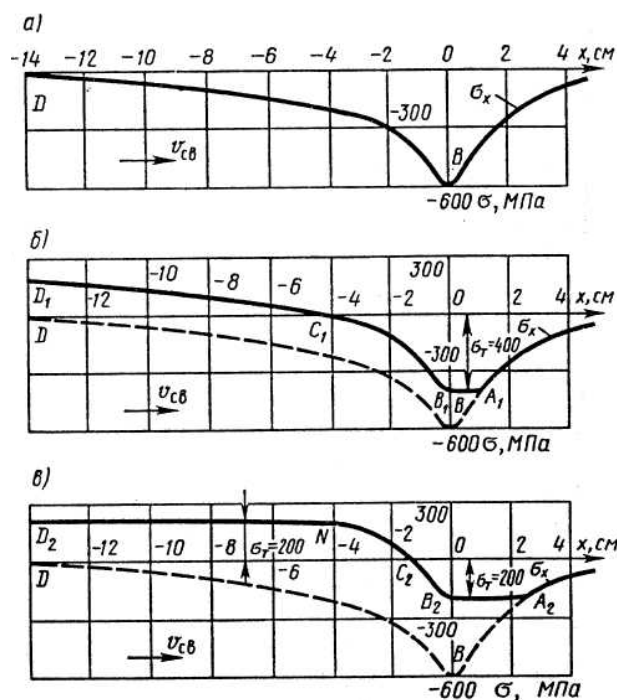


Рис. 3. Механизм образования продольных напряжений σ_x в процессе нагрева кромки пластины движущимся источником теплоты при различных значениях предела текучести металла: а) $\sigma_T \rightarrow \infty$; б) $\sigma_T = 400$ МПа; в) $\sigma_T = 200$ МПа

На рис. 3в показан пример нагрева образца металла с пределом текучести $\sigma_T = 200$ МПа. В этом случае напряжение сжатия достигает предела текучести в точке A_2 . На участке A_2B_2 происходит деформация укорочения. В точке C_2 напряжения сжатия переходят в напряжения растяжения. В точке N напряжения растяжения достигают предела текучести. На участке ND_2 происходит пластическая деформация удлинения. После полного остывания образца сохраняются остаточные растягивающие напряжения, равные пределу текучести металла $\sigma_T = 200$ МПа.

Таким образом, формирование остаточных напряжений в сварном соединении происходит на участке зоны термического влияния, в котором проходит граница температурного интервала, соответствующего нулевому пределу текучести металла сварного соединения, т.к. «холодный» металл препятствует свободному расширению металла, температура которого соответствует пределу текучести.

Воздействие ультразвука на этом участке зоны термического влияния с интенсивностью ультразвуковых колебаний, достаточной для достижения предела текучести металла сварного соединения, приводит к «гашению» пластической деформации металла. При этом температура металла практически не изменяется. При полном остывании металла, которое проходит в поле ультразвуковых колебаний, внутренние напряжения металла становятся равными нулю. Пластические деформации и, соответственно, остаточные напряжения отсутствуют.

Проведены исследования воздействия ультразвука на сварные соединения при автоматической сварке на образцах циркуляционных трубопроводов АЭС с реакторами РБМК-1000 Ду 300 мм толщиной 16 мм, выполненных из аустенитной стали 08Х18Н10Т.

Образцы сварных соединений представляли собой отрезки труб длиной 300 мм. Сварка образцов проводилась по штатной технологии АЭС с воздействием ультразвука и без ультразвуковой обработки.

Таблица 1

Режим сварки	Зона измерения металла шва	$\sigma_{ос}$, МПа	$\sigma_{окр}$, МПа
Без ультразвука	Наружная поверхность	166	125
С ультразвуком	Наружная поверхность	5,4	-0,8
Без ультразвука	Внутренняя поверхность	65	97
С ультразвуком	Внутренняя поверхность	-27	-37

Измерение остаточных напряжений проводилось на наружной и внутренней поверхностях сварного соединения образца трубопровода методом отверстий с помощью розетки из трех тензорезисторов типа ФКПА-1 и ФКПА-2 с базой 1 и 2 мм, ориентированных относительно друг друга под углом $\varphi = 45^\circ$. Регистрация показаний тензорезисторов до и после сверления отверстий осуществлялась с помощью тензометрического модуля Field Point (производство фирмы National Instruments, США) и программы LabView. В табл. 1 приведены результаты исследований осевых $\sigma_{ос}$ и окружных $\sigma_{окр}$ остаточных напряжений на наружной и внутренней поверхностях трубопровода. Как видно, при воздействии ультразвука происходит уменьшение растягивающих напряжений вплоть до изменения знака.

Исследования изменения структуры металла шва проводились на шлифах, подвергнутых травлению в 10-процентном водном растворе щавелевой кислоты. Полученные результаты (рис. 4) показывают, что микроструктура металла шва при воздействии ультразвука в процессе сварки становится более мелкозернистой и однородной.

Для оценки изменения механических свойств в результате воздействия ультразвука были изготовлены образцы цилиндрической формы с диаметром рабочей части 6 мм, которые вырезались в осевом направлении трубы из центральной по толщине части шва. Испытания проводились на установке MTS-810.

Исследования показали, что воздействие ультразвука в процессе сварки приводит к существенному повышению пластических свойств металла сварного соединения. Относительное удлинение образцов металла сварного соединения при воздействии ультразвука повышается в 4,5 раза.

Таким образом воздействие ультразвука на околошовную зону в процессе сварки приводит к существенному уменьшению остаточных напряжений, получению однородной мелкозернистой структуры и повышению механических свойств металла сварных соединений.

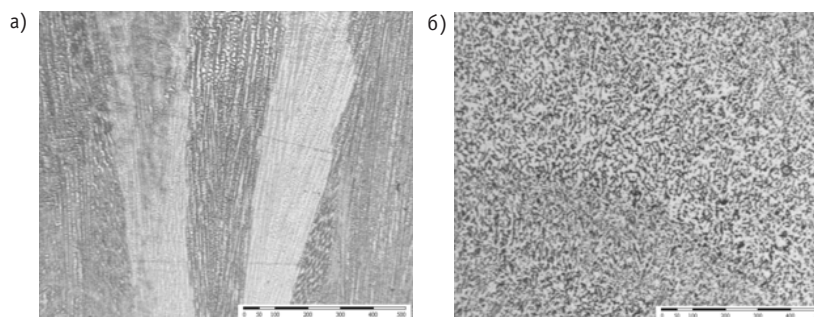


Рис. 4. Микроструктура металла верхней части сварного шва трубопровода Ду-300мм: а) – без воздействия ультразвука; б) – с воздействием ультразвука ($\times 125$)

Литература

1. Концевой А.А., Дементьев В.Н., Карась В.А. Применение установок для механического перераспределения остаточных напряжений в сварных соединениях аустенитных трубопроводов Ду300/«Атомные электрические станции России». 2007/Под ред. А.М. Лоушина. – М.: ФГУП «Концерн «Росэнергоатом», 2007. – С.121-127.
2. Трофимов А.И., Минин С.И., Дементьев В.Н. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов/Пат. 2280547 (РФ), 2006.
3. Трофимов А.И., Минин С.И. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях циркуляционных трубопроводов АЭС и ТЭС/Пат. 2268312 (РФ), 2006.
4. Трофимов А.И., Минин С.И., Дементьев В.Н. Способ снятия остаточных напряжений в сварных соединениях металлов/Пат. 2281192 (РФ), 2006.
5. Трофимов А.И., Минин С.И., Дементьев В.Н., Нелюбов С.В. Способ повышения однородности структуры металла сварных соединений аустенитных сталей/Пат. 2270441 (РФ), 2006.

Поступила в редакцию 22.04.2009

equipment of the Smolensk NPP's first power unit were used.

УДК 621.791.16: 621.791.05

Ultrasonic Method of Removal of Residual Pressure in Welded Connections of Circulating Pipelines and the Atomic Power Station Equipment \ A.I. Trofimov, S.I. Minin, V.N. Dementev, M.A. Trofimov, A.I. Osipov; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 6 pages, 1 table, 4 illustrations. – References, 5 titles.

The analysis of a condition of works on decrease in residual pressure in welded connections of the equipment of the atomic power station is carried out. Results theoretical and experimental researches of an ultrasonic method of removal of residual pressure in welded connections in the course of welding of circulating pipelines of the atomic power station are resulted.

УДК 504.5: 621.039

Use of Allium-test for Toxicity Assessment of Water and Soil Sampled from Radioactively Contaminated Sites \ S.V. Pyatkova, S.A. Geraskin, A.N. Vasileva, G.V. Kozmin, N.N. Lyannoy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. 8 pages, 2 tables, 3 illustrations. – References, 20 titles.

The presented results of the estimation to toxicity sample water and soil from Semipalatinsk Experimental Test Site with use Allium-test. The factors of cyto- and genotoxicity natural sample from area STE, contrasting on level and spectrum radioactive contamination were compared. It is shown need of the modification of the biotesting for account of the external gamma-irradiations in region of the selection of the tests sample.

УДК 628.31

The Sorption Properties of the Thermal Resistant Amorphous Alum Silicate Adsorbent \ A.S. Shilina, V.K. Milunchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 8 pages, 2 tables, 4 illustrations. – References, 8 titles.

The structure formula of new type alum silicate adsorbent was determined. The sorption properties of the thermal modified amorphous alum silicate adsorbent are present. After heating at 600°C the static sorption capacity adsorbent (mg/g) is increasing at 1.5 time and is equal for the nickel cations 220 and for the lead cations 660. Alum silicate adsorbent effective removes these cations from the boiling water solutions. It is testify about the perspective of the adsorbent for the water cleaning at high temperature.

УДК 621.039.51

Information Interactive System for Preparation and Verification Nuclear Data in the High-Energy Range \ A.A. Angrianov, Yu.A. Korovin, I.S. Kuptsov, A.Yu. Konobeev, A.Yu. Stankovskiy; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 11 pages, 1 table, 6 illustrations. – References, 11 titles.

The article concerns the developing of information interactive system code for the preparation, verification and validation nuclear data in the high range. This complex enables users without special skills, produce activation nuclear-physical data, statistically assess them on existing experiments, verify the high energy reactions models using a flexible parameters selection system and visualize the results.

УДК 621.039.512

On Use of Perturbation Theory for Analysis of Periodic Pulsed Solutions in Problems of Reactor Dynamics \ A.V. Gulevich, O.F. Kukharchuk; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 11 pages, 2 illustrations. – References, 10 titles.

Principal relationships for estimation of linear functionals due to the changes in parameters of the initial boundary-value problem on the period have been formulated based on the traditional approach of perturbation theory and the adjoint function apparatus. The emphasis has been upon the case when the problem perturbation is the change of the period itself. Numerical and analytical examples of the use of perturbation theory relationships in the simplest problems of neutronic kinetics and non-stationary heat exchange in fuel element of periodic pulsed reactor have been considered.

УДК 621.039

Calculation Study of Neutron-Physics Material Characteristics for Therapy Beams Forming \ A.V. Korobeynikov, V.P. Ginkin; Editorial board of journal «Izvestia visshikh uchebnikh zavedeniy. Yadernaya energetika» (Communications of Higher Schools. Nuclear Power Engineering) – Obninsk, 2009. – 9 pages, 1 table, 7 illustrations. – References, 14 titles.