

УДК 621.791:[621.311.25:621.039.577]

МОДЕЛИРОВАНИЕ ОСТАТОЧНЫХ СВАРОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ, РАДИАЦИОННОГО РАСПУХАНИЯ И НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ВЫГОРОДКИ РЕАКТОРА ВВЭР-1000 В ПРОЦЕССЕ ЭКСПЛУАТАЦИИ

О. В. МАХНЕНКО, И. В. МИРЗОВ, В. Б. ПОРОХОНЬКО

ИЭС им. Е.О. Патона НАН Украины. 03680, г. Киев-150, ул. Казимира Малевича, 11. E-mail: office@paton.kiev.ua

При выполнении работ по продлению ресурса внутрикорпусных устройств реактора ВВЭР-1000 на втором энергоблоке Южноукраинской АЭС возник вопрос о влиянии остаточных сварочных напряжений в выгородке на величину радиационного распухания. В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, г. Киев, разработана и реализована математическая модель определения остаточного напряженно-деформированного состояния выгородки реактора ВВЭР-1000 при электрошлаковой сварке с последующей термообработкой, а также модель расчета радиационного распухания выгородки с учетом радиационной ползучести. По результатам математического моделирования можно сказать, что напряженное состояние выгородки после 60 лет эксплуатации, посчитанное с учетом остаточных сварочных напряжений, близко к результатам, полученным по модели без учета сварки. В данной работе рассматривается релаксация остаточных сварочных напряжений в выгородке ВВЭР-1000 под действием радиационного облучения и выводится зависимость их величины от времени в процессе эксплуатации. Библиогр. 15, табл. 3, рис. 11.

Ключевые слова: ВВЭР-1000, выгородка, электрошлаковая сварка, остаточные сварочные напряжения, термообработка, радиационное распухание, радиационная ползучесть, математическое моделирование

Введение. Выгородка реактора ВВЭР-1000 является внутрикорпусным устройством (ВКУ), изготавливается из стали 08X18H10T и в условиях эксплуатации подвержена накоплению пористости, приводящей к необратимому увеличению объема материала. Это явление именуется радиационным распуханием и может приводить к значительному изменению напряженного состояния конструкции в процессе эксплуатации.

В соответствии с паспортной документацией второго энергоблока Южноукраинской АЭС, выгородка реактора ВВЭР-1000 малой серии В-338 изготовлена с применением технологии электрошлаковой сварки (ЭШС) (рис. 1). Наличие сварных соединений тре-

бует учета влияния остаточных сварочных напряжений (ОСН) на изменение напряженно-деформированного состояния (НДС) выгородки в процессе эксплуатации. Поэтому изучение ОСН в выгородке с учетом радиационного распухания сегодня актуально и вызывает интерес с точки зрения расчетного обоснования возможности продления ресурса внутрикорпусных устройств.

В [1] экспериментально установлено незначительное снижение остаточных сварочных напряжений в образцах, облученных дозами от 0,3 до 1,0 сна при температуре 300 °С. В данной же работе рассматривается сварное соединение выгородки, облученное до 20...30 сна за 60 лет с уче-

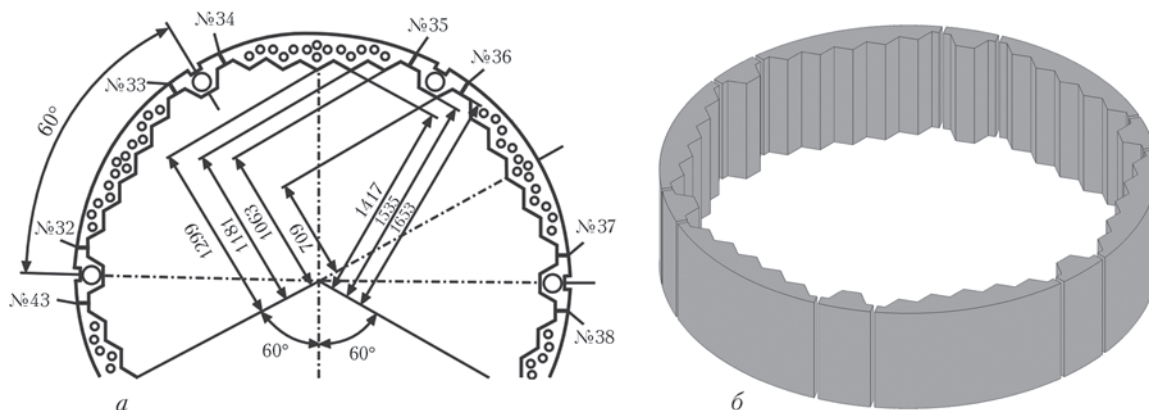


Рис. 1. Центральное кольцо выгородки: а — чертеж сечения из паспорта изделия с расположением сварных швов № 32–43; б — сегменты кольца выгородки перед электрошлаковой сваркой

© О. В. Махненко, И. В. Мирзов, В. Б. Порохонько, 2016

том эксплуатационных напряжений конструкции. Аналогичное исследование для внутрикорпусной шахты реактора ВВЭР-1000 проделано в [2].

Цель данной работы — создание математической модели определения НДС в зоне сварных соединений выгородки с учетом их термообработки, проведение расчетов радиационного распухания выгородки с учетом ОСН и анализ напряженного состояния сварных соединений выгородки после облучения за период 60 лет эксплуатации.

Сварка выгородки с применением электрошлаковой технологии. Кольца выгородки свариваются из кованных сегментов при помощи ЭШС [3–5]. Внешний вид сварных элементов кольца выгородки показан на рис. 1, б. Толщина металла в месте сварки составляет 76...79 мм (рис. 2), протяженность шва — 814 мм.

Как указано в специальной документации [4], для узлов и конструкций атомных электростанций толщиной 70...100 мм применяют преимущественно схемы ЭШС проволочными электродами и плавящимся мундштуком (рис. 3).

Применительно к изготовлению колец выгородки, более надежной с технологической точки зрения и более целесообразной с точки зрения качества сварного соединения является схема ЭШС плавящимся мундштуком (рис. 3, б). Сварку осуществляют за один проход на специализированных стендах с жестким закреплением свариваемых изделий.

Сварочный зазор выставляют с учетом усадочных деформаций. В нижней части стыка он составляет 28 мм, в верхней — 30 мм [6]. Плавящийся мундштук изготавливают из той же марки стали, что и основной металл. В мундштуке имеются каналы для основных и дублирующих проволок (используют проволоку Св-04Х19НН11М3 [7]). Технологией предусмотрены входной карман и выводные планки, которые после сварки удаляются механическим путем. Основные параметры ЭШС выгородки плавящимся мундштуком приведены в табл. 1. Можно оценить мощность источника электрошлаковой сварки: $P = IU\eta = 600 \cdot 46 \cdot 0,85 \approx 23$ кВт.

Выполненные электрошлаковой сваркой соединения подвергают термообработке по режимам, установленным для основного металла.

Разработка математических моделей. В Институте электросварки им. Е.О. Патона НАНУ, г. Киев, разрабо-

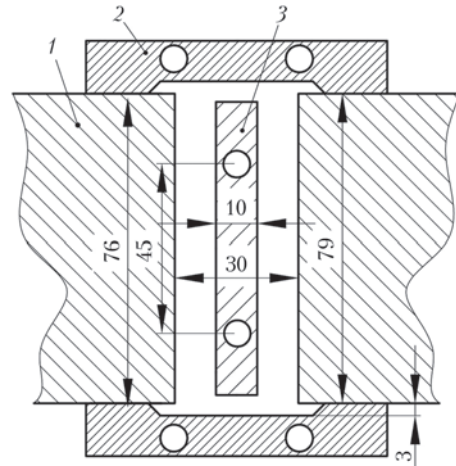


Рис. 2. Геометрические параметры сборки изделий под ЭШС: 1 — свариваемые изделия; 2 — водоохлаждаемая формирующая планка (ползун); 3 — мундштук

тана и реализована математическая модель электрошлаковой сварки выгородки с последующей термообработкой. Результаты расчета ОСН по этой модели легли в основу расчетов радиацион-

Таблица 1. Основные параметры ЭШС плавящимся мундштуком выгородки реактора ВВЭР-1000

Параметры	Значение
Сварочный ток $I_{св}$, А	600
Напряжение $U_{св}$, В	46
Скорость подачи электрода $v_{п.п}$, м/ч	230
Скорость сварки $v_{св}$, мм/с	0,42
Глубина жидкометаллической ванны, мм	40
Температура жидкометаллической ванны T_{max} , °С	2000
Толщина мундштука, мм	10
Диаметр проволоки, мм	3
Количество рабочих/дублирующих электродных проволок, шт.	2/2
Флюс	48-ОФ-6
Марка электродной проволоки [7]	Св-04Х19НН11М3
Тепловой КПД η процесса	0,85

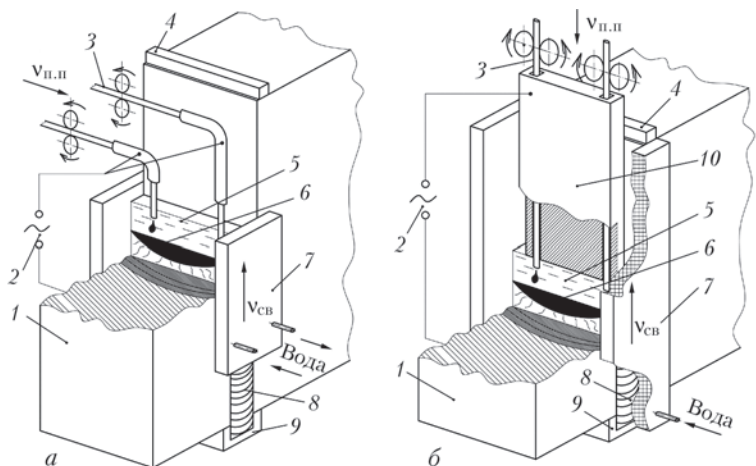


Рис. 3. Схемы ЭШС проволочными электродами (а) и плавящимся мундштуком (б): 1 — свариваемые изделия; 2 — источник питания; 3 — сварочная проволока; 4 — выводная планка; 5 — шлаковая ванна; 6 — металлическая ванна; 7 — водоохлаждаемая формирующая планка (ползун); 8 — сварной шов; 9 — входной карман; 10 — мундштук

Таблица 2. Химический состав основного материала ВКУ и металла шва, мас. %

Материал	δ-феррит	C	Cr	Ni	Mn	Si	Ti	S	P	Mo	V
Основной металл	2...3	0,06	17,89	9,06	1,17	0,31	0,6	0,01	0,009		
Металл шва	4,4	0,07	17,5	10,33	2,4	0,22		0,006	0,025	2,36	0,62

ного распухания выгородки, выполненных по модели ЦНИИ КМ Прометей, г. Санкт-Петербург [7, 8]. Также в расчетах радиационного распухания использованы данные по объемным тепловыделениям и скорости набора повреждающей дозы в выгородке, полученные в ИИИ НАН Украины, г. Киев [9], и ОКБ Гидропресс, г. Подольск [10].

Моделирование электрошлаковой сварки. Материал выгородки — аустенитная сталь 08X18H10T. Химический состав стали 08X18H10T и сварных узлов ВКУ в исходном (необлученном) состоянии взят из [7, 11] и приведен в табл. 2.

Как видно из табл. 2, химический состав сварного соединения отличается от основного металла незначительно, поэтому будем предполагать, что выгородка однородна и весь ее объем имеет свойства стали 08X18H10T. Зависимость предела текучести стали 08X18H10T от температуры приведена на рис. 4. Трехмерная конечно-элементная модель свариваемой выгородки приведена на рис. 5.

В зоне сварного шва толщина одного слоя численных элементов составляет $h = 8,14$ мм, а разбиение по высоте выгородки содержит 100 слоев. Задача моделирования электрошлаковой сварки относится к задачам с движущейся границей. Фронт расплавленного металла перемещается вверх по детали. Время dt , в течение которого фронт сместится на высоту h одного численного элемента, составит

$$dt = \frac{h}{v} = \frac{8,14}{0,42} \approx 19 \text{ с.}$$

Можно оценить скорость электрошлаковой сварки dV/dt по объему расплаваемого металла. Площадь S сварочной ванны составляет $S = 30 \cdot 77,5 = 2323 \text{ мм}^2$. Объем dV расплавленного металла за время dt равен $dV = Sh \approx 18,9 \text{ см}^3$. Тогда $dV/dt \approx 1 \text{ см}^3/\text{с}$. Оценим также количество энергии dQ ,

необходимой для нагрева $dV = 18,9 \text{ см}^3$ металла от $T_{\min} = 20 \text{ }^\circ\text{C}$ до $T_{\max} = 2000 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$dQ = dm(c\Delta T_1 + L + c\Delta T_2), \quad (1)$$

где c — удельная массовая теплоемкость металла, Дж/(кг·К); dm — масса объема dV материала; ΔT_1 — температурный диапазон от $20 \text{ }^\circ\text{C}$ до температуры плавления $T_{\text{lic}} = 1450 \text{ }^\circ\text{C}$; L — удельная массовая теплота плавления, Дж/кг; ΔT_2 — температурный диапазон от T_{lic} до T_{\max} .

Удобней перейти к объемным удельным теплоемкости и теплоте плавления:

$$dQ = dV(c_p\Delta T_1 + L_p + c_p\Delta T_2) = dV(c_p\Delta T_1 + L_p + c_p\Delta T_2), \quad (2)$$

где ρ — средняя плотность стали на всем температурном диапазоне; $c_p = c\rho$ — удельная объемная теплоемкость металла, Дж/(м³·К); $L_p = L\rho$ — удельная объемная теплота плавления, Дж/м³.

При $T \in [T_{\min}; T_{\text{lic}}]$ $\bar{\rho} = 7575 \text{ кг/м}^3$.

Тогда:

$$\begin{aligned} c &= 462 \text{ Дж/(кг·К)} \rightarrow c_p = 462 \cdot 7575 = \\ &= 3,5 \cdot 10^6 \text{ Дж/(м}^3\text{·К)} = 3,5 \text{ Дж/(см}^3\text{·К)}. \\ L &= 277 \text{ кДж/кг} \rightarrow L_p = 277 \cdot 10^3 \cdot 7575 = \\ &= 2,1 \cdot 10^9 \text{ Дж/м}^3 = 2100 \text{ Дж/см}^3. \\ dQ &= 3,5 \cdot 18,9(1450 - 20) + 2100 \cdot 18,9 + \\ &+ 3,5 \cdot 18,9(200 - 1450) \approx 171 \text{ кДж}. \end{aligned}$$

Расходуемая при сварке мощность составит $P = dQ/dt = 171/19 = 9 \text{ кВт}$.

Приведенные оценки показывают, что параметры режима ЭШС обеспечивают достаточную мощность для нагрева выгородки (60 %) и расплавления металла шва (40 %).

Инкремент по времени τ для решения температурной задачи определяется из соотношения:

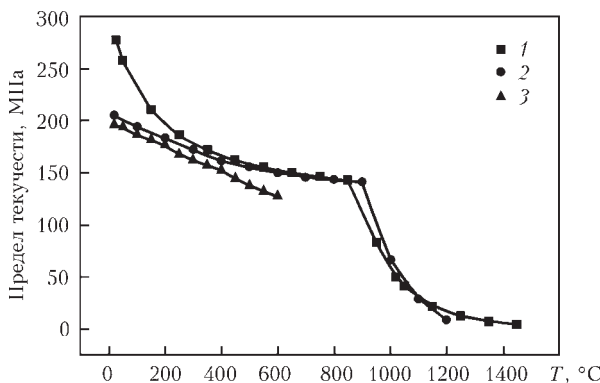


Рис. 4. Зависимость предела текучести стали 08X18H10T от температуры, взятая из различных источников: 1 — расчет программы JMatPro; 2 — Неймарк [12]; 3 — ПНАЭ [13]

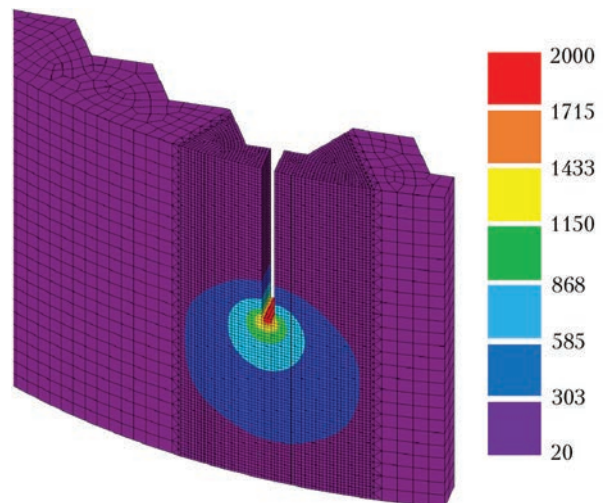


Рис. 5. Численная сетка, температура ($^\circ\text{C}$) и область проплавления в трехмерной модели электрошлаковой сварки

$$\tau < \frac{c h^2}{2\lambda}, \quad (3)$$

где $h = 0,814$ см — толщина численного элемента (дискретного слоя расплавленного металла за время dt); $\lambda = \lambda(T)$ — теплопроводность; $\lambda|_{t=20} = 1,6$ Вт/(м·К) = 0,166 Вт/(см·К), $\lambda|_{t=1000} = 30,0$ Вт/(м·К) = 0,3 Вт/(см·К).

$$\tau|_{t=20} > \tau|_{t=1000} < \frac{3,5 \cdot 0,814^2}{2 \cdot 0,3} \approx 3,9 \text{ с.}$$

Таким образом, для сходимости решения температурной задачи шаг времени dt необходимо разбить на $\lceil dt / \tau \rceil = 5$ инкрементов или более. Для механической задачи инкремент может превышать τ .

Моделирование термообработки. Ответственные сварные конструкции элементов оборудования АЭС подвергаются обязательной термообработке, что позволяет снизить уровень остаточных сварочных напряжений. Так, выгородка ВВЭР-1000 после сварки проходит термообработку по режиму высокого отпуска при температуре 650 °С. С ростом температуры снижается предел текучести материала, и остаточные сварочные напряжения частично релаксируют за счет эффекта мгновенной пластичности. Еще большее влияние на релаксацию остаточных сварочных напряжений оказывает эффект ползучести материала, который имеет место при указанной температуре.

Скорость деформаций ползучести $\dot{\epsilon}_{eq}^{cr}$ связана с интенсивностью напряжений σ_{eq} законом Нортона [14] $\dot{\epsilon}_{eq}^{cr} = A \cdot \sigma_{eq}^n$. Поэтому за инкремент времени dt прирост $d\epsilon_{eq}^{cr}$ интенсивности деформаций ползучести составит $d\epsilon_{eq}^{cr} = A \cdot \sigma^n dt$.

Для материала выгородки при температуре $T = 650$ °С функция ползучести $\dot{\epsilon}_{eq}^{cr}(\sigma)$ выглядит так:

$$d\epsilon_{eq}^{cr} = 6,07307 \cdot 10^{-14} \sigma^{4,8351} dt. \quad (4)$$

Зависимость (4) иллюстрирует рис. 6.

Модель радиационного распухания. Зависимость радиационного распухания $d\epsilon_{eq}^{sw}$ от повре-

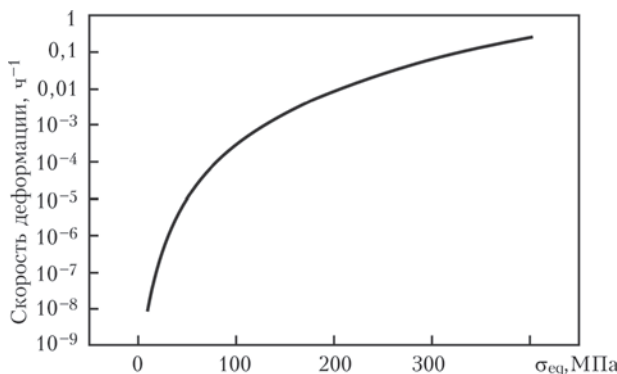


Рис. 6. Функция ползучести для стали 08X18H10T при температуре $T = 650$ °С

ждающей дозы D носит степенной характер [8, 15]:

$$\begin{aligned} \frac{d\epsilon_{eq}^{sw}}{dt} &= C_D n D(t)^{n-1} f_1(T) f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) f_3(\alpha) \frac{dD}{dt}, \\ d\epsilon_{eq}^{sw} > 0, \quad d\epsilon_{eq}^{sw} \Big|_{t=0} &= 0, \end{aligned} \quad (5)$$

$$f_1(T) = \exp(-r(T - T_{max})^2),$$

$$f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) = 1 + 8 \cdot 10^{-3} (0,85\sigma_m + 0,15\sigma_{eq}),$$

$$f_3(\alpha) = \exp(-8,75\alpha),$$

$$C_D = 1,035 \cdot 10^{-4}, \quad n = 1,88, \quad r = 1,825 \cdot 10^{-4}, \quad T_{max} = 470^\circ \text{С},$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz}}{3},$$

где $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{zz}$ — нормальные компоненты тензора напряжений,

$$\alpha = \int_0^D d\epsilon_i^p,$$

где $d\epsilon_i^p$ — интенсивность приращений пластических деформаций, $d\epsilon_i^p = \frac{\sqrt{3}}{2} \sqrt{d\epsilon_{ij}^p \cdot d\epsilon_{ij}^p}$, $i, j = 1, 2, 3$.

Выражение дополним соотношением для учета радиационной ползучести:

$$\frac{d\epsilon_{eq}^{cr}}{dt} = \left(B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \frac{d\epsilon_{eq}^{sw}}{dt} \right) \sigma_{eq}, \quad d\epsilon_{eq}^{cr} > 0, \quad \epsilon_{eq}^{cr} \Big|_{t=0} = 0, \quad (6)$$

$$B_0 = 1 \cdot 10^{-6} (\text{МПа} \cdot \text{сна})^{-1}, \quad \omega = 2,95 \cdot 10^{-3} \text{ МПа}^{-1}.$$

Суммарный тензор приращений деформаций $d\epsilon$ распухания представляется как сумма приращения деформации радиационной ползучести $d\epsilon_{eq}^{cr}$ (девиаторная компонента) и приращения радиационного распухания $d\epsilon_{eq}^{sw}$ (шаровая компонента) на данном шаге по времени:

$$d\epsilon = \frac{1}{3} d\epsilon_{eq}^{sw} \mathbf{I} + d\epsilon_{eq}^{cr} \mathbf{n}, \quad (7)$$

где \mathbf{I} — единичный тензор, $\mathbf{n} = d\sigma_{eq} / d\sigma$ — интенсивность напряжений; σ — тензор напряжений.

Приращения деформаций $d\epsilon$ суммируются на всех шагах по времени, ϵ — суммарный тензор деформаций радиационного распухания, под объемными деформациями распухания будем понимать его первый инвариант.

Температурную зависимость предела текучести показывает рис. 4. Учет изменения предела текучести материала выгородки в зависимости от радиационной дозы а также температуры в задаче радиационного распухания дают соотношения, взятые из [7]:

$$\sigma_{0,2}(T, D) = \begin{cases} \sigma_{0,2}^0(T) + \Delta\sigma_{0,2}^T(T, D), & D < D^* \\ \sigma_{0,2}^*(T) + \Delta\sigma_{0,2}^*(D), & D \geq D^* \end{cases}$$

$$\sigma_{0,2}^0(T) = 155 + 239 \cdot \exp(-2,22 \cdot 10^{-3}(T + 273)), \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{0,2}^T(T, D) = (\sigma_{0,2}^*(T) - \sigma_{0,2}^0(T)) \frac{\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D)}}{\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D^*)}} \quad (8)$$

$$\sigma_{0,2}^*(T) = 650 + 1405 \exp(-5,9 \cdot 10^{-3}(T + 273)), \text{ МПа}$$

$$\Delta\sigma_{0,2}^*(D) = A_{\sigma_{0,2}} \left(\sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D)} - \sqrt{1 - \exp(-C_{\sigma_{0,2}} D^*)} \right)$$

$$D^* = 7 \text{ сна}, C_{\sigma_{0,2}} = 0,126 \text{ сна}^{-1}, A_{\sigma_{0,2}} = 621 \text{ МПа}.$$

Результаты. Получено поле ОСН при электрошлаковой сварке выгородки с учетом термообработки.

Решена задача радиационного распухания выгородки в двух случаях: с учетом влияния ОСН и без.

Все задачи нелинейные и решены с прослеживанием по времени при помощи метода конечных элементов. Задача оценки остаточных сварочных напряжений решена в трехмерной постановке, остальные — в двумерной в условии обобщенной плоской деформации. В двумерных зада-

чах рассматривается срединное сечение кольца выгородки.

Остаточные сварочные напряжения. Изменение максимальных растягивающих и сжимающих напряжений после сварки и в процессе термообработки демонстрирует табл. 3. Максимальные напряжения после сварки/термообработки — осевые (продольные), их распределение показано на рис. 7.

Поле ОСН заложено в расчет радиационного распухания в качестве начального условия. Модель (5) учитывает влияние напряжений на величину распухания, поэтому стоит ожидать различия в полях распухания в задачах с учетом и без учета сварки.

Влияние ОСН на распухание и НДС в процессе эксплуатации. Результаты расчета распухания выгородки по модели (5)–(8) показаны на рис. 8.

Результаты расчета напряженного состояния по модели (5)–(8) — показаны на рис. 9.

Обсуждение. Максимальные остаточные сварочные напряжения — осевые — в сечении 1 имеют знак «+», то есть являются растягивающими. По модели растягивающие напряжения способствуют росту радиационного распухания. Однако результаты на рис. 8 не указывают на значительное влияние ОСН на величину распухания. То

Таблица 3. Максимальные сжимающие/растягивающие остаточные сварочные напряжения в выгородке, МПа

Этап	Радиальные	Окружные	Осевые (продольные)
1. После сварки	-64/90	-52/105	-109/304
2. Термообработка — нагрев	-41/57	-41/75	-67/170
3. Термообработка — горячее состояние после отпуска	-23/24	-21/29	-27/50
4. Холодное состояние после термообработки	-30/31	-27/37	-34/65



Рис. 7. Распределение осевых (продольных) остаточных сварочных напряжений в выгородке после термообработки

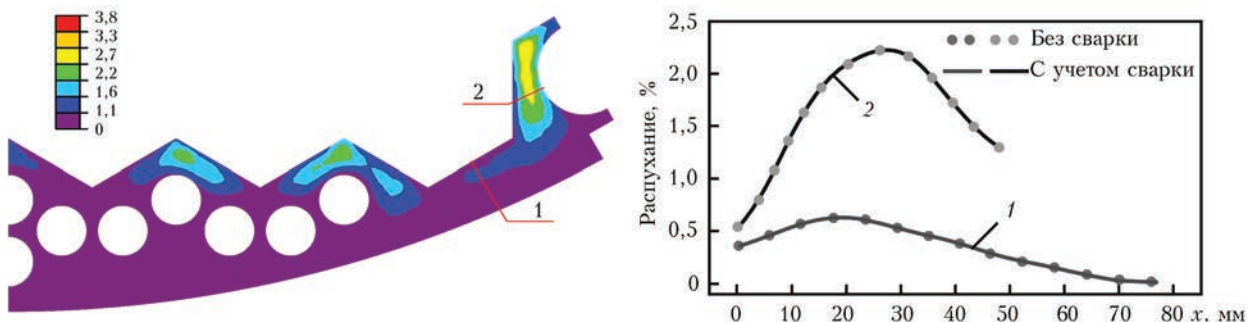


Рис. 8. Поле объемных деформаций распухания в выгородке после 60 лет эксплуатации и распределения распухания в сечениях 1 и 2 в задачах с учетом и без учета ОСН

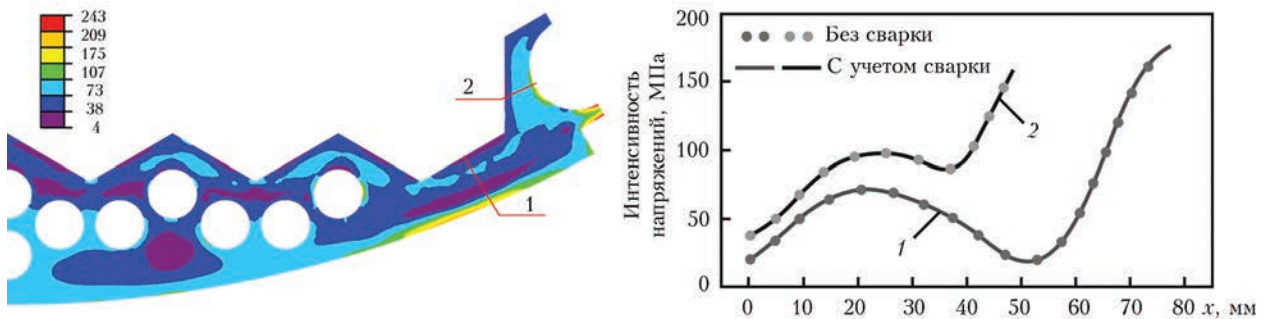


Рис. 9. Поле интенсивности напряжений в выгородке после 60 лет эксплуатации и распределения напряжений в сечениях 1 и 2 в задачах с учетом и без учета ОСН

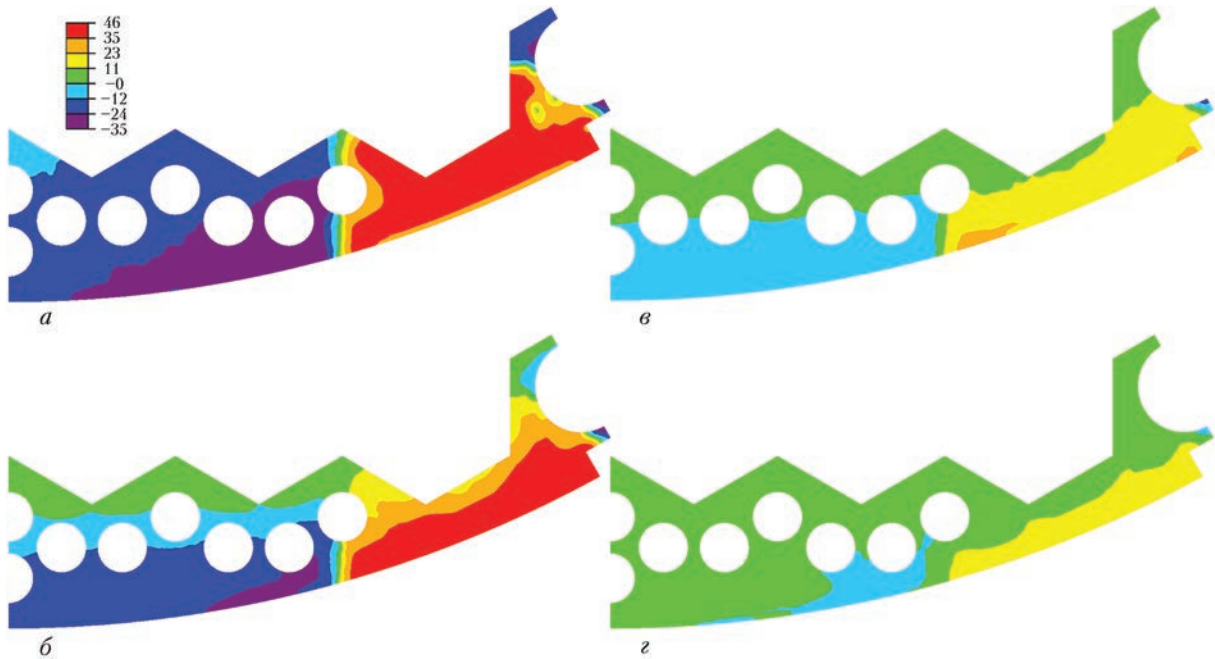


Рис. 10. Релаксация ОСН в выгородке реактора ВВЭР-1000: а — в начале эксплуатации; б — после 20 лет; в — после 40 лет; г — после 60 лет эксплуатации

есть ОСН на уровне 65 МПа недостаточно велики для оказания влияния на величину распухания в области сварных швов выгородки.

Кроме того, как видно из рис. 9, различие в распределениях напряжений в сечении 1 после 60 лет эксплуатации составляет около 6 МПа, что значительно ниже уровня ОСН, заложенных в расчет распухания. Такое поведение ОСН объясняется явлением радиационной ползучести, заложенной в модель распухания в зависимости (6). Однако принципиально важно выяснить каким образом происходит релаксация ОСН под действием радиационного облучения. Для этого в различные моменты времени от начала эксплуатации вычислялась разность полей осевых напряжений в выгородке (рис. 10). Такой подход позволяет проследить историю изменения вклада ОСН в общее напряженное состояние.

Рис. 10 показывает снижение ОСН в выгородке во времени и объясняет результаты, показанные на рис. 9: поля напряжений в выгородке после 60 лет эксплуатации в задачах распухания с учетом и без учета сварки отличаются на ~6 МПа.

Важно заметить, что релаксация ОСН в выгородке происходит не мгновенно, а в течение 60 лет эксплуатации реактора. Количественно это явление можно описать зависимостью:

$$\sigma = \sigma_0 0,92^t, \tag{9}$$

где σ_0 — начальный уровень ОСН в выгородке при выходе реактора на режим нормальной эксплуатации; t — год эксплуатации реактора.

Зависимость (9) представляет собой инженерное соотношение, которое можно применять для оценки статической и циклической прочности, а также для оценки сопротивления хрупкому разрушению материала выгородки. Это соотношение проиллюстрировано на рис. 11.

Заметим, что соотношение (9) получено для конкретных входных данных, таких как объемные тепловыделения и радиационная доза [9, 10], которые могут сильно варьировать для различных энергоблоков. Поэтому будущие оценки по продлению ресурса ВКУ ВВЭР-1000 рекомендуется проводить с учетом сварных соединений.

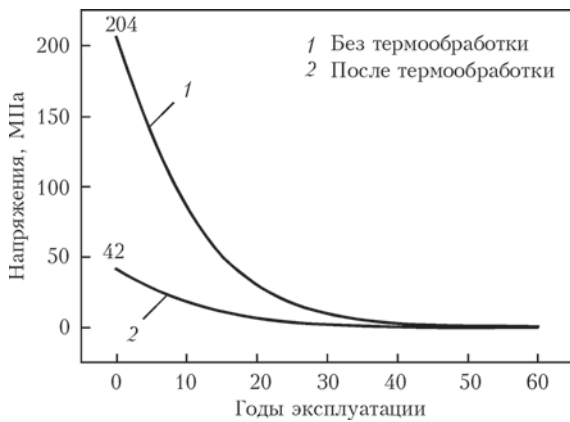


Рис. 11. Количественная характеристика релаксации ОСН в выгородке реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации: 1 — без термообработки; 2 — после термообработки

Выводы

1. В работе показано, что ОСН в выгородке ВВЭР-1000 с учетом термообработки практически полностью релаксируют под действием радиационного облучения за срок около 60 лет.
2. История влияния ОСН за 60 лет эксплуатации существенно не изменяет распухание выгородки в области сварных швов.
3. Выведено инженерное соотношение для оценки величины ОСН в выгородке в процессе эксплуатации.
4. Будущие оценки остаточного ресурса ВКУ ВВЭР-1000 рекомендуется проводить с учетом сварных соединений.

1. Irradiation effects on the evolution of the microstructure, properties and residual stresses in the heat affected zone of stainless steel welds. INTERWELD Project: FIKS-ST-2000-00103.
2. Махненко О. В. Перераспределение остаточных сварочных напряжений во внутрикорпусной шахте реактора ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации / О. В. Махненко, Е. А. Великоиваненко, И. В. Мирзов // Автоматическая сварка. — 2014. — № 11. — С. 1–7.

3. Электрошлаковая сварка и наплавка; под ред. Б.Е. Патона. — М.: Машиностроение, 1980. — 511 с.
4. Основные положения по сварке и наплавке узлов и конструкций атомных электростанций, опытных и исследовательских ядерных реакторов и установок. — М.: Металлургия, 1975. — 136 с.
5. Лычко И. И. Особенности ЭШС толстостенных протяженных стыков из стали типа 18-8 / И. И. Лычко, И. И. Сушук-Слюсаренко, К. А. Ющенко // Автоматическая сварка. — 1999. — № 9. — С. 61–65.
6. Сварка сталей электрошлаковая. Требования к технологическому процессу: ГОСТ 30482–97. — Издательство стандартов, 2001. — Межгосударственный стандарт.
7. Влияние нейтронного облучения на механические свойства материалов внутрикорпусных устройств реакторов типа ВВЭР / А.А. Сорокин, Б.З. Марголин, И.П. Курсевич и др. // Вопросы материаловедения. — 2011. — № 2 (66). — С. 131–151.
8. Марголин Б. З. Анализ влияния вида напряженного состояния на радиационное распухание и радиационную ползучесть аустенитных сталей / Б. З. Марголин, А. И. Мурашова, В. С. Неустров // Проблемы прочности. — 2012. — № 3. — С. 5–24.
9. Дополнительные работы по оценке технического состояния элементов реактора энергоблока №1 ОП Южно-Украинской АЭС (этап № 6). Оценка радиационного распухания выгородки / В. Пиштора, С. Вандлик, Д. Лаурова, И. Андел // Отчет ИЯИ г. Ржеж, 2011. — 81 с.
10. The mechanisms of material degradation under neutron irradiation for WWER internals and methods for structural integrity assessment / B. Margolin, V. Fedorova, A. Sorokin et. al. // Intern. conf. «Structural integrity and life of NPP equipment», 1–5 Oct. 2012, Kiev, Ukraine.
11. К вопросу о радиационном распухании и радиационном охрупчивании аустенитных сталей. Часть II. Физические и механические закономерности охрупчивания / Б.З. Марголин, И. П. Курсевич, А. А. Сорокин и др. // Вопросы материаловедения. — 2009. — №2 (58). — С. 99–111.
12. Неймарк Б. Е. Физические свойства сталей и сплавов, используемых в теплоэнергетике: справочник / Б. Е. Неймарк. — М.-Л.: Энергия, 1967. — 240 с.
13. Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок (ПНАЭ Г-7002–86). Госатомэнергоиздат. СССР. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 525 с.
14. Работнов Ю. Н. Ползучесть элементов конструкций / Ю. Н. Работнов. — М.: ГИФМЛ, 1966. — 752 с.
15. Марголин Б. З. Влияние напряжений на радиационное распухание аустенитных сталей / Б. З. Марголин, А. И. Мурашова, В. С. Неустров // Вопросы материаловедения. — 2011. — №4(68). — С. 124–139.

Поступила в редакцию 16.02.2015

Вакансии

Компания Ярдвэй Групп, КНР приглашает на работу трех инженеров-сварщиков

Требования к кандидатам:

- ◆ степень бакалавра или выше по специальностям: сварка, машиностроение, электротехника и родственные специальности;
- ◆ мужчины, возраст 25–49 лет;
- ◆ базовое знание разговорного английского языка;
- ◆ интерес к китайской культуре, желание работать в КНР и других странах мира.

Сферы деятельности

Послепродажное обслуживание сварочного оборудования на предприятиях клиентов.
Модернизация существующего и разработка нового сварочного оборудования.

Приветствуется опыт работы в иностранных компаниях.

E-mail: masha@kiwayzh.com.

Tel: +8613809235810 (Kyiv time from 9:00-17:00). <http://www.yardwaygroup.com/>