

Результаты измерения остаточных деформаций в корпусе реактора ВВЭР-1000

© В.В. Сумин, С.Г. Шеверев, R. Schneider*,
R. Wimpory*, А.М. Балагуров

Объединенный институт ядерных исследований, Дубна,
Московская обл., Россия

* Helmholtz-Zentrum Berlin für Materialien und Energie,
Berlin, Germany

E-mail: sumin@nf.jinr.ru

Методом нейтронной дифракции исследованы внутренние напряжения в образцах, вырезанных из натурального корпуса реактора ВВЭ-1000. Исследованы тонкий и толстый темплеты (плоские образцы, вырезанные из объемного изделия), выявлено влияние объемного фактора на распределение напряжений. Обнаружено хорошее соответствие экспериментальных данных проводившимся ранее теоретическим расчетам. Тангенциальные напряжения в феррите на границе раздела фаз феррит-аустенитное покрытие являются сжимающими, что позволяет считать изделие имеющим высокую стойкость к коррозионному растрескиванию.

Работа выполнена при поддержке гранта МНТЦ № 3074.2.

1. Введение

Благодаря высокой проникающей способности тепловых нейтронов метод дифракции может быть использован для измерения распределения остаточных напряжений в объеме кристаллических материалов до глубин порядка нескольких сантиметров. Суть метода состоит в измерении смещения положения дифракционных пиков от положений, определяемых параметрами элементарной ячейки недеформированного материала [1,2]. Внутренние напряжения, существующие в материале, вызывают соответствующую деформацию кристаллической решетки, что в свою очередь выражается в сдвиге брэгговских пиков на дифракционном спектре. Это дает прямую информацию об изменении межплоскостных расстояний, из которых легко можно вычислить внутренние напряжения.

В настоящее время метод находит широкое применение для определения остаточных напряжений в объемных изделиях и композиционных материалах, при исследовании сварных швов, сложнодеформированных изделий, изучении поведения материалов при усталостных испытаниях.

Величины деформаций, определяемые внутренними напряжениями, обычно имеют порядок 10^{-3} – 10^{-4} , поэтому для их измерений используется нейтронный дифрактометр высокого разрешения с $\Delta d/d = (3-5) \cdot 10^{-3}$. Точность определения остаточных напряжений составляет при этом для сталей 20–40 МПа.

В настоящей работе исследовались остаточные напряжения в натуральном корпусе реактора ВВЭР-1000 под нержавеющей наплавкой внутри корпуса. Основной металл корпуса представляет собой феррит марки 15ХГМФАА. Знак остаточных напряжений в направлении, параллельном межфазной границе наплавка-феррит (тангенциальное напряжение), имеет большое значение

для коррозионной стойкости корпуса. При положительных значениях тангенциального напряжения — растяжении — любая трещина в нержавеющей наплавке приведет к растрескиванию и в феррите. Отрицательные значения этого напряжения, наоборот, будут препятствовать растрескиванию.

В работе использовались два темплет для измерения остаточных напряжений методом нейтронографии высокого разрешения: тонкий темплет размером $100 \times 40 \times 8$ mm (рис. 1) и толстый темплет $100 \times 100 \times 40$ mm (рис. 2).

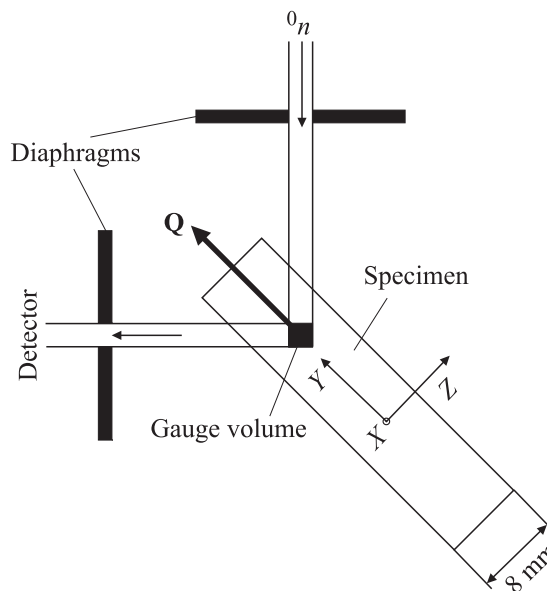


Рис. 1. Схема измерения тангенциальных остаточных деформаций в тонком темплете. При измерении нормальных остаточных деформаций вектор Q направлен перпендикулярно межфазной поверхности (параллельно оси X). Входящий пучок нейтронов обозначен как $0n$.

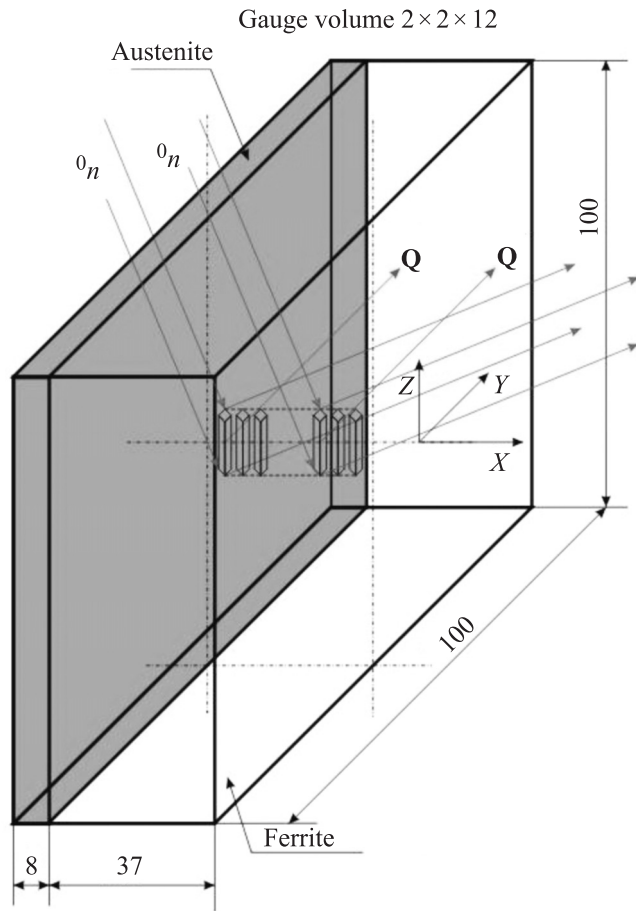


Рис. 2. Размеры и схема измерения тангенциальных остаточных деформаций в толстом темплете. При измерении нормальных остаточных деформаций вектор \mathbf{Q} направлен перпендикулярно межфазной поверхности. Входящий пучок нейтронов, перемещающийся относительно образца в процессе сканирования, обозначен как θ_n . Все размеры приведены в мм.

2. Тонкий темплет

Эксперименты были выполнены на специализированном Фурье-стресс-дифрактометре ФСД [2] на реакторе ИБР-2 (ЛНФ ОИЯИ, Дубна), который благодаря использованию специальной корреляционной методики позволяет получать дифракционные спектры высокого разрешения ($\Delta d/d = (2-4) \cdot 10^{-3}$).

Схема проведения эксперимента по измерению ϵ_y -компоненты тензора деформаций представлена на рис. 1. Вектором \mathbf{Q} на рисунках обозначено направление вектора рассеяния нейтронов, которое совпадает с измеряемой компонентой тензора деформаций. Для измерения дифракционных спектров был использован детектор при угле рассеяния $2\theta = 107.5^\circ$. С помощью диафрагмы из нитрида бора были сформированы профили падающего пучка шириной 2.4 мм, рассеянного пучка шириной 3.6 мм, высота пучка 4.0 мм, что позволило выделить внутри образца на заданной глубине измеряемый объем $2.4 \times 3.6 \times 4$ мм. Измеряемый объем во

время сканирования располагался в середине образца по толщине (8 мм) и по высоте (100 мм) для измерения всех компонент деформации. При измерении в каждой точке время экспозиции составляло 20 h для ϵ_y -компоненты тензора деформаций. В ферритной фазе была измерена ϵ_y -компонента тензора деформаций в четырех точках по X , в аустенитной фазе были измерены все три компонента тензора деформаций в одной точке при $X = 4$ мм.

3. Результаты эксперимента

После обработки измеренных дифракционных спектров по методу Ритвельда были получены значения параметров решетки. Остаточные деформации в образце определялись как относительное изменение параметра решетки: $\epsilon = (a - a_0)/a_0$, где $(a_0)_{\text{ferr}} = 2.86314 \pm 0.00002$ и $(a_0)_{\text{aust}} = 3.58632 \pm 0.00009$ — параметры решетки, измеренные для образцов-эталонов.

Остаточные напряжения рассчитывались по формулам

$$\begin{aligned}\sigma_x &= \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_x + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right), \\ \sigma_y &= \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_y + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right), \\ \sigma_z &= \frac{E}{1+\nu} \left(\epsilon_z + \frac{\nu}{1-2\nu} (\epsilon_x + \epsilon_y + \epsilon_z) \right),\end{aligned}\quad (1)$$

где σ_x , σ_y , σ_z , ϵ_x , ϵ_y , ϵ_z — компоненты тензора напряжений и деформаций соответственно, E — модуль Юнга, ν — коэффициент Пуассона. Для ферритной фазы

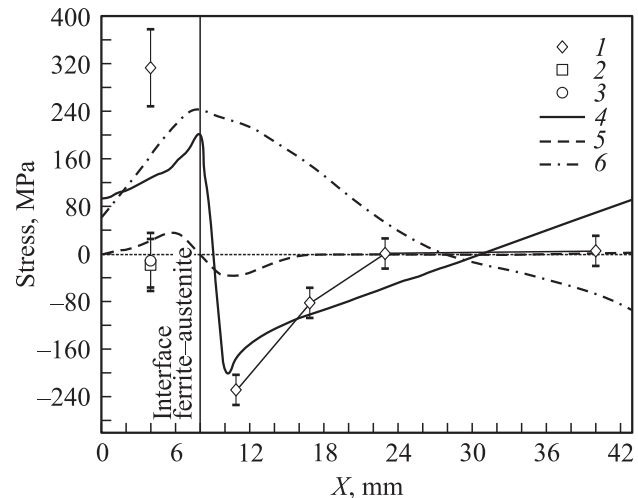


Рис. 3. Изменение остаточных напряжений σ при сканировании вдоль координаты X . Межфазная граница соответствует координате $X = 8$ мм. Экспериментальные результаты ОИЯИ: ферритная фаза — тангенциальная компонента σ_y (1); аустенитная фаза (в точке $X = 4$ мм) — σ_y (1), σ_x (2), σ_z (3). Результаты теоретических расчетов: 4 — тангенциальное напряжение, 5 — нормальное напряжение (по модели I); 6 — тангенциальное напряжение (по модели II).

были использованы следующие значения: $E = 210$ GPa, $\nu = 0.3$. Для аустенитной фазы были использованы справочные данные [3] для $T = 20^\circ\text{C}$: $E = 198$ GPa, $G = 77$ GPa. Отсюда было получено значение для коэффициента Пуассона $\nu = E/2G - 1 = 0.286$.

Компоненту тензора напряжений σ_y , параллельную межфазной плоскости, будем в дальнейшем называть тангенциальной компонентой ε_x — нормальной компонентой. Для ферритной фазы остаточные напряжения рассчитывались в предположении модели I (рис. 3): $\varepsilon_x = 0$ и $\varepsilon_z = 0$. Для расчета компонент тензора напряжений σ в аустенитной фазе использовались все три измеренные компоненты тензора деформаций $\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z$.

Таким образом, сравнение экспериментальных точек с модельными расчетами указывают на подтверждение в эксперименте модели I. Альтернативная модель II, предполагающая отсутствие перехода растягивающих напряжений в сжимающие на границе феррит–аустенит, не получила подтверждения в эксперименте. Однако грубое допущение $\varepsilon_x = 0$ и $\varepsilon_z = 0$, а также возможный эффект снятия части напряжений при вырезке тонкого темплетта заставили нас измерить также толстый темплет.

4. Толстый темплет

Вид и схема измерений толстого темплетта показаны на рис. 2. Из соображений симметрии можно считать, что деформации в обоих тангенциальных направлениях равны, т.е. $\varepsilon_z = \varepsilon_y$. Поэтому экспериментально была измерена только одна тангенциальная компонента, а также нормальная компонента остаточных деформаций.

Измерения были проведены на стресс-дифрактометре ЕЗ Института Хана–Майтнер. Результаты измерений приведены на рис. 4 и 5. В нормальном направлении

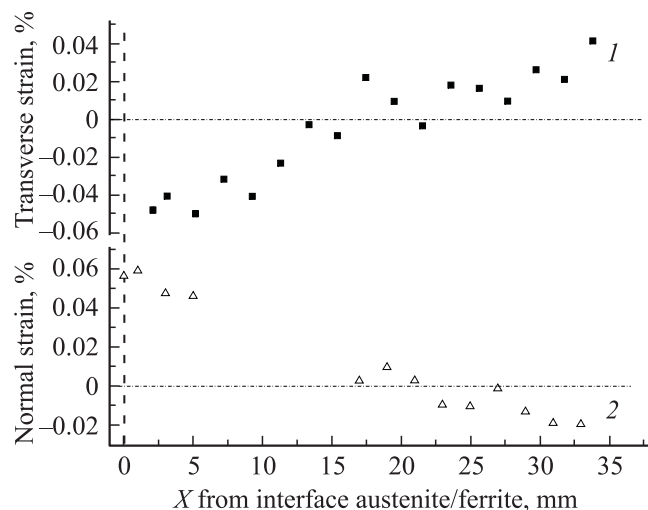


Рис. 4. Тангенциальная (1) и нормальная (2) компоненты остаточных деформаций в толстом темплетте. Начало координат вдоль оси абсцисс совпадает с межфазной границей.

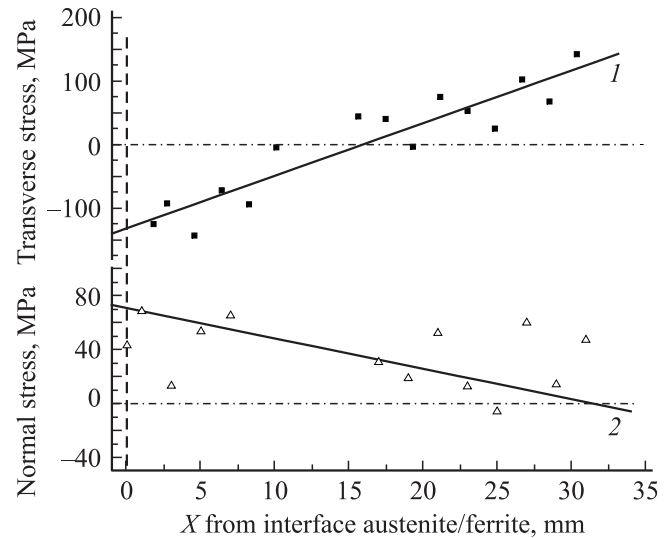


Рис. 5. Тангенциальная (1) и нормальная (2) компоненты остаточных напряжений в феррите под наплавкой толстого темплетта корпуса реактора ВВЭР-1000.

образец был измерен с двух сторон — со стороны наплавки до глубины 5 mm в ферритной фазе; со стороны, противоположной наплавке, от координаты 34 mm до 17 mm внутри феррита (рис. 4). Остаточные деформации в середине темплетта измерить не удалось из-за ограничений по светосиле.

В приближении $\varepsilon_z = \varepsilon_y$ по формулам (1) были рассчитаны остаточные напряжения в толстом темплетте. Как и в случае тонкого темплетта, остаточные напряжения под наплавкой в ферритной фазе остались отрицательными, т.е. как было указано выше, благоприятными в плане коррозионного растрескивания, но имели несколько меньшее значение: -140 MPa в толстом темплетте против -220 MPa в тонком. Одной из причин такого несоответствия является недооценка нормальных остаточных напряжений ($\varepsilon_x = 0$) для тонкого темплетта, которые на самом деле не являются малыми: в толстом темплетте они составили 70 MPa (рис. 5), к тому же имеют противоположный знак.

5. Заключение

Полученные результаты свидетельствуют о высоких коррозионных свойствах исследованного изделия. Показано, что нормальные напряжения в феррите под наплавкой не равны нулю и их следует учитывать при рассмотрении напряженного состояния. Тангенциальные напряжения в феррите имеют отрицательный знак, что благоприятствует высокой сопротивляемости изделия коррозионному растрескиванию. Разница в результатах, полученных при исследовании тонкого и толстого темплеттов, существенна вследствие частичного снятия внутренних напряжений при вырезании тонкого образца.

Список литературы

- [1] A.J. Allen, M.T. Hutchings, C.G. Windsor, C. Andreani. Adv. Phys. **34**, 445 (1985).
- [2] В.Л. Аксенов, А.М. Балагуров, Г.Д. Бокучава, В.В. Журавлев, Е.С. Кузьмин, А.П. Булкин, В.А. Кудряшев, В.А. Трунов. Сообщ. ОИЯИ.Р13-2001-30. Дубна (2001).
- [3] В.Г. Сорокин, А.В. Волосникова, С.А. Виткин, В.А. Мирмилштейн. Марочник сталей и сплавов. Машиностроение, М. (1989).