

УДК 539.12.043

**ВЛИЯНИЕ ПЛОТНОСТИ ПОТОКА НЕЙТРОНОВ НА ОХРУПЧИВАНИЕ
КОРПУСНОЙ СТАЛИ***Николаенко В.А., Красилов Е.А. (НИЦ «Курчатовский ин-т», г. Москва)*

Целостность корпуса ВВЭР является одним из основных условий безопасной эксплуатации АЭС, поэтому контроль состояния металла корпуса и прогнозирование развития его радиационной хрупкости являются важной инженерной и научной задачей. Для каждого энергоблока она решается путем выполнения программ, которые предусматривают размещение внутри корпуса образцов-свидетелей корпусной стали. Периодически часть образцов извлекается и подвергается испытанию, что позволяет судить об охрупчивании.

В местах расположения образцов плотность потока нейтронов более высокая по сравнению со стенкой корпуса, что позволяет прогнозировать состояние металла. Однако облучение при более высокой плотности потока нейтронов ставит вопрос о корректности использования результатов, так как плотность потока нейтронов может повлиять на степень охрупчивания. В связи с этим в настоящей работе рассмотрена возможность оценки плотности потока нейтронов — увеличения охрупчивания при уменьшении плотности потока нейтронов.

Считается, что одним из основных факторов, определяющих наличие или отсутствие этого влияния, является содержание в металле меди. Например, в экспериментах [1, 2] показано, что порогом начала влияния на материал корпусов ВВЭР-440 является содержание меди более 0,1% по массе. Однако отмечено не получившее объяснения исключение из этого правила [3]. Из материалов такого состава изготовлены облучаемые части корпусов реакторов Кольской (3-й и 4-й блоки) и Ровенской АЭС (2-й блок), содержание меди в которых составляет 0,1 (основной металл) и 0,04—0,08% по массе (металл сварных швов). Это позволяет не учитывать плотность потока нейтронов при оценке состояния корпусов перечисленных энергоблоков по испытаниям образцов-свидетелей. К этому же классу материалов относится металл корпусов ВВЭР-440 после восстановительного отжига, когда содержание меди в матрице не превышает 0,05% по массе [2].

В общем случае степень радиационного охрупчивания стали зависит от факторов двух типов: внутренних (химический состав, технология изготовления стали и др.) и внешних (условия облучения, время). Выделить в чистом виде влияние какого-либо из этих факторов сложно, и в настоящей работе исследования радиационного охрупчивания в одинаковом диапазоне плотности потока нейтронов разных материалов были объединены в группы с усреднением внутренних параметров. Такое объединение разнородных материалов с усреднением химического состава и технологии аналогично рассмотрению фактически одной стали с широким допуском на содержание примесей и технологию. Это превращает набор разных материалов в одну условную виртуальную сталь. Благодаря такому приему влияние нескольких параметров на результат усредняется, тем самым облегчая установление связи охрупчивания с плотностью потока нейтронов.

Результаты, на которых основано настоящее исследование, получены на образцах-свидетелях, облученных в гирляндах в ВВЭР-440 как со штатной загрузкой активной зоны, так и с кассетами-экранами. Использованы также данные облучения в исследовательских реакторах, испытания образцов, которые вырезаны из трепанов корпусов реакторов, выведенных из эксплуатации, а также из темплетов.

Одним из факторов, влияющих на свойства корпусной стали при облучении, является температура, уменьшение которой вызывает увеличение охрупчивания. Однако в настоящей работе большинство результатов получено при 270 °С, если температура в интервале 250—290 °С отличалась, вводили поправки [4]. Это позволило считать температуру облучения постоянной и равной 270 °С.

Степень охрупчивания зависит также от химического состава материалов и технологии изготовления — основной металл или металл шва. В результате данные, полученные на разных материалах, трудно сравнивать между собой, тем более использовать для исследования влияния

других параметров. Однако в настоящей работе, как уже отмечалось, химический состав и технология были исключены из рассмотрения путем объединения результатов, полученных на разных материалах.

Сдвиг критической температуры хрупкости ΔT_F в функции флюенса нейтронов F описывается эмпирической зависимостью

$$\Delta T_F = A_F (F)^{1/3}, \quad (1)$$

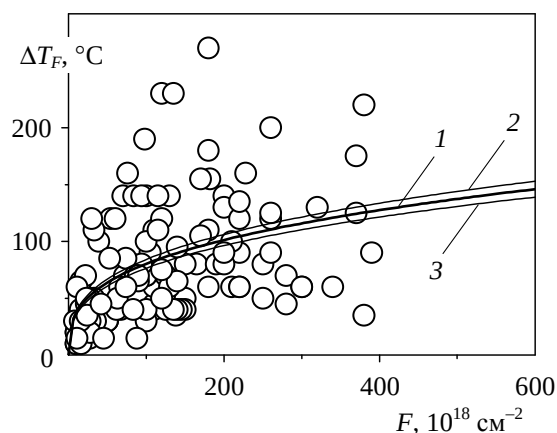
в которой коэффициент радиационного охрупчивания $A_F \cdot 10^{18} \text{ см}^{-2}$ получен из опыта в зависимости от содержания меди и фосфора:

$$A_F = 800(P + 0,07\text{Cu}), \quad (2)$$

где P , Cu — концентрация фосфора и меди, % по массе.

Коэффициент радиационного охрупчивания, обусловленный химическим составом и определяемый по формуле (2), от условий облучения не зависит, и его будем определять как $A_F^{\text{хим}}$. Если этот коэффициент выводить из эксперимента по формуле (1), когда и флюенс нейтронов, и сдвиг критической температуры хрупкости определены из опыта, то его будем обозначать $A_F^{\text{эксп}}$. Этот коэффициент уже зависит от условий облучения, в том числе и от плотности потока нейтронов.

В настоящей работе опыты с условной виртуальной сталью разделены на группы, облученные при разной интенсивности (табл. 1). Таких групп из условия примерно одинакового разнообразия материалов было выбрано пять, и каждую из них облучали в диапазоне плотности потока нейтронов, $10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$: 130—1100, 30—40,7, 12,5—29,7, 1,3—6,9 и 0,22—1,3. Таким образом, плотность потока нейтронов, при которой облучали одну и ту же виртуаль-



Р и с. 1. Зависимость от флюенса нейтронов сдвига критической температуры хрупкости стали разного химического состава (○) при облучении в исследовательских реакторах и виртуальной стали (1) с учетом разброса коэффициента A_F (2, 3)

ную сталь, изменялась в несколько тысяч раз $(0,22—100)10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

Первую группу образцов облучали при максимальной плотности потока нейтронов в исследовательских реакторах ВВР-М, СМ-2, РБТ и МР [5]. Эксперименты включали несколько сот опытов с материалом разного химического состава. Из них были отобраны опыты с температурой облучения в интервале 250—290 °С (рис. 1). Здесь же приведена полученная методом наименьших квадратов зависимость, для которой $A_F^{\text{эксп}} = 17,3 \pm 0,8$. Тогда

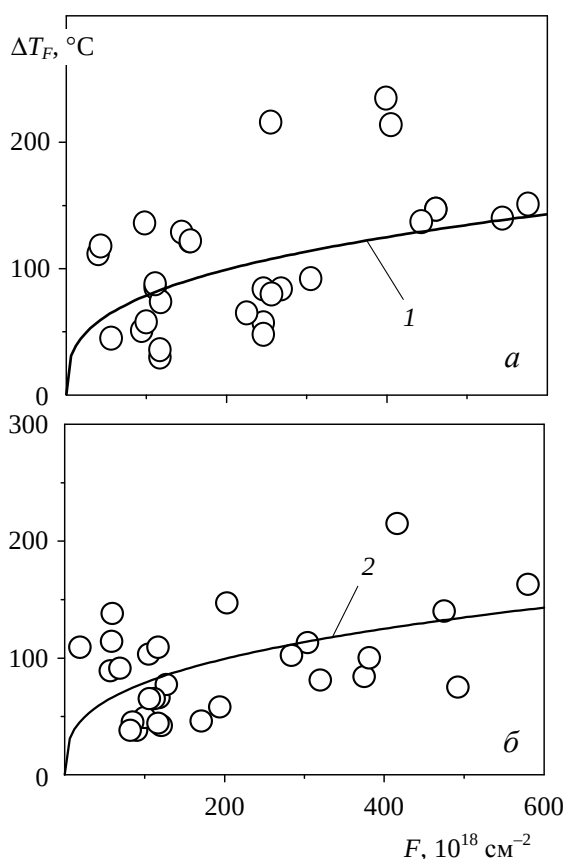
$$\Delta T_F = 17,3 F^{1/3}. \quad (3)$$

В этом случае средняя плотность потока нейтронов составила $\sim 500 \cdot 10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$, средний по образцам $A_F^{\text{хим}} = 20,5 \text{ °С}$ (диапазон 3,3—45,1 °С).

Результаты облучения при меньшей плотности потока нейтронов, приведенные на рис. 2, получены на образцах, размещенных в цент-

Таблица 1. Коэффициент радиационного охрупчивания и плотность потоков нейтронов для виртуальной стали

Число экспериментов	Плотность потока нейтронов, $10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$		$A_F^{\text{хим}}$, °С		Виртуальная сталь
	средняя	диапазон изменения	средний	диапазон изменения	$A_F^{\text{эксп}}$, °С
130	512	130—1100	20,5	3,3—45,1	17,3
30	32,8	30—40,7	23,1	12,2—40,7	18,0
35	24,2	12,5—29,7	19,7	10,6—38,1	18,1
52	4,7	1,3—6,9	21,6	11,8—40,7	20,7
15	0,7	0,22—1,3	24,9	11,8—36,4	32,1



Р и с. 2. Зависимость от флюенса нейтронов сдвига критической температуры хрупкости стали разного химического состава (○) при облучении при средней интенсивности $32,8 \cdot 10^{11}$ (а) и $24,2 \cdot 10^{11}$ $\text{c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (б): 1, 2 — расчет по формулам (4), (5) для виртуальной стали

ральных контейнерах гирлянд в ВВЭР-440. На рис. 2, а показаны результаты облучения, полученные при средней плотности потока нейтронов разных материалов $32,8 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (диапазон 30—40,7) при $A_F^{\text{хим}}$ в интервале 12—40,7 °С и среднем значении 23 °С. Число опытов составило 30, коэффициент радиационного охрупчивания виртуальной стали $18 \pm 1,4$ °С, зависимость для виртуальной стали имеет вид

$$\Delta T_F = 18F^{1/3}. \quad (4)$$

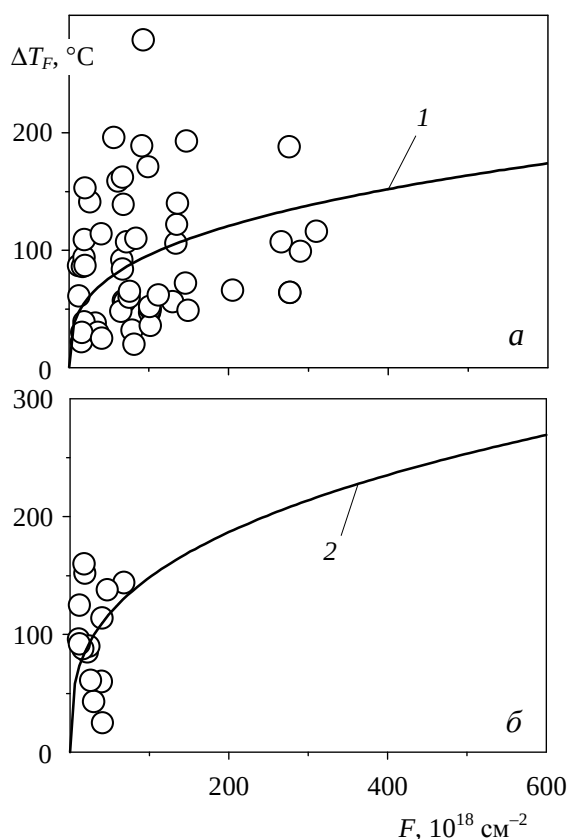
На рис. 2, б показаны результаты, полученные при средней интенсивности облучения стали $24,2 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (диапазон 12,5—29,7), средний коэффициент радиационного охрупчивания $A_F^{\text{хим}} = 19,7$ °С (10,6—38). Число точек 35. Коэффициент радиационного охрупчивания виртуальной стали $A_F = 18,1 \pm 1,1$ °С, зависимость имеет вид

$$\Delta T_F = 18,1F^{1/3}. \quad (5)$$

Та же процедура формирования виртуального материала была применена к облучению при меньшей плотности потока нейтронов в реакторе Ровенской АЭС (1-й блок), образцов из теплотов Кольской (4-й блок) и болгарской АЭС «Козлодуй» (2-й блок), трепанов, вырезанных из корпусов выведенных из эксплуатации реакторов Нововоронежской АЭС (1-й и 2-й блоки) [6], реактора атомного ледокола «Ленин» [7], образцов из верхних контейнеров гирлянд ВВЭР-440 [3]. На рис. 3, а показаны результаты облучения разных материалов при средней плотности потока нейтронов $4,7 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (диапазон 6,9—1,3), изменении $A_F^{\text{хим}}$ в диапазоне 11,8—40,7 °С, при его среднем значении 21,6 °С. Число опытов 52. Для виртуальной стали коэффициент $A_F = 20,7 \pm 1,8$ °С, зависимость

$$\Delta T_F = 20,7F^{1/3}. \quad (6)$$

На рис. 3, б показаны результаты облучения разной стали при средней плотности потока нейтронов $0,66 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (диапазон 0,22—1,3),



Р и с. 3. Зависимость от флюенса нейтронов сдвига критической температуры хрупкости стали разного химического состава (○), облученной при средней интенсивности $4,7 \cdot 10^{11}$ (а) и $0,7 \cdot 10^{11} \text{ c}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$ (б): 1, 2 — расчет по формулам (6), (7) для виртуальной стали

изменении $A_F^{\text{хим}}$ в диапазоне 11,8—36,4 °С, при среднем его значении 24,9 °С. Число опытов 15. Коэффициент радиационного охрупчивания $A_F = 32,1 \pm 3,9$ °С, зависимость для виртуальной стали

$$\Delta T_F = 32,1 F^{1/3}. \quad (7)$$

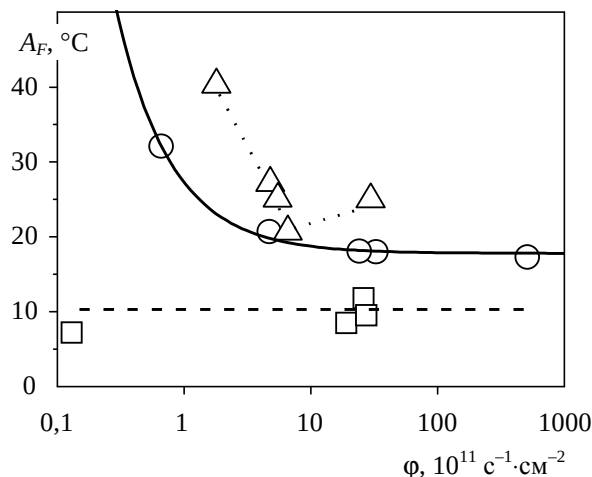
Для виртуальной стали в табл. 2 и на рис. 4 приведены рассчитанные по уравнениям (3)—(7) $A_F^{\text{экс}}$ в зависимости от плотности потока нейтронов. Получена также рассчитанная методом наименьших квадратов зависимость, устанавливающая связь между коэффициентом радиационного охрупчивания и плотностью потока нейтронов:

$$A_F = 17,8 + 9,5/\phi. \quad (8)$$

Видно, что по мере уменьшения плотности потока нейтронов охрупчивание увеличивается, наибольшая чувствительность к плотности потока нейтронов наблюдается в диапазоне $(0,1—1)10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$.

При усреднении и составлении уравнений с общими для каждой группы образцов коэффициентами $A_F^{\text{экс}}$ для сравнения усреднялись и $A_F^{\text{хим}}$. Эти коэффициенты не связаны с плотностью потока нейтронов. Оказалось, что их среднее значение для всех групп почти одинаково 23 ± 2 °С (см. табл. 1). С одной стороны, такое постоянство объясняется большим числом разных материалов, входящих в каждую отдельную группу, и, следовательно, подтверждает равенство свойств виртуальной стали разных групп. С другой, это выявляет определенность химического состава. Таким образом, найденная усреднением функция (8) не просто показывает связь охрупчивания с плотностью потока нейтронов, но делает это для металла с коэффициентом $A_F^{\text{хим}} = 23$ °С.

Надо полагать, что аналогичные зависимости для стали с большей и меньшей концентрацией примесей, следовательно, для больших и меньших коэффициентов $A_F^{\text{хим}}$ должны располагаться соответственно выше и ниже кривой зависимости (8). Экспериментов по облучению при разной плотности потока нейтронов одной и той же корпусной стали немного. Однако те, которые все же удается подобрать, это подтверждают. Например, на рис. 4, кроме зависи-



Р и с. 4. Зависимость коэффициента радиационного охрупчивания виртуальной стали от интенсивности облучения (○), стали с коэффициентом $A_F^{\text{хим}}$ 12,5 °С (□), 34 °С (△) (— — —)

мости (8), приведены результаты облучения стали с $A_F^{\text{хим}}$, равным 34 и 12,5 °С (см. табл. 2).

Т а б л и ц а 2. Зависимость $A_F^{\text{экс}}$ виртуальной стали от плотности потока нейтронов

Плотность потока нейтронов, $10^{11} \text{ с}^{-1} \cdot \text{см}^{-2}$	$A_F^{\text{экс}}$, °С	A_F по формуле (8), °С
512	17,3	17,5
32,8	18,1	17,8
24,2	18,1	18,2
4,7	20,7	19,8
0,7	32,1	32,2

Таким образом, становится очевидным, что при коэффициенте $A_F^{\text{хим}}$, близком к $A_F = 23$ °С, охрупчивание стали ВВЭР-440 примерно следует закономерности, показанной на рис. 4. Однако нижнюю границу этой закономерности методом виртуальной стали определить пока не удастся. Для материалов с коэффициентом $A_F^{\text{хим}} = 12,5$ °С и менее из-за низкого содержания меди эффект плотности потока нейтронов не проявляется.

Несмотря на недостатки формул (1), (2), они используются в радиационном материаловедении и позволяют, хотя и грубо, определить степень охрупчивания стали данного химического состава, не прибегая к опыту. Теперь появляется возможность, также минуя эксперимент, оценить изменение коэффициента радиационного охрупчивания при переходе от одной плотности потока нейтронов к другой.

В заключение авторы приносят благодарность П.А. Платонову за подробное обсуждение идеи работы.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Chernobaeva A.A., Kryukov A.M., Amaev A.D. The role of flux effect on radiation embrittlement of WWER-440 pressure vessel materials. — In: Proc. of IAEA Specialist Meeting on Irradiation Effects and Embrittlement and Mitigation. Гусь-Хрустальный, 2004, с. 41.
2. Kryukov A., Blagoeva D., Debarberis L. Flux effect analysis in WWER-440 pressure vessel steels. — J. Nucl. Mater., 2013, v. 443, p. 171—175.
3. Николаенко В.А., Красиков Е.А., Николаев Ю.А. Влияние плотности потока нейтронов на радиационное охрупчивание металлов корпусов ВВЭР-440/213. — Атомная энергия, 2004, т. 97, вып. 3, с. 177—182.
4. Нормы расчета на прочность элементов оборудования и трубопроводов корабельных атомных паропроизводящих установок с водо-водяными реакторами, НППУ-01. М., 2002.
5. Морозов А.М., Марголин Б.З., Николаев В.А., Чистяков Д.А. Влияние нестационарного температурного режима на радиационное охрупчивание материала корпуса реактора типа ВВЭР. Тезисы докл. XI Межд. конф. «Проблемы материаловедения при проектировании, изготовлении и эксплуатации оборудования АЭС». Санкт-Петербург, 14—19 июня 2010 г., с. 36.
6. Амаев А.Д., Николаенко В.А., Карпунин В.И., Королев Ю.Н. Радиационный γ -отжиг корпусной стали ВВЭР. — Атомная энергия, 1997, т. 82, вып. 5, с. 351—354.
7. Красиков Е.А., Николаенко В.А. Реконструкция охрупчивания металла корпуса реактора атомного ледокола «Ленин». — Там же, 2008, т. 105, вып. 4, с. 201—204.

Поступила в Редакцию 4.07.16

УДК 620.174.22

ЗАВИСИМОСТЬ ОПРЕДЕЛЯЕМОГО МОДУЛЯ УПРУГОСТИ МАТЕРИАЛА ОТ ОТНОШЕНИЯ РАССТОЯНИЯ МЕЖДУ ОПОРАМИ К ВЫСОТЕ СЕЧЕНИЯ ИЗГИБАЕМОГО ОБРАЗЦА

Гольцев В.Ю., Осинцев А.В., Плотников А.С. (НИЯУ МИФИ, г. Москва)

В настоящее время работа сложных изделий техники прогнозируется путем моделирования условий их нагружения с применением метода конечных элементов [1—3]. Для анализа напряженно-деформированного состояния в различных точках изделий необходимо знать механические свойства и константы упругости материалов. Однако не всегда представляются возможности для изготовления стандартных образцов на растяжение, например, по ГОСТу 1497—84 или использования резонансного метода при определении модуля упругости материала. С таким явлением сталкиваются при недостаточном количестве произведенного материала или невозможности изготовить образцы требуемой формы, например, из керамики.

Изготовление образца в виде балки для испытания на изгиб не вызывает сложности. Однако всегда возникает вопрос о размере образца, справедливости соотношений его размеров и условий нагружения для удовлетворения требованиям балочной теории в целях получения достоверных механических свойств материала и модуля Юнга, особенно при испытании образцов малых размеров.

Цель работы — исследование влияния размера образца и условий нагружения на механические свойства и модуль упругости материала. Расчетный анализ осуществляли методом конечных элементов, проводили испытания на трехточечный изгиб прямоугольных пластин с отношением высоты к ширине сечения $h/b = 2$. Отношение расстояния между опорами к высоте сечения l/h принимали равным 4, 7 и 10.

Расчетный анализ влияния условий нагружения образца на определяемый модуль упругости материала. Для предварительной оценки влияния размерных соотношений образцов на достоверность определения характеристик упругости было проведено математическое моделирование трехточечного изгиба брусков трех типоразмеров с помощью комплекса конечно-элементного анализа ANSYS Mechanical версии 16.2 [4, 5]. Материал объемного бруска, нагружающего и опорных валков принят изотропно-упругим с модулем упругости 11 и 200 ГПа соответственно. Поскольку такая схема нагружения имеет ярко выраженную симметрию, конечно-элементная модель представляла собой 1/4 часть бруска и валков (рис. 1).