

мические потери, возникшие из-за необходимости досрочного извлечения нескольких ТВС при проведении плановых частичных перегрузок топлива, оказались небольшими. К настоящему времени при плановых перегрузках восстановлен диаметр в 848 ячеек из общего их числа 1092. Прогноз показывает, что извлечение ТВС из ячеек, оставшихся с невосстановленным диаметром, при очередных перегрузках ТВС не составит трудностей.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Комиссаров О.В., Логоша Н.И., Минашин М.Е. и др. Температурный режим графитовой кладки реакторов Билибинской АТЭЦ. — Атомная энергия, 1980, т. 48, вып. 5, с. 287—291.
2. Акимов И.С., Дашковский Е.В., Рыбаков В.Г. и др. Применение ЭВМ СМ-3 на Билибинской АЭС для физико-технических расчетов реакторов, ведения архивов данных и перспективы ее использования в составе измерительно-вычислительного комплекса. — В сб.: Атомные электрические станции, вып. 7. М.: Энергоатомиздат, 1984, с. 70—77.
3. Гончаров В.В., Бурдаков Н.С., Виргильев Ю.С. и др. Действие облучения на графит ядерных реакторов. М.: Атомиздат, 1978.
4. Барабанов В.Н., Виргильев Ю.С. Радиационная ползучесть конструкционного графита. М.: Атомиздат, 1976.
5. Колкунов Н.В. Основы расчета упругих оболочек. М.: Высшая школа, 1987.
6. Александров А.В., Потапов В.Д. Основы теории упругости и пластичности. М.: Высшая школа, 1990.

Поступила в Редакцию 8.09.95

УДК 669.14:666.046.516:539.12.04

РАДИАЦИОННАЯ СТОЙКОСТЬ КОРПУСНОЙ СТАЛИ, ЛЕГИРОВАННОЙ НИКЕЛЕМ

*Николаев Ю.А., Королев Ю.Н., Крюков А.М., Левит В.И., Николаева А.В.,
Чернобаева А.А., Вишкарёв О.М., Носов С.И. (РНЦ «Курчатовский ин-т»)*

Нейтронное облучение, как известно, изменяет механические свойства и структурно-фазовое состояние материалов корпусов реакторов. Среди основных факторов, влияющих на их охрупчивание под облучением, можно выделить химический состав и структурное состояние, температуру облучения, флюенс, плотность потока и параметры спектра быстрых нейтронов. В настоящее время нет теории, которая позволила бы связать и объяснить экспериментальные данные о радиационной повреждаемости корпусных материалов, накопленные более чем за 30 лет исследований. Создание единой теории радиационного охрупчивания затрудняется как сложным, комплексным взаимодействием металлургических факторов и условий облучения, так и наличием синергетических эффектов влияния примесей и легирующих элементов на радиационную чувствительность материалов. Таким образом, представляется оправданным применение методов статистического анализа к изучению основных тенденций влияния легирующих элементов и остаточных примесей на склонность материалов корпусов реакторов к охрупчиванию под облучением.

Методика, материалы и условия облучения. В настоящей работе исследованы 14 различных материалов, легированных никелем, в том числе шесть сварных швов и восемь плавок основного металла, следующего химического состава, % по массе:

Номер образца	C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	V	S	P	Cu
1	0,040	0,24	0,97	1,60	1,28	0,60	0,01	0,006	0,011	0,06
2	0,035	0,35	0,92	1,60	1,60	0,55	0,02	0,011	0,007	0,06
3	0,075	0,30	0,92	1,80	2,45	0,65	0,03	0,007	0,006	0,05
4	0,060	0,38	0,70	1,84	1,68	0,63	0,10	0,008	0,008	0,07
5	0,060	0,37	0,82	1,65	1,72	0,66	0,01	0,012	0,008	0,05
6	0,060	0,25	0,53	1,44	1,21	0,65	0,01	0,011	0,014	0,04
1	0,150	0,25	0,36	1,68	1,41	0,61	0,11	0,010	0,012	0,10
2	0,150	0,15	0,36	1,98	1,96	0,59	0,11	0,009	0,013	0,09
3	0,170	0,27	0,47	2,00	1,30	0,50	0,10	0,009	0,013	0,10
4	0,170	0,28	0,46	2,01	1,18	0,53	0,09	0,010	0,009	0,04
5	0,150	0,26	0,46	2,24	1,15	0,56	0,10	0,012	0,009	0,04
6	0,170	0,21	0,44	1,83	1,19	0,57	0,10	0,013	0,010	0,12
7	0,180	0,23	0,48	1,95	1,17	0,55	0,10	0,010	0,007	0,06
8	0,170	0,21	0,45	1,74	1,35	0,57	0,01	0,013	0,010	0,12

Всего из материала сварных швов и основного металла было изготовлено и облучено в ВВЭР-1000 при 290 °С, флюенсе быстрых нейтронов $3 \cdot 10^{23} - 3,3 \cdot 10^{24} \text{ м}^{-2}$ ($E > 0,5 \text{ МэВ}$) по 13 партий образцов.

Склонность материалов к охрупчиванию под облучением определяли по сдвигу кривой хрупковязкого перехода (ΔT_F) при испытаниях стандартных образцов Шарпи ($10 \times 10 \times 55 \text{ мм}$) с V-образным надрезом.

Результаты и обсуждение. Результаты ударных испытаний материала сварного шва 2 в исходном состоянии и после облучения приведены на рис. 1. Кривые на нем построены с помощью функции гиперболического тангенса, параметры которой определяли методом наименьших квадратов $KCV(T) = A + B \tan g[(T - T_0)/C]$, где $KCV(T)$ — работа разрушения, Дж; T — температура испытаний, °С; A, B, C и T_0 — подгоночные параметры. При этом энергия нижней полки для всех кривых полагалась равной 4,7 Дж, откуда $B = A - 4,7 \text{ Дж}$.

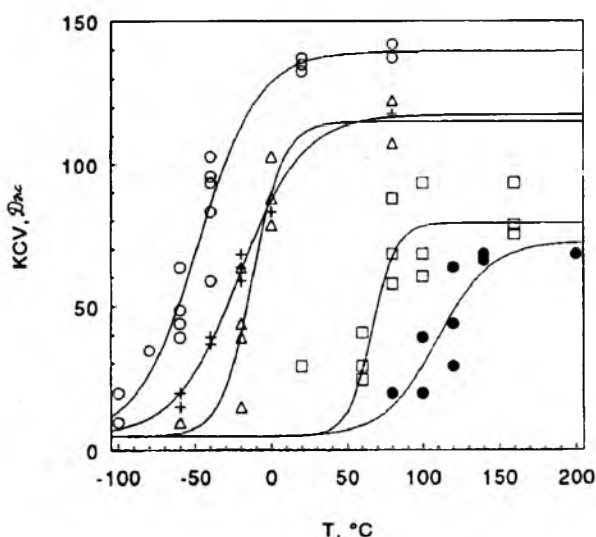


Рис. 1. Влияние облучения на ударную вязкость материала сварного шва 2: ○ — исходное состояние; +, △, □, ● — после облучения флюенсом нейтронов 3,8, 5,9, 18,4, $26,2 \cdot 10^{23} \text{ м}^{-2}$ ($E > 0,5 \text{ МэВ}$) соответственно

Как видно из рис. 1, облучение сдвигает переходную температуру в сторону более высокого значения и снижает ударную вязкость на верхней полке.

Статистический анализ результатов облучения, приведенных на рис. 2, показал, что с наибольшей достоверностью степень радиационного охрупчивания исследуемых материалов является линейной функцией флюенса

$$\Delta T_F = a + bF. \quad (1)$$

Обнаруженная зависимость ΔT_F от дозы облучения не может быть объяснена лишь в рамках модели радиационно-индуцированного дисперсионного упрочнения твердого раствора. Тем не менее исследования показали, что как для материала сварных

швов, так и для основного металла наблюдается значительный прирост предела текучести при большой дозе облучения.

Результаты испытаний на растяжение при 20 °С приведены на рис. 3. В любой точке были испытаны по крайней мере три, а в большинстве случаев четыре или пять образцов.

Как видно из рис. 3, на зависимости $\sigma_{0,2}$ и σ_b от флюенса наблюдается значительный провал на начальной стадии облучения для всех рассматриваемых материалов. Известно, что никель повышает устойчивость переохлажденного аустенита. В этой связи наблюдаемое явление может быть связано с радиационно-стимулированным понижением тетрагональности твердого раствора при выделении из него углерода.

Легко видеть, что наклон зависимости ΔT_F от флюенса (см. рис. 2) возрастает с содержанием в материале никеля. Зависимость радиационного охрупчивания от никеля была также подтверждена в работе [1]. Методом регрессионного анализа получено, что в зависимости (1) угловой коэффициент определяется концентрацией в материале Ni, Mn, P и Si: $b = 0,289 \text{ Ni} + 0,168 \text{ Mn} + 12,8 \text{ P Si}$ (2) (флюенс измеряется в единицах 10^{22} м^{-2}).

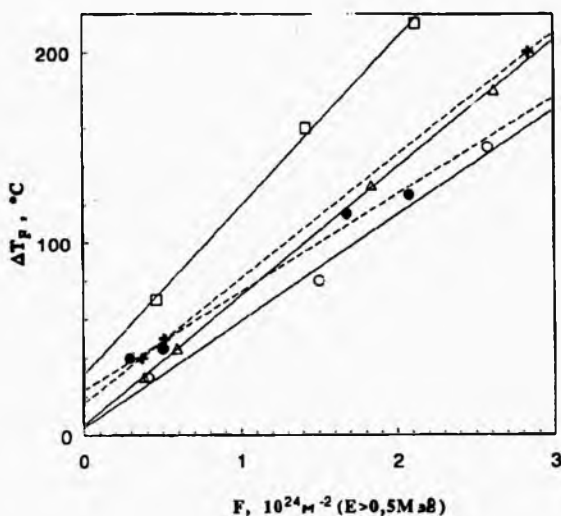
К сожалению, вариация содержания меди в материалах (см. рис. 2) не позволила выявить зависимость радиационного охрупчивания от меди.

Параметр a в уравнении (1), определенный при анализе всех 26 результатов облучения, имеет следующий вид:

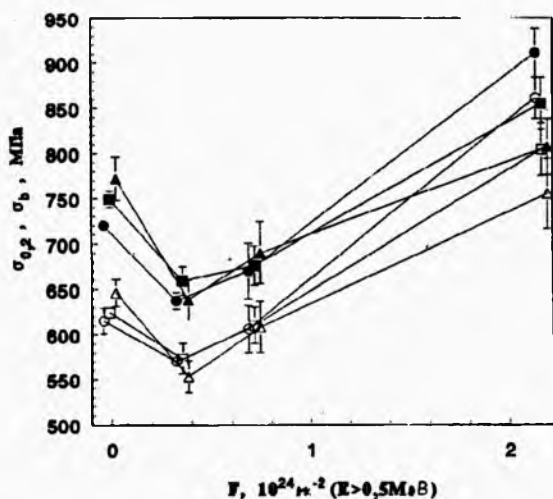
$$a = 102[\text{C}(\text{CrSi})] + 968(\text{NiSi}) [\text{C}(\text{CrSi})] - 535(\text{PSi}).$$

Свободный член a в уравнении (1) может быть объяснен действием быстро насыщающегося механизма радиационного охрупчивания. Поскольку статистический анализ показывает зависимость коэффициента a как от концентрации углерода, так и от хрома, причем эти элементы входят в нее в виде произведения, этот механизм, возможно, связан с радиационно-стимулированным карбидообразованием. Такой вывод согласуется с приведенными данными об изменении под облучением предела текучести.

Отрицательный вклад фосфора в параметр a может быть связан с сегрегацией фосфора на межфазную поверхность раздела карбид—матрица, что может привести к стабилизации карбидов подкритического размера.



Р и с. 2. Зависимость ΔT_F от флюенса быстрых нейтронов для материала сварного шва 1 (○), 2 (Δ), 3 (□) и основного металла 1 (●), 2 (+)



Р и с. 3. Зависимость предела текучести ($\sigma_{0,2}$ — светлые символы) и предела прочности (σ_b — темные символы) от флюенса быстрых нейтронов для материала сварного шва 2 (○), основного металла 1 (Δ), 2 (□)

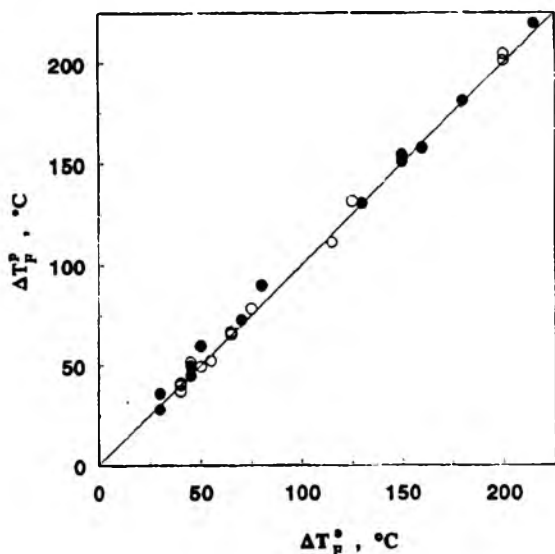


Рис. 4. Корреляция экспериментально измеренного радиационно-индуцированного сдвига переходной температуры (ΔT_F^P) и модельной оценки (1)–(3) (ΔT_F^P) для основного металла (○) и материала сварного шва (●)

алла, так и для материала сварных швов. Корреляция между оценкой по (1)–(3) и экспериментальными данными об охрупчивании материалов Cr—Ni—Mo-стали под облучением приведены на рис. 4. Видно, что представленная зависимость обеспечивает удовлетворительное совпадение с экспериментом.

Необходимо сделать несколько замечаний по поводу отсутствия зависимости коэффициентов уравнения (1) от концентрации меди. Относительная дисперсия меди

$$\sigma = \left[\frac{\sum_i^N (Cu_i / \overline{Cu}) - N}{(N - 1)} \right]^{1/2}, \text{ где } \overline{Cu} \text{ — среднее содержание меди в } N \text{ мате-}$$

риалах. Для исследованных материалов дисперсия меди (0,407) не только не меньше, но даже больше относительной дисперсии никеля (0,254), марганца (0,372), кремния (0,242) и фосфора (0,257). Поэтому можно предположить, что отсутствие меди связано с ее общим низким содержанием.

Выводы. Таким образом, радиационное охрупчивание Cr—Ni—Mo-стали в значительной степени определяется содержанием никеля. На начальной стадии облучения радиационное охрупчивание определяется хром-углеродным синергетическим эффектом. Для Cr—Ni—Mo-стали наиболее вероятна линейная зависимость радиационного охрупчивания от флюенса быстрых нейтронов. Влияния меди на радиационную чувствительность исследованных материалов не обнаружено. На зависимостях предела текучести и прочности от флюенса обнаружен провал на начальной стадии облучения при испытаниях при комнатной температуре.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Николаева А.В., Николаев Ю.А., Крюков А.М. Влияние примесей и легирующих элементов на радиационную стойкость низколегированных сталей. — ФММ, 1994, т. 77, вып. 5, с. 171—180.
2. Esmailzadeh B., Kumaz A., Garner F. The influence of silicon on void nucleation in irradiated alloys. — J. Nucl. Mater., 1985, v. 133, 134, p. 590—593.
3. Nikolaeva A.V., Nikolaev Yu.A., Kryukov A.M. The contribution of grain boundary effects to low-alloy steel irradiation embrittlement. — Ibid., 1994, v. 218, p. 85—93.