

РАЗДЕЛ ТРЕТИЙ

МАТЕРИАЛЫ РЕАКТОРОВ НА ТЕПЛОВЫХ НЕЙТРОНАХ

УДК 669.018.2

РАДИАЦИОННОЕ ОХРУПЧИВАНИЕ КОРПУСНОЙ СТАЛИ 15Х2М- ФА В УСЛОВИЯХ НАПРЯЖЕНИЯ

*И.Н.Вишневский, Э.У.Гриник, Ю.С.Гульчук, Л.И.Чирко
ИЯИ, г.Киев, Украина*

Вивчено спільний вплив опромінення та механічного навантаження на тріщиностійкість металу корпусу реактора. Наведені результати визначення реперної температури T_0 та побудови Мастер Кривої на основі експериментів, виконаних для сталі марки 15Х2МФА (основний метал для корпусу реактора типу ВВЕР-440) у трьох станах: неопроміненному, опроміненному та опроміненному в умовах напруження. Показано, що механічне навантаження, що імітує тиск теплоносія, прискорює радіаційне окрихчення, при цьому внесок його можна порівняти з внеском нейтронного опромінення.

Изучено совместное влияние облучения и механической нагрузки на трещиностойкость металла корпуса реактора. Приведены результаты определения реперной температуры T_0 и построения Мастер Кривой на основе экспериментов, выполненных для стали марки 15Х2МФА (основной материал корпуса реактора типа ВВЭР-440) в трех состояниях: необлученном, облученном и облученном в условиях напряжения. Показано, что механическая нагрузка, имитирующая давление теплоносителя, ускоряет радиационное охрупчивание, причем вклад ее сравним с вкладом нейтронного облучения.

Combined influence of neutron irradiation and mechanical load on crack resistance of reactor pressure vessel metal was studied. The results of the reference temperature T_0 determining and Master Curve construction on the basis of the experiments, performed for the steel 15Х2МФА (base metal of WVER-440 reactor vessel) in unirradiated, and irradiated stress states are presented in this paper. Mechanical load, imitating the coolant pressure, is shown to accelerate radiation embrittlement, its contribution being compared with that of the neutron irradiation.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время оценка возможного охрупчивания материалов корпуса реактора выполняется по результатам испытаний образцов-свидетелей типа Шарпи или СТ (образцов на внецентренное растяжение) с предварительно выращенной усталостной трещиной. Образцы-свидетели облучаются в герметично закрытых контейнерных сборках без нагрузки. В действительности материал корпуса реактора фактически подвергается давлению теплоносителя.

С целью определения влияния механической нагрузки в процессе облучения на скорость охрупчивания материалов корпуса реактора в 5-ом блоке Ново-Воронежской АЭС были облучены две контейнерные сборки. Они были укомплектованы образцами, вырезанными из четырех разных марок сталей, из которых изготавливались корпуса реакторов под давлением в бывшем Советском Союзе. Из каждого типа стали были изготовлены 3 типа образцов: на статическое растяжение; на ударную вязкость типа Шарпи и на трещиностойкость типа СТ. Образцы каждого сплава были расположены на 3 этажах. На каждом этаже каждой сборки были расположены по 2 образца на растяжение, по 2 Шарпи

образца и по 4 СТ образца (2 – в ненапряженном состоянии и 2 – подвергнутые механической нагрузке, имитирующей давление теплоносителя).

Таким образом, каждая сборка была укомплектована 6 напряженными и 6 ненапряженными СТ образцами с размерами $1/2T$ ($25 \times 12 \times 24$ мм), изготовленными из каждого типа корпусной стали.

Облучение проводили на таком уровне активной зоны реактора, чтобы за один год облучения набрать дозу, сравнимую с дозой, которую набирает корпус реактора напротив центра активной зоны за проектный срок эксплуатации (40 лет).

Основным свойством материала, определяющим склонность к хрупкому разрушению, является его способность сопротивляться распространению трещины. Для реакторных сталей, для которых необходимо определять сдвиг температуры хрупко-вязкого перехода в облученном состоянии по сравнению с необлученным, невозможно использовать образцы-свидетели большого размера. Использование подхода Мастер Кривой для ферритных сталей дает возможность получать в широком температурном интервале достоверные значения критического коэффициента интенсивности напряжений K_{Ic} [1] при ис-

пытании образцов малых размеров. Согласно недавно стандартизованным документам Мастер Кривая создается на основе результатов испытания малогабаритных образцов при одном значении температуры, при котором стабильный рост трещины до начала разрушения фактически отсутствует. Это дает возможность значительно упростить процедуру определения J-интеграла как сумму упругой и пластической компонент и использовать экспериментальный базовый метод нелинейной механики разрушения.

В работе приведены результаты определения реперной температуры T_0 и построения Мастер Кривой на основе экспериментов, выполненных для стали марки 15X2МФА (основной металл корпуса реактора типа ВВЭР-440) в трех состояниях: необлученном, облученном и облученном в условиях напряжения.

ИССЛЕДУЕМЫЙ МАТЕРИАЛ И ОБРАЗЦЫ

Химический состав исследуемой стали приведен в табл. 1. Усталостные трещины длиной a_0 на образцах на трещиностойкость были инициированы в соответствии с требованиями ГОСТ 25.506-85 [2].

Металл корпуса действующего реактора типа ВВЭР находится под давлением теплоносителя. В ВВЭР-1000 давление теплоносителя составляет 16 МПа, что вызывает в металле корпуса напряжения порядка 173 МПа. Для имитации этих напряжений на образцах типа СТ с помощью подгружающего винта и металлических сильфонов создавалась механическая нагрузка. Напряженные образцы были собраны в две цепи, соединенные с двумя сильфонами, этаж над этажом, рядом с ненапряженными образцами, что позволяет провести корректное сравнение данных для двух групп образцов.

Таблица 1

Химический состав корпусной стали 15X2МФА

C	Si	Mn	Ni	Cr	S	P	Cu	V	Mo
0.14	0.2	0.36	0.11	2.0	0.012	0.007	0.09	0.2	0.6

Конструкция сборок позволяла воде первого контура омывать образцы, поэтому температура облучения образцов была равна температуре теплоносителя и составляла $\sim 290^\circ\text{C}$.

Флюенсы быстрых нейтронов ($E > 0,5$ МэВ), набранные образцами исследуемой стали в экспериментальных сборках, рассчитаны РИЦ "Курчатовский институт" в рамках проекта TASIC PCP-IV [3] и приведены в табл. 2.

Таблица 2

Флюенсы быстрых ($E > 0,5$ МэВ) нейтронов для средней части образцов [2]

Марка стали	№ этажа в сборке	Флюенс нейтронов ($E > 0.5$ МэВ), нейтр./см ²	
		Сборка №1	Сборка №2
15X2МФА Основной металл	7	$9.15 \cdot 10^{19}$	$9.24 \cdot 10^{19}$
	8	$1.04 \cdot 10^{20}$	$1.05 \cdot 10^{20}$
	9	$1.16 \cdot 10^{20}$	$1.17 \cdot 10^{20}$

МЕТОДИКИ ИСПЫТАНИЙ

Испытания на статическое растяжение проводили в соответствии с ГОСТ 1497-73 [4]. В качестве экспериментального оборудования использовалась дистанционная разрывная машина, размещенная в "горячей" камере. Ошибка определения усилий ± 25 МПа. Скорость движения активного захвата составляла $1 \text{ мм} \cdot \text{мин}^{-1}$, скорость нагружения образца в области упругой деформации - $20 \text{ МПа} \cdot \text{с}^{-1}$. Образцы испытывались при комнатной температуре и при 350°C . Точность определения температуры $\pm 2^\circ\text{C}$. Максимальная ошибка определения пределов прочности и текучести составляет 5 %.

Результаты испытаний на статическое растяжение приведены в табл.3.

Испытания вязкости разрушения были выполнены в соответствии с ASTM 1921-97 [1] на испыта-

тельной машине Instron-8500 с электромеханическим приводом и предельной нагрузкой 100 кН. Машина оборудована дистанционным управлением и установлена в горячей камере Института ядерных исследований НАН Украины. Процедура измерений температуры, нагрузки и смещения отвечала требованиям [1]. Температура образцов при испытаниях поддерживалась с точностью $\pm 0,2^\circ\text{C}$. Для измерения нагрузки и раскрытия трещины использовались системы измерения, относительная погрешность которых составляла по нагрузке (P) $\pm 0,5\%$, а по смещению берегов надреза (V) $\pm 0,1\%$, что позволило определять нагрузку и смещения с высокой точностью и получать надежные диаграммы P-V.

Так как раскрытие трещины измерялось на передней поверхности образца, то согласно п.7.1

[1] вводилась поправка на смещение линии нагружения путем умножения измеренных значений на 0.73.

**Изменение под облучением механических характеристик
основного металла 15X2МФА, усредненное по образцам обеих сборок**

$T_{исп.},$ °С	Флюенс, нейтр/см ²	Предел те- кучести, МПа	Предел прочности, МПа	Общее удлинение, %	Равномерное удлинение, %
20°С	Необлуч.	333	441	17.0	7.3
	$1.08 \cdot 10^{20}$	601	670	5.1	2.2
Изменение, %		80	51	-70	-70
350°С	Необлуч.	316	387	12.3	3.6
	$1.08 \cdot 10^{20}$	449	506	5.0	2.5
Изменение, %		42	31	-59	-31

Температура, при которой были выполнены испытания на вязкость разрушения, была определена как

$$T = T_{28j} + C, \quad (1)$$

где T_{28j} – температура, при которой работа разрушения образца при ударных испытаниях составляет 28 Дж или 35 Дж·см²; $C = -28$ °С для образцов с размером 1/2Т [1]. Температура $T_{28j} = T_{35J/cm^2}$ определена по результатам ударных испытаний образцов типа Шарпи (10 × 10 × 55 mm) на маятниковом копре КМД-30Д с запасенной ударной энергией 300 Дж в интервале температур от –80 °С до +100 °С в соответствии со стандартом [5] (рис.1).

Обработка экспериментальных данных работы разрушения (KCV) проведена согласно ПНАЭ –Г-7-002-86 [6] с помощью аппроксимирующей функции гиперболического тангенса, уравнение которой имеет вид:

$$KCV = A + B \cdot th\left(\frac{T - T_0}{C}\right), \quad (2)$$

где A – среднее значение KCV между верхним (KCV_{max}) и нижним (KCV_{min}) значениями ударной вязкости; $B = (KCV_{max} - KCV_{min})/2$; T_0 – температура, соответствующая значению A ; C – эмпирическая константа. Значения параметров A , B , C и T_0 определяются обработкой экспериментальных точек методом наименьших квадратов.

Температуры хрупко-вязкого перехода определены по критериальным уровням поглощенной энергии согласно [6]. Для необлученных образцов температура хрупко-вязкого перехода (T_{k0}) составляет – 62°С, для облученных образцов $T_{kF} = -7$ °С.

На основании данных рис.1 температура испытаний $T_{28J} = T_{35J/cm^2}$ составляла для необлученных образцов –63 °С, а для облученных образцов

–11,5 °С. Таким образом, испытание на трещиностойкость согласно стандарту [1] и на основе уравнения (1) должны быть выполнены при температуре близкой к –91°С для необлученных образцов и при температуре близкой к –40°С для облученных образцов.

ПОЛУЧЕННЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ

В результате испытаний при температуре –91°С с 7-ми необлученных образцов были получены P-V диаграммы, характерные для разрушения хрупким сколом. По результатам обработки этих диаграмм были определены значения J-интеграла как сумма упругой и пластической компонент. Из полученных значений J_C для каждого отдельного образца рассчитаны величины коэффициента интенсивности напряжения (K_{Jc}). Значения K_{Jc} для необлученных образцов стали 15X2МФА приведены в табл. 4.

При испытании первого облученного образца при $T_{исп} = -40$ °С полученная P-V диаграмма и его поверхность излома свидетельствуют о значительном стабильном приросте трещины. Для этого образца значение $K_{Jc} = 129,95$ МПа√м (табл. 4). Согласно рекомендаций ЦНИИ КМ "Прометей" по оценке вязкости разрушения материалов корпусов реакторов ВВЭР-440 – ВВЭР-1000 температура испытаний понижена на 20°С, но и при $T_{исп} = -60$ °С стабильный прирост трещины также оказался большим. При $T_{исп} = -80$ °С разрушение облученных образцов происходило хрупким сколом. Поэтому все оставшиеся облученные образцы (ненапряженные и напряженные) были испытаны при $T_{исп} = -80$ °С. Результаты испытаний всех образцов приведены в табл.4. Ни одно значение K_{Jc} не подлежит цензурированию, поскольку они не превышают предельное значение $K_{Jc(limit)}$ для данной температуры испытания.

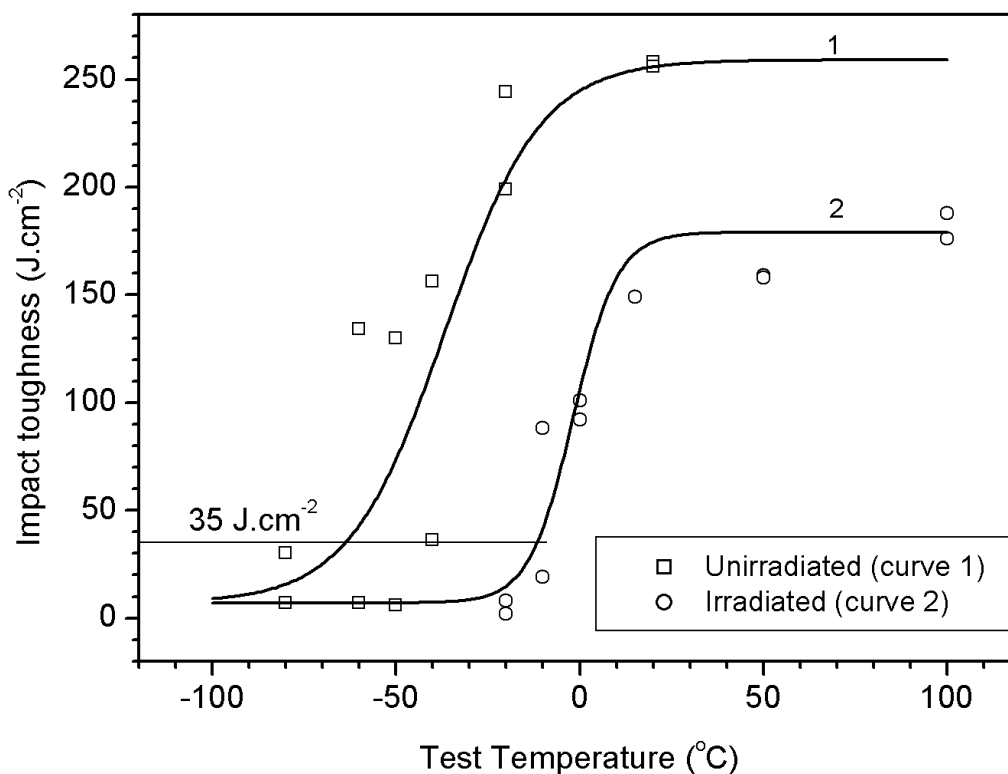


Рис. 1. Результаты ударных испытаний образцов стали 15X2MΦA

ПРИМЕНЕНИЕ ПОДХОДА МАСТЕР КРИВОЙ

Концепция Мастер Кривой используется для определения переходной кривой вязкости разрушения [7, 8]. Положение кривой $K_{Jc}(T)$ на температурной оси устанавливается путем экспериментального определения температуры T_0 , при которой среднее значение $K_{Jc(ср)}$ для исследованной партии образцов размера 1T соответствует $100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Как известно, ферритные стали очень неоднородны как за счет ориентации отдельных зерен, так и за счет неоднородностей границ зерен. Карбиды и различные неметаллические включения на границах зерен могут быть зародышами для микротрещин. Их случайное расположение по отношению к фронту трещины в материале определяет большой разброс значений вязкости разрушения при испытаниях образцов малых размеров.

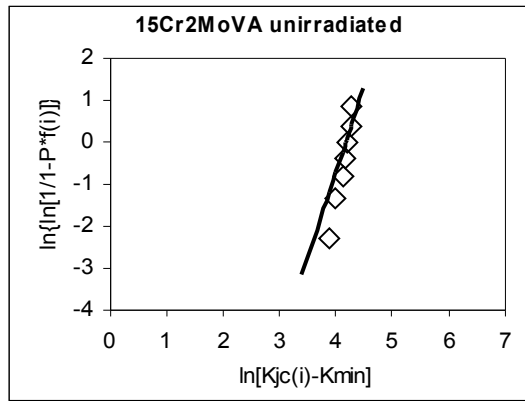
Как показал Вэйбулл [9], форма кривой для ферритных сталей с пределом текучести от 275 до 825 МПа определяется показателем экспоненты $b=4$ при

минимальном значении коэффициента интенсивности напряжений $K_{\min} = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$. Эти данные получены на основании статистического анализа огромного количества экспериментальных данных, полученных различными исследователями в разных странах на образцах разных размеров.

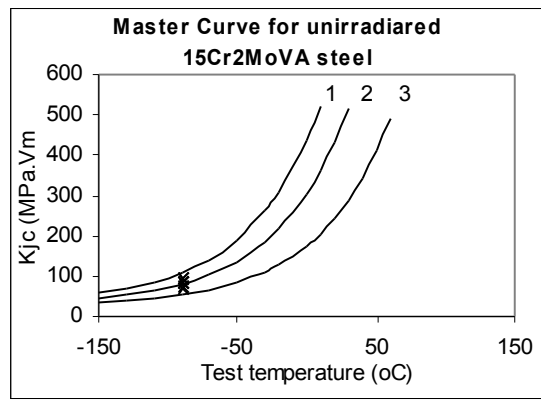
На основе полученных данных были построены Мастер Кривые и определены температуры T_0 для образцов 1T в трех состояниях (рис.2 б, г, е). С этой целью все значения K_{Jc} были пересчитаны к данным, эквивалентным для образца с толщиной 1T [1]. Для наглядного представления результатов испытаний была использована модель Вэйбулла, согласно которой вероятность разрушения (P_f) для произвольно выбранного образца из данной совокупности при или до достижения величины напряжения, соответствующей K_{Jc} , рассчитывается по формуле:

$$P_f = 1 - \exp\left\{- \left[\frac{(K_{Jc} - K_{\min})}{(K_0 - K_{\min})} \right]^4 \right\}, \quad (3)$$

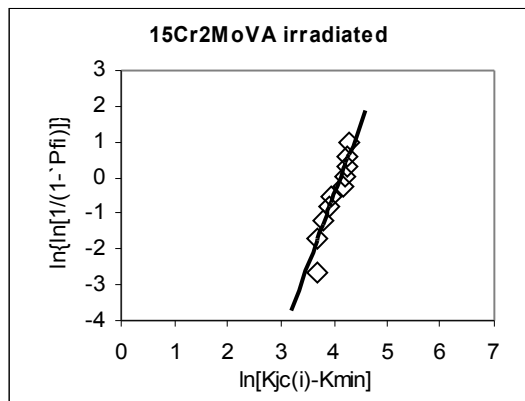
где $K_{\min} = 20 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$, K_0 – масштабный фактор.



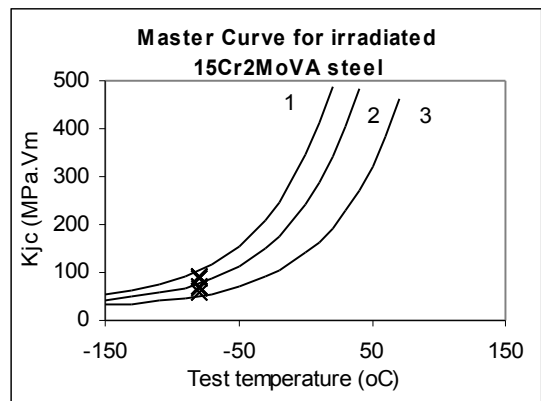
a



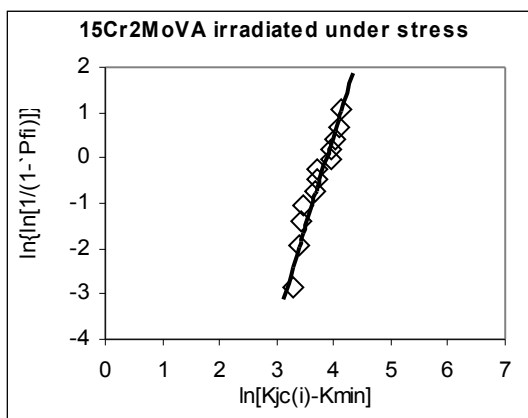
б



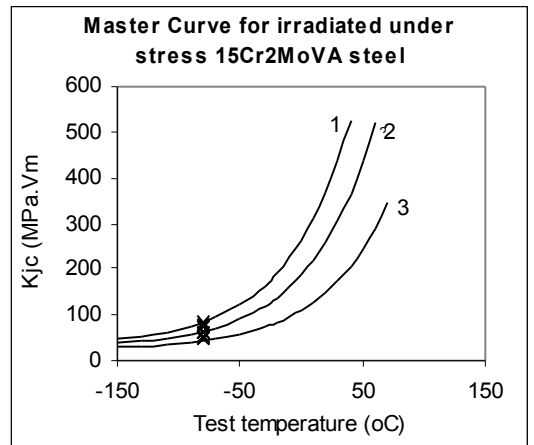
в



г



д



е

Рис.2. Графики Вэйбулла (а, в, д) и Мастер Кривые (б, г, е) для трех состояний образцов: необлученные (а, б), облученные (в, г) и облученные под напряжением (д, е). 1 и 3 – доверительные границы 95% и 5% соответственно, 2 – Мастер Кривые

Из рис.2 видно, что полученные данные K_{Jc} хорошо согласуются с фиксированной наклонной Вэйбулла и лежат в пределах $\pm 5\%$ доверительного интервала Мастер Кривой.

Среднеквадратичные отклонения T_0 , оцененные согласно [1], составляют $\pm 7^\circ\text{C}$ для необлученных

образцов и $\pm 6^\circ\text{C}$ для облученных в обоих состояниях образцов. Среднеквадратичные отклонения T_0 , оцененные согласно [1], составляют $\pm 7^\circ\text{C}$ для необлученных образцов и $\pm 6^\circ\text{C}$ для облученных в обоих состояниях образцов.

Таблица 4

Результаты испытаний на вязкость испытания и обработки их по методу Мастер Кривой

№ п/п	Состояние образцов	$T_{исп}, ^\circ C$	Длина усталостной трещины, $a_0, мм$	$J_c, кДж/м^2$	$K_{jc}(1/2T), МПа\sqrt{м}$	$K_{jc}(1T), МПа\sqrt{м}$	$K_{\sigma}, МПа\sqrt{м}$	$K_{jc(ср)}, МПа\sqrt{м}$	Реперная температура, $T_0, ^\circ C$
1	необлученное	-90	11.21	28.34	77.57	68.42	85.58	79.83	-72.1
2		-90	11.32	34.45	85.53	75.11			
3		-90	11.05	41.30	93.65	81.94			
4		-90	11.14	45.31	98.09	85.67			
5		-90	11.09	46.22	98.93	86.38			
6		-90	11.05	53.05	106.12	92.44			
7		-90	10.37	54.01	107.09	93.24			
1	облученное	-80	9.95	21.35	67.24	59.73	81.98	76.56	-58.5
2		-80	10.12	21.78	67.92	60.30			
3		-80	10.15	25.36	73.78	64.81			
4		-80	10.15	30.23	80.02	70.47			
5		-80	9.99	35.15	86.28	71.84			
6		-80	9.74	45.74	98.42	85.95			
7		-80	9.90	50.90	103.83	88.92			
8		-80	10.45	49.08	101.95	90.50			
9		-80	10.05	52.06	104.93	91.43			
10		-80	10.03	53.55	106.48	92.73			
11		-40	9.95	80.56	129.95	112.46			
12	-60	9.63	99.52	144.78	124.94				
1	облученное под нагрузкой	-80	10.65	12.53	51.51	46.50	68.60	64.35	-42.5
2		-80	10.31	14.37	55.17	49.58			
3		-80	10.18	15.05	56.45	50.66			
4		-80	10.95	16.05	58.30	52.21			
5		-80	9.97	21.61	67.64	60.07			
6		-80	10.28	21.93	68.15	60.50			
7		-80	10.27	22.65	69.26	61.42			
8		-80	9.96	31.93	82.22	72.33			
9		-80	10.50	31.93	82.24	72.34			
10		-80	10.00	35.69	86.94	76.30			
11		-80	10.48	32.83	91.83	80.41			
12		-80	10.66	42.22	94.55	82.70			

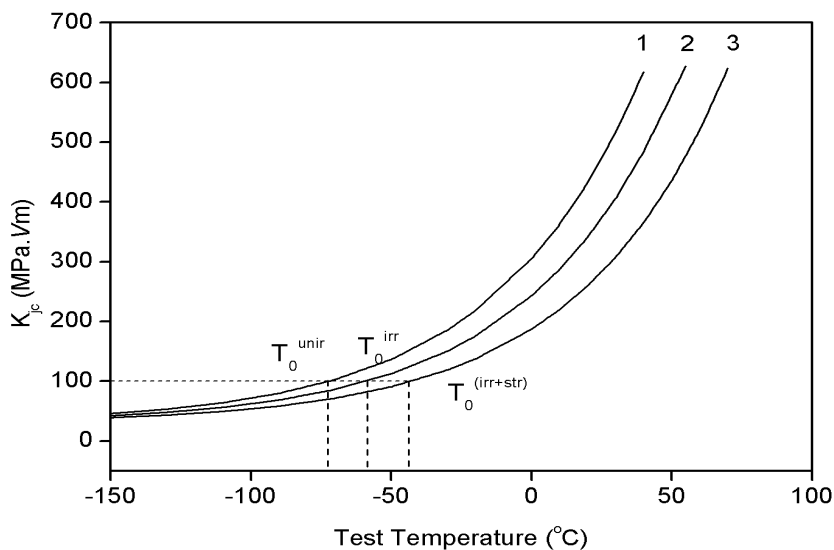


Рис.3. Мастер Кривые для трех состояний образцов: 1 – необлученные; 2 – облученные, 3 – облученные под механической нагрузкой

На рис.3 приведены Мастер кривые для трех состояний образцов стали 15X2MФА: необлученного (1), после облучения без нагружения (2) и облученного под нагрузкой (3). Для значения $K_{Ic} = 100 \text{ МПа}\sqrt{\text{м}}$ реперная температура T_0 для облученных ненапряженных образцов превышает на 13°C ее значение для необлученных образцов. Совместное влияние нейтронного облучения и напряжения приводит к повышению реперной температуры уже на 30°C .

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Исследовано влияние облучения нейтронами на процесс радиационного охрупчивания безникелевой корпусной стали марки 15X2MФА в двух состояниях: при механической нагрузке и без таковой.

Обнаружено влияние напряженного состояния вследствие механической нагрузки, имитирующей давление теплоносителя, на температуру хрупко-вязкого перехода образцов с предварительно выращенными усталостными трещинами стали. Эффект проявляется в том, что реперная температура T_0 для напряженных облученных образцов выше, чем для облученных ненапряженных образцов. Качественно влияние напряженного состояния в вершине трещины, вызванного механической нагрузкой, имитирующей давление теплоносителя, на температуру хрупко-вязкого перехода сравнимо с эффектом нейтронного облучения. С физической точки зрения это явление обусловлено более быстрым образованием радиационных дефектов под напряжением – понижение пороговой энергии образования смещенных атомов за счет механической нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. ASTM Standard E 1921-97, "Test Method for the Determination of Reference Temperature, T_0 , for Ferritic Steels in the Transition Range", *Annual Book of ASTM Standards*, vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.
2. ГОСТ 25.506-85. *Расчеты и испытания на прочность. Методы механических испытаний металлов. Определение характеристик трещиностойкости (вязкости разрушения) при статическом нагружении*. Госстандарт СССР. Москва, 1985 г., 61 с.
3. Report on the irradiation conditions in the Unit 5 of Novovoronezh NPP / PCP-4-IRLA(99)-D1, 9 p.
4. ГОСТ 1497-73 (СТ СЭВ 471-77). *Металлы. Методы испытаний на растяжение*. М.: Изд-во стандартов, 1983, 42 с.
5. ГОСТ 9454-78 [2]. (СТ СЭВ 472-77, СТ СЭВ 473-77). *Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженной, комнатной и повышенной температурах*. Из-во стандартов, 1982 г., 11 с.
6. *Нормы расчета на прочность оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок ПНАЭ Г-7-002-86*. Москва, Энергоатомиздат, 1989, 525 с.
7. Steinstra, D. I. A., "Stochastic Micromechanical Modeling of Cleavage Fracture in the Ductile-Brittle Transition Region," MM6013-90-11, Ph.D. Thesis, Texas A & M University, College Station, TX, August 1990.
8. K. Wallin "A Simple Theoretical Charpy $V-K_{Ic}$ Correlation for Irradiation Embrittlement," ASME Pressure Vessels and Piping Conference, Innovative Approaches to Irradiation Damage and Fracture Analysis, PVP-vol 170, American Society of Mechanical Engineers, New York, July 1989.
9. K. Walli. "The Scatter in K_{Ic} Results," *Engineering Fracture Mechanics*, 1984, 19(6) pp.1085–1093.