

РОЗКИД ФЛЮЕНСУ В ЗРАЗКАХ-СВІДКАХ ТА ЙОГО ВПЛИВ НА ТОЧНІСТЬ ВИЗНАЧЕННЯ КРИТИЧНОЇ ТЕМПЕРАТУРИ КРИХКОСТІ

М.Г. Голяк, Л.І. Чирко

The object of the study in this paper is the investigation of the influence of the scatter fluence on the accuracy of the critical temperature brittleness. To determine this influence we analyzed the data of test results Sharp specimens. The results of these tests determined the shift of the critical temperature of brittleness due to irradiation ΔT_F and irradiation embrittlement coefficient A_F . It is shown that the variations in the fluence F within $\pm 15\%$ the accuracy of the critical temperature brittleness is within $\pm 5\%$.

На енергоблоках АЕС України виконується штатна програма зразків-свідків, мета якої – відстеження змін механічних властивостей матеріалів корпусу реакторів в процесі всього періоду експлуатації. В результаті випробувань зразків-свідків типу Шарпі визначається залежність зсуву критичної температури крихкості ΔT_F від набраного флюенса швидких ($E \geq 0,5$ MeV) нейтронів та коефіцієнт радіаційного окрихчування A_F .

В Україні діє нормативний документ ПНАЕ Г-7-003-86, в якому зсув критичної температури крихкості ΔT_F визначається як різниця між T_{KF} (критичною температурою крихкості після опромінення), та T_{KI} (критичною температурою крихкості в початковому стані).

Коефіцієнт радіаційного окрихчування A_F визначається методом найменших квадратів з графіку залежності зсуву критичної температури крихкості ΔT_F від набраного флюенса F за законом: $\Delta T_F = A_F F^{1/3}$.

Щоб дані отриманні з результатів випробувань ЗС вважались достовірними, Типова програма контролю, розроблена ДП НАЕК «Енергоатом» та затверджена ДІЯРУ, вимагає щоб кількість зразків, які випробовуються на ударний вигин для визначення критичної температури крихкості T_{kF} , становила не менше 12 штук у групі, а накопичені флюенси зразками не відрізнялися від середнього по групі значення флюенсу більше, ніж на $\pm 10\%$.

Як показує досвід, невдала конструкція контейнерних збірок (КЗ) із зразками-свідками та розміщення КЗ вище активної зони в області високого градієнта нейтронного потоку призводить до великого розкиду флюенса в групах зразків, що часом обумовлює неможливість і відібюру ЗС за необхідною однорідністю нейтронного опромінення особливо при великих флюенсах.

Щоб вирішити цю проблему, у відділі радіаційного матеріалознавства Інституту ядерних досліджень було розроблено технологію реконструкції, яка полягає у фактичному відтворенні ЗС шляхом приварювання до половинок хвостовиків, та нанесенням концентратору. Але і цей підхід не завжди допомагає підібрати необхідну кількість зразків у випадку обмеженої їх кількості та неоднакових умов опромінення.

Даний аналіз проведено з метою відстеження залежності впливу розкиду значень флюенса на визначення ΔT_F .

Розкид по флюенсу (%)	-15 %	-10 %	-5 %	0 %	+5 %	+10 %	+15 %
Середній флюенс	$5 \cdot 10^{22}$ нейтр.м ⁻²						
Розкид F , (10^{22} нейтр.м ⁻²)	4,25	4,5	4,75	5	5,25	5,5	5,75
Розкид ΔT_F , °C	32	33	34	34	35	35	36
Розкид ΔT_F (%)	-5%	-3%	-2%	0%	2%	3%	5%
Середній флюенс	$40 \cdot 10^{22}$ нейтр.м ⁻²						

Розкид $F, 10^{22}$ нейтр.м	34,00	36,00	38,00	40	42,00	44,00	46,00
Розкид $\Delta T_F, ^\circ C$	65	66	67	68	70	71	72
Розкид ΔT_F (%)	-5%	-3%	-2%	0%	2%	3%	5%
Середній флюенс	$64 \cdot 10^{22}$ нейтр.м						
Розкид $F, (10^{22}$ нейтр.м)	51,00	54,00	57,00	60	63,00	66,00	69,00
Розкид $\Delta T_F, ^\circ C$	74	76	77	78	80	81	82
Розкид ΔT_F (%)	-5%	-3%	-2%	0%	2%	3%	5%

В таблиці представлені данні ΔT_F , які розраховані за нормативними значеннями для металу зварного шва $A_F=20^\circ C$ та $T_{KI}=0^\circ C$ для значень флюенсів, більших і менших на 10% та 15% від середнього значення по групі. З представлених даних видно, що різниця між значеннями ΔT_F для середнього значення флюенса порядку $64 \cdot 10^{22}$ нейтр/м² з розкидом $\pm 10\%$ та $\pm 15\%$ становить приблизно 2 градуси.

Наступним кроком проведено аналіз даних результатів випробувань ЗС на ударний вигин. Кожен зразок, що випробовується, це є одна точка на графіку залежності ударної в'язкості (KCV) від температури (T), за яким саме і визначається критична температура крихкості T_{KF} . Кожна група зразків дає лише одну точку на графіку залежності зсуву критичної температури крихкості (ΔT_F) від накопиченого флюенса (F).

Проаналізувавши дані випробувань ЗС для ЗАЕС-1, що мали флюенс не більше $\pm 10\%$ від середнього по групі, було попередньо визначено T_{KF} . Потім до цього графіку було додано ще два зразки з флюенсом в околі 13% від середнього значення по групі, і повторно визначено T_{KF} . Як видно з рис.1 різниця між двома температурами становить $1^\circ C$, а зсув був у напрямку більшої консервативності що є кращим варіантом.

При аналізі результатів випробувань ЗС для ХАЕС-1 було побудовано графік залежності ударної в'язкості (KCV) від T. На рис.2а зображено графік, який побудовано з використанням необхідної кількості зразків та флюенсами не більшими за $\pm 10\%$ від середнього значення по групі. Для нього було визначено критичну температуру крихкості $T_{KF} = -72^\circ C$. Додавши до тих же ЗС ще два, які мають відхилення флюенса $\pm 15\%$ від середнього і випробувані при температурі верхнього шельфу було також визначено критичну температуру крихкості $T_{KF} = -72^\circ C$ (рис.2б). Видно що T_{KF} не змінилась, тобто верхній шельф майже не чутливий до даного розкиду по флюенсу.

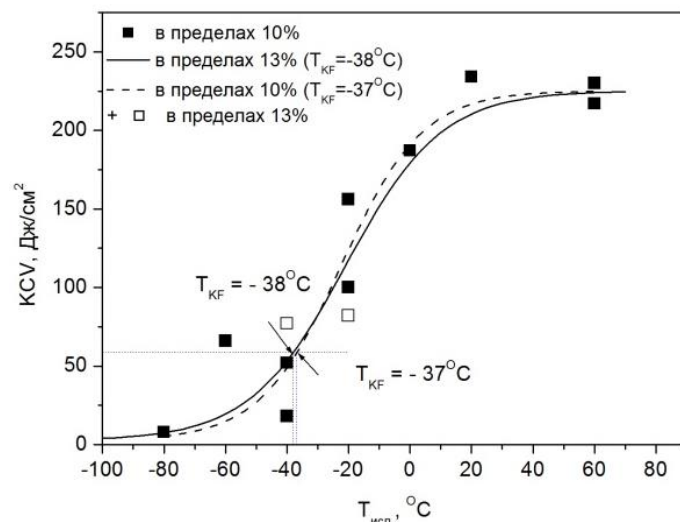
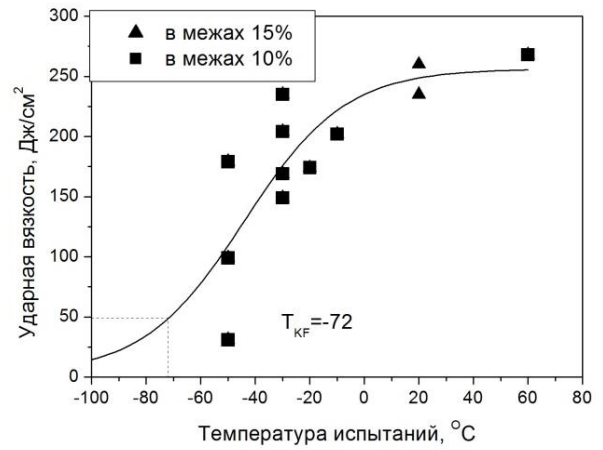
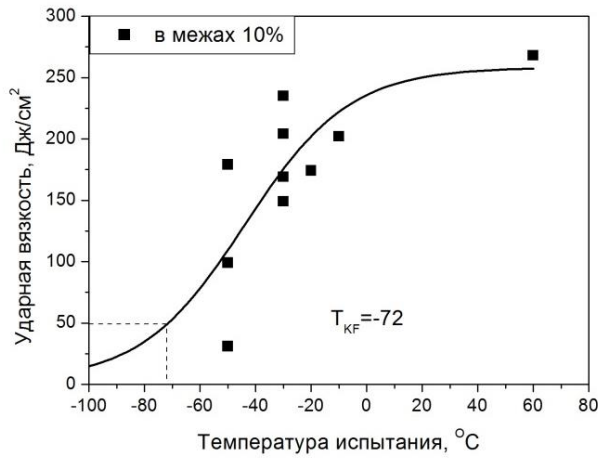


Рис.1. Графік залежності енергії удару від температури (ЗАЕС-1)



а)

б)

Рис.2а,б. Графіки залежності енергії удару від температури (ХАЕС-1)

Дуже цікавий випадок був виявлений при аналізі результатів випробувань реконструйованих ЗС металу шва №4 КР блоку №1 ЮУАЕС. Було отримано одну контейнерну збірку, в якій знаходилось 12 зразків на верхньому та 12 на нижньому поверхах. Середній флюенс зразків на верхньому поверсі менший за середній на нижньому більш ніж у 2 рази. Після випробувань було отримано 48 половинок, з яких було відібрано для реконструкції дві групи ЗС, що відповідали вимогам Типової програми. А от третю групу вже довелося вибрати таким чином, що флюенс зразків становив більше ніж $\pm 10\%$ за середній по групі. При побудові графіку для визначення T_{KF} було виявлено, що дві точки лежать за межами 95% довірчої кривої, які мають бути виключені (при тому що їх флюенс становив значення не більше за 10% від середнього). При огляді даних зразків було видно, що вони мають деякі вклучення, через що і дали такі результати (рис.3).

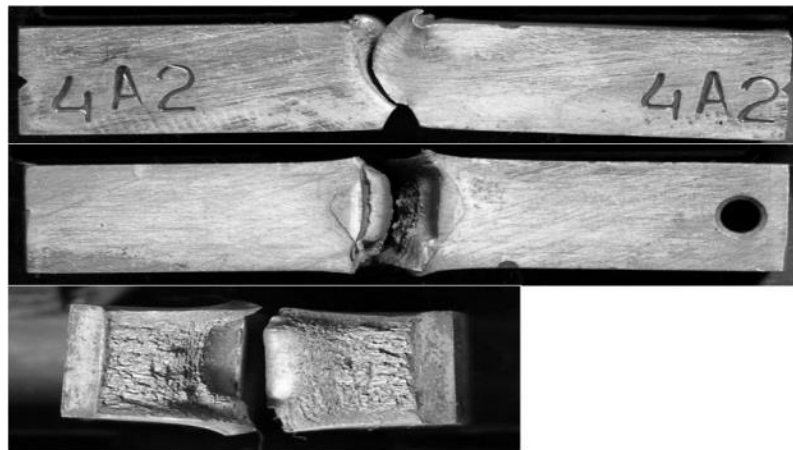


Рис.3. Зразки свідки що були забраковані

Графік було побудовано за значеннями 10-ти зразків, та визначено за ним T_{KF} яке становило $3,7^{\circ}\text{C}$. Але згідно вимог Типової програми було необхідно додати ще дві експериментальні точки. За відсутністю вибору було взято два зразки з тієї ж групи, але з флюенсом $\pm 20\%$ від середнього значення по групі. Одна точка на верхньому шельфі, а інша поблизу нижнього, так як вони мало чутливі до такого розкиду по флюенсу. При нанесенні ці точки чудово лягли на графік і лише підтвердили те значення T_{KF} (рис.4).

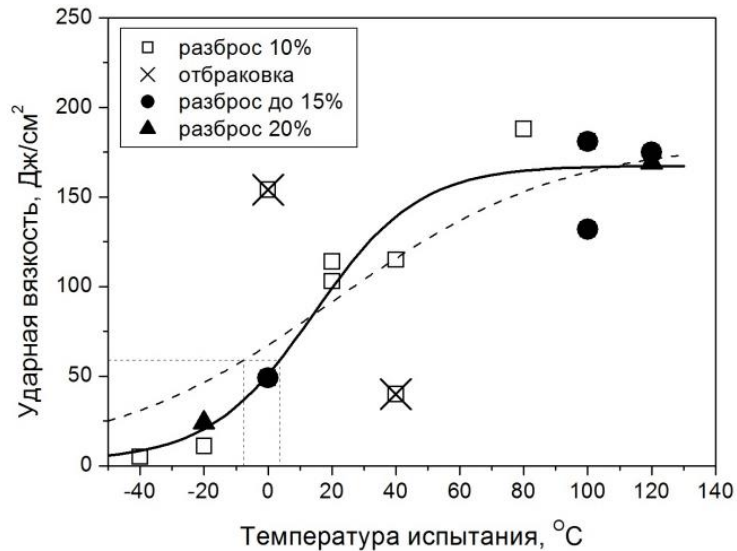


Рис.4. Графік залежності енергії удару від температури (ЮУАЕС-1)

При аналізі впливу значень розкиду флюенса на визначення A_F були проаналізовані дані випробувань зразків металу шва №3 КР блоку №1 для ЮАЕС. Для наочності було взято крайні умови, тобто коли всі точки змістити на -10% та -15% від середнього значення F по групі (рис.5). З рис. 5 видно, що навіть за самих консервативних умов різниця між $A_F(-10\%)$ та $A_F(-15\%)$ становить $0,3^\circ\text{C}$, що задовольняє вимогу Типової програми, згідно якої при обробці результатів випробувань ЗС оцінка довірчих інтервалів проводиться для вірогідності 95 %.

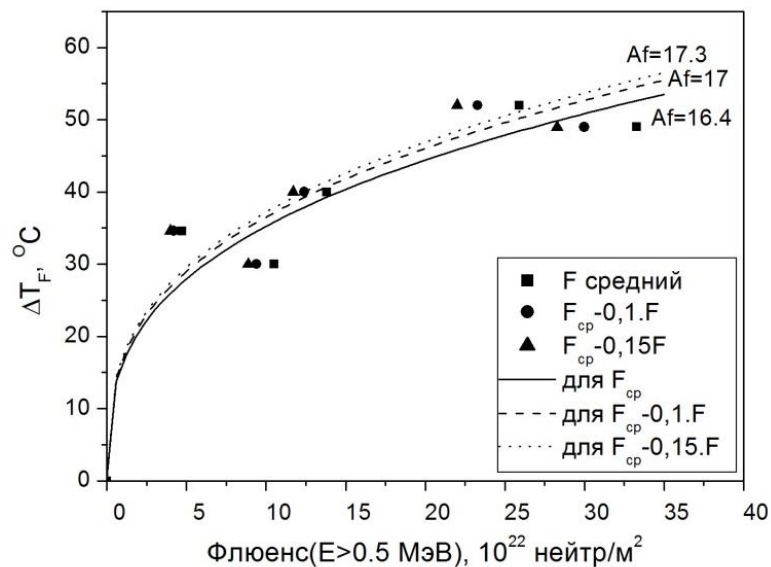


Рис.5. Графік залежності зсуву критичної температури крихкості (ΔT_F) від накопиченого флюенса (F)

Таким чином, результати проведеного аналізу показують, що при розкіді значень флюенса F в межах $\pm 15\%$ точність визначення критичної температури крихкості перебуває в межах $\pm 5\%$, що забезпечує вимогу типової програми, згідно якої при обробці результатів випробувань ЗС оцінка довірчих інтервалів проводиться для вірогідності 95 %.