ПРИЛОЖИМОСТ НА ИЗЧИСЛИТЕЛЕН МЕТОД ЗА ОПРЕДЕЛЯНЕ НА ЖИЛАВАТА СЪСТАВЯЩА НА ЛОМА НА РАДИОАКТИВНИ ОБРАЗЦИ ОТ РЕАКТОРНА СТОМАНА

СВЕТОСЛАВА ПЕТКОВА

*Институт по металознание, съоръжения и технологии
с Център по хидро- и аеродинамика „Акад. А. Балевски“,
Българска академия на науките,
бул. „Шипченски проход“ № 67, 1574 София, България,
e-mail: sesa1519@abv.bg*

Резюме. Изследвана е жилавата съставяща на лома на радиоактивни образци, изработени от реакторна стомана. Образците са изпитани на триточково ударно огъване – Шарпи изпитване. Направено е сравнение между експериментално получените резултати за стойността на жилавата съставяща на лома с кореспондиращите им изчислени стойности чрез параметри, определени от диаграмата „сила–преместване“. Изследвани са един комплект в необлъчено състояние и два комплекта облъчени образци при две различни нива на неутронния флуенс. Установено е добро съответствие между експериментално определените стойности на жилавата съставяща и тези, получени по изчислителния метод, което прави и двата метода адекватни при определяне на критичната температура.

Ключови думи: Шарпи изпитване, разрушена повърхност на образеца, жилава съставяща на лома, критична температура.

1. УВОД

Един от параметрите, чрез който се определя степента на неутронно индуцираното окрежкостяване на корпусите на енергийни реактори е температурата, при която процентната част на жилавата съставяща на лома достига 50% [1]. Тя се определя експериментално, чрез фрактографско измерване на площта на крехко разрушената централна зона на лома (КР), която има приблизително правоъгълна форма, и е добре различима, поради бляскава си повърхност, *фиг. 1*. А и С са средните размери на крехко разрушената зона. Жилавата част на лома (ЖР) представлява разликата между цялата повърхност на лома и площта на крехко разрушената част.

DOI: 10.7546/EngSci.LVI.19.03.04

Фиг. 1. Макроморфология на лом, разрушен в преходната зона на Шарпи кривата

Fig. 1. Macro-morphology of shear fracture surface in the transition area of Charpy curve

Целта на настоящата статия е да се изследва приложимостта на дадения в [2, 3, 4, 5] изчислителен метод за определяне на жилавостта на лома на радиоактивни образци. При този метод се използват параметри на S_v -диаграмата „сила–преместване“, получена при ударно триточково огъване на Шарпи пробни тела.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА ЧАСТ

Стандартни Шарпи-пробни тела от реакторна стомана 15Х2НМФАА, в необлъчено състояние и след облъчване, при две различни нива на неутронния флуенс *табл. 1*, са изпитани на триточково ударно огъване при различни температури.

TABLE 1

Неутронен флуенс върху образците	
$f1$ [n/cm ²]	$f2$ [n/cm ²]
6,0E18	19,7E18

Чрез количествен анализ на фрактографски изображения, получени върху лома на разрушените пробни тела, са определени експерименталните стойности на жилавата съставляща на лома $B\% = ((S - K) / S) * 100$, където S е площта на лома на разрушения образец, K – площта на крехко разрушената зона.

Жилавата съставляща на лома $SFA\%$ на разрушените Шарпи образци е определена също така и чрез стойностите на характеристичните сили F_{gy} – динамична граница на провлачане, F_m – максимална сила на натоварване,

F_u – сила за инициране на крехка пукнатина и F_a – сила при спиране на пукнатината, получени от диаграмата „сила–преместване“, регистрирана при Шарпи изпитване на пробното тяло [6, 7, 8, 9]. Стойността на силата F_i , при която се иницира жилава пукнатина, се определя по формулата:

$$F_i = F_{gy} + (1 - k) (F_m - F_{gy}), \quad (1)$$

където k е приблизително $\sim 0,5$.

За изчисляване на $SFA\%$ е използвана следната зависимост:

$$SFA\% = \left[1 - \frac{F_u - F_a}{F_m + (F_m - F_i)} \right] \times 100. \quad (2)$$

3. РЕЗУЛТАТИ

На *фигура 2* са сравнени температурните зависимости на жилавата съставяща на лома, определена експериментално чрез фрактографски измервания $B\%$ и получените стойности $SFA\%$ посредством предложения изчислителен метод.

За изчертаването (фитирането) на двете криви е използвана тангенс хиперболична функция, като стойностите на $B\%$ и $SFA\%$ са фиксирани за долно плато 0% и за горно плато 100% . От представените резултати се вижда, че има сравнително добро припокриване на S -кривите, описващи температурните зависимости на жилавата съставяща, получени по двата метода.

За да се провери по-точно надеждността на приложени изчислителен метод, за определяне жилавата съставяща на лома от кривите по дадената методиката в [9], са получени стойностите на критичните температури $Tk^{B50\%}$ и $Tk^{SFA50\%}$, отместването $\Delta Tk^{B50\%}$ и $\Delta Tk^{SFA50\%}$ вследствие на неутронното облъчване и грешката при тяхното определяне $\pm dT$, *табл. 2*. Приет е критериалният параметър – 50% влакнистост на лома, тъй като

TABLE 2

Основен метал	$Tk^{SFA50\%}$ [C°]	$\pm dT$ [C°]	$\Delta Tk^{SFA50\%}$ [C°]	$Tk^{B50\%}$ [C°]	$\pm dT$ [C°]	$\Delta Tk^{B50\%}$ [C°]
$f0 = 0 \text{ n/cm}^2$	-20,1	4,17	–	-21,0	3,34	–
$f1 = 6,0E18 \text{ n/cm}^2$	-10,2	1,56	9,9	-15,0	3,06	6,0
$f2 = 19,7E18 \text{ n/cm}^2$	1,6	4,05	21,7	-5,1	2,22	15,9

Фиг. 2. Сравняване на температурните зависимости на експериментално получената жилава съставляща $B\%$ и изчислените стойности $SFA\%$ при различни нива на флуенса f_0, f_1, f_2

Fig. 2. A comparison between temperature dependences of the experimentally obtained quota $B\%$ of shear fracture surface and calculated values of $SFA\%$ at different levels of fluence f_0, f_1, f_2

Фиг. 3. Корелация между експериментално определени-те стойности на жилавата съ-ставяща на лома $B\%$ и съот-ветстващите ѝ изчислени стой-ности $SFA\%$ при различни ни-ва на флуенса f_0 , f_1 , f_2

Fig. 3. A correlation between the experimentally obtained quota $B\%$ of shear fracture surface and corresponding calculated values of $SFA\%$ at different fluence levels f_0 , f_1 , f_2

той се използва при оценката на критичната температура на окрежкостяване на феритните стомани.

Забелязва се пряка зависимост на стойностите на критичните температури $Tk^{B50\%}$ и $Tk^{SFA50\%}$ от нивата на неутронното облъчване, като при по-големи стойности на неутронния флуенс се отчитат съответно по-положителни стойности на изследваната критична температура.

Грешките при определяне на стойностите на критичните температури са средно 3,3 за $Tk^{SFA50\%}$ и 2,9 за $Tk^{B50\%}$.

С цел доказване на адекватността на изчислителния метод, при определянето на стойността на жилавата съставляща на лома, е направена корелация между резултатите, получени по изчислителния и по експерименталния метод, *фиг. 3*.

Данните са фитирани към линейна функция при фиксирана нула, тъй като енергията за разрушаване в долното плато на Шарпи кривата е от порядъка на 3J, т.е. жилавата съставляща на лома е практически нула. Резултатите, получени по изчислителния метод, попадат в определеното понастоящем от някои проектостандарти 20% ниво на точност [10, 11, 12, 13].

В *таблица 3* са представени наклонът b на правите $SFA\%/B\%$, грешката на наклона, коефициентът на корелация R и относителното отклонение на изчислените стойности $SFA\%$ при $B = 50\%$ за всички флуенси.

TABLE 3

Флуенс n/cm^2	b наклон	$\pm\Delta b$	R (SFA%)	$SFA\%$ при 50%B	$\frac{(50 - SFA\%) \cdot 100}{50}$
$f0 = 0$	0,987	0,03	0,988	49,5	1,0
$f1 = 6,0E18$	0,980	0,03	0,995	48,6	3,0
$f2 = 19,7E18$	0,931	0,05	0,983	47,0	6,0
средно	0,966	0,04	0,989	48,4	3,2

Резултатите от *табл. 3* показват добра линейна зависимост на $SFA\%$ от $B\%$, с наклон близък до единица, със средно отклонение от около $\pm 0,04$. Разликата в стойностите на $B50\%$ и $SFA50\%$ е средно 3,2%.

4. ИЗВОДИ

1. Наблюдава се неутронно индуцирано отместване на критичните температури $\Delta Tk^{SFA50\%}$ и $\Delta Tk^{B50\%}$ при 50% жилавост на лома към положителните температури.

2. Отместването на критичната температура $\Delta T_k^{SFA50\%}$ нараства с увеличаване стойността на неутронния флуенс.
3. Наклонът на правите $SFA\%/B\%$ е близък до 45 градуса, а относителното отклонение на изчислените стойности при определянето на стойностите е в рамките на допустимите 20%.
4. Установено е добро съответствие между експериментално определените стойности на жилавата съставляща $B\%$ и определените по изчислителния метод стойности за $SFA\%$, което прави и двата метода адекватни в определянето ѝ.
5. Доброто съвпадение на получените резултати за стойностите на $SFA\%$ с експериментално получените такива $B\%$ дава основание да се приеме, че приложеният изчислителен метод за определяне на жилавата съставляща на лома дава адекватна оценка на влакнистостта и може да бъде успешно приложен при изследването на радиоактивни образци от реакторна стомана 15X2НМФАА.

REFERENCES

- [1] PNEE – Г-7-002-86, Standards for Strength Calculation of Equipment and Pipelines of Nuclear Power Plants, Energoatomizdat, Moscow (1986) (in Russian).
- [2] International Standard, ISO/TC 164/SC 4 (N191), Steel – Charpy V Pendulum Impact Test – Instrumented Test Method.
- [3] ASTM-23-00, Standard Test Methods for Notched Bar Impact Testing of Metallic Materials.
- [4] ASM Metals HandBook Volume 8 (Eds H. Kuhn and D. Medlin), *Mechanical Testing and Evaluation, Fracture Toughness and Fracture Mechanics, Instrumented Charpy Impact Test*, 1370–1373.
- [5] ESIS Instrumented Charpy V-Notch Standard, Proposed Standard Method for the Instrumented Charpy-V Impact Tests on Metallic Materials, Draft 10, ESIS, Jan 14 (1994).
- [6] A. FABRY, E. VAN WALLE, J. VAN DE VELDE, R. CHAOUADI, J. PUZZOLANTE AND TH. VAN RANSBEEK, *On the Use of the Instrumented Charpy V Impact Signal for Assessment of RPVS Embrittlement*, Evaluation of Material Properties by Dynamic Fracture (Ed. E. van Walle), MEP, London (1996) 59–78
- [7] A. FABRY, E. VAN WALLE, R. CHAOUADI, J. WANNIJN, A. VERSTREPEN, J. PUZZOLANTE, TH. VAN RANSBEEK, J. VAN DE VELDE AND T. PETROVA, RPV Steel Embrittlement: Damage Modeling and Micromechanics in an Engineering Perspective, Report SCK-CEN, Mol (1993).

- [8] A. FABRY, E. VAN WALLE, A. VERSTREPEN, J. PUZZOLANTE, TH. VAN RANSBEEK, E. BIEMILLER, R. CARTER AND T. PETROVA, Research to Understanding the Embrittlement Behaviour of Yankee/BR3 Surveillance Plate and Other Outlier RPV Steels, in Effect of Radiation on Materials, ASTM STP1270 (Eds D. Gelles, R. Nanstad, A. Kumar) (1995).
- [9] SV. PETKOVA AND K. KAMENOV, Comparison Analysis of Methods of Determining the Ductile Fracture Surface of Irradiated Charpy Specimens, International Conference Nondestructive Control in Modern Industry, Sofia, 03–05 February, 2015.
- [10] Proposed Standard Method for Instrumented Impact Testing of Sub-Size Charpy V-Notch Specimens of Steels, Draft 7: 12 June 1997, Prepared by the Working Party European Standards on Instrumented Charpy V-Notch Testing of Sub-Size Specimens of the European Structural Integrity Society (ESIS) TC5.
- [11] Proposed ASTM Standard Method for Instrumented Charpy V-Notch and Miniaturized Charpy V-Notch Impact Tests on Metallic Materials, Draft 6: July 1998, Prepared by ASTM Sub-Committee E28.07.08 (Miniaturized Charpy/Instrumented Testing).
- [12] Proposed Standard Method for the Instrumented Charpy V Impact Test on Metallic Materials, Draft 10, Prepared by the Working Party European Standards on Instrumented Charpy Testing of the European Structural Integrity Society (ESIS) TC5.
- [13] ISO/DIS 14556, Steel ~ Charpy V-Notch Impact Test – Instrumented Test Method, Edition: 1 (1998).

APPLICABILITY OF CALCULATION METHOD OF DETERMINING THE DUCTILE FRACTURE SURFACE OF IRRADIATED SPECIMENS FROM REACTOR STEEL

SVETOSLAVA PETKOVA

*Institute of Metal Science, Equipment and Technologies
with Hydro-and Aerodynamics Centre “Acad. A. Balevski”,
Bulgarian Academy of Sciences,
67, Shipchenski Prohod Blvd, 1574 Sofia, Bulgaria,
e-mail: sesa1519@abv.bg*

Abstract. The ductile fracture surface of irradiated specimens from reactor steel is investigated. The set of unirradiated and irradiated specimens is tested by the Charpy three point impact bending machine (Charpy test). A comparison between the experimentally obtained quota $B\%$ of shear fracture surface and corresponding values of $SFA\%$ calculated with parameters determined from “force–displacement” diagram is made. A good

agreement between experimentally determined values of shear fracture appearance $B\%$ and their corresponding calculated values $SFA\%$ is established for the three sets of specimens – one unirradiated and two irradiated, which made the calculation method quite adequate to experimental one.

Keywords: Charpy test, fractured specimen surface (FSS), shear fracture appearance (SFA), critical temperature.

Received July 17, 2019