

# СРАВНИТЕЛЕН АНАЛИЗ НА ЧИСЛОВИ МОДЕЛИ ЗА ОЦЕНКА НА НЕУТРОННО ОКРЕХКОСТЯВАНЕ НА МЕТАЛА НА КОРПУСИТЕ НА РЕАКТОРИ, ТИП ВВЕР 1000

Галя Годорова Димова,  
3321 “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, България

## 1. Увод

Работните условия на метала на корпуса на реактора се характеризират с интензивни неутронни потоци в условията на висока температура и високо налягане. При взаимодействието си с веществото неутроните могат да предадат своята енергия на атомите чрез еластични удари или да служат като източник за образуването на заредените частици. Тези процеси водят до нарушаване на правилното разположение на атомите в кристалната решетка на метала и до образуване на дефекти. При достатъчно висока енергия на неутрона, първично избитият от равновесното си положение атом може да доведе до каскада от избити атоми. Плътноста на радиационните дефекти зависи от вида на лъчението, от неговите параметри, а така също и от ядрено-физичните характеристики на материала. Образуващите се точкови дефекти – ваканции, междувъзлови атоми, внедрени атоми и др. при достатъчно високи температури могат да рекомбинират, да мигрират към обемни или повърхностни изтичания (дислокации, граници на зърната), да образуват натрупване от радиационни дефекти във вид на пори и дислокационни възли. Облъчването на метала с бързи неутрони води до образуването на микроскопични области със структурни увреждания и с висока концентрация на точкови дефекти.

Окрехкостяването при радиационно облъчване е свързано с уякчаване на материала при едновременна загуба на пластичността. Провежданите опити показват, че с помощта на облъчването границата на провлачане на стоманата може да се увеличи до два пъти. При това, границата на якост се увеличава в по-малка степен в сравнение с границата на провлачане. Сближаването на тези два параметъра при тяхното увеличаване в резултат на радиационното облъчване силно окрехкостява материала.

Разчетите на неутронното окрехкостяване са съществен елемент от методиките за оценка на остатъчния ресурс на корпусите на реакторите.

Неутронното окрехкостяване на феритните стомани се изразява в нарастване на стойността на температурата на преход от жилаво към крехко разрушаване  $T_k$  (критична температура на радиационна крехкост). Количествената оценка на неутронното окрехкостяване на метала на корпуса на реактора се изразява посредством отместването на

температурата на окрежкостяване  $\Delta T_F$ , определена при избрано критериално ниво. За степента на окрежкостяване на структурата на реакторно-корпусния метал се съди по изменението на температурата на преход от жилаво в крехко състояние  $T_K$ .

В руските нормативи [1] се регламентира критичната температура на крехкост на материалите при експлоатацията на реакторните установки:

$$T_K = T_{K_0} + \Delta T_T + \Delta T_N + \Delta T_F$$

където  $T_{K_0}$  е критичната температура на крехкост в изходно състояние,

$\Delta T_T$  е изменението на критичната температура на крехкост от температурното стареене, [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$\Delta T_N$  е изменението на критичната температура на крехкост от циклични натоварвания; [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$\Delta T_F$  е изменението на критичната температура на крехкост от неутронно облъчване, [ $^{\circ}\text{C}$ ];

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left( \frac{F}{F_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (1)$$

където  $F$  е флуенса от неутрони с енергия  $>0,5$  MeV, падащ върху корпуса, [ $\text{n/m}^2$ ],  $F_0 = 10^{22} \text{ n/m}^2$  е нормировъчен коефициент,  $A_F$  е коефициент на радиационно окрежкостяване, [ $^{\circ}\text{C}$ ].

Нарастването на  $T_K$  при облъчване с потоци от бързи неутрони се представя чрез изменението на температурата на неутронно окрежкостяване  $\Delta T_F$ . Температурата на неутронно окрежкостяване зависи основно от примесните елементи и от неутронния флуенс.

Определянето на прехода от еластично в крехко състояние се извършва на базата на изпитания на образци-свидетели. Освен експериментално, степента на окрежкостяване може да бъде оценена числено на база данните от неутронния флуенс. Числената оценка на неутронното окрежкостяване на метала на реакторния корпус се извършва съгласно норми и стандарти на страната-производител.

## 2. Състояние на проблема

Понастоящем за страните с ядрена енергетика е особено актуален въпроса за определяне и удължаване на ресурса на експлоатираните ядрени установки. Оценката на ресурса на материала на корпуса се прави по различни формули, които са залегнали в националните норми и стандарти. Тези формули отразяват модел, който е приложим за наборите от експериментални данни и резултатите да са сравними.

За българската енергетика е важен въпроса за ресурса на реакторите, тип ВВЕР 1000 – енергоблокове 5 и 6 на „АЕЦ Козлодуй“. Степента на окрежкостяването на материала на

корпуса на реактора вследствие на неутроните потоци се изчислява съгласно руските проектни изисквания ПНАЭ Г – 7 - 002-86 [1] - по формулата:

$$\Delta T_F = A_F \cdot \left( \frac{F}{F_0} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (7)$$

Експлоатационният опит и собствена база данни за деградацията на метала на реакторния корпус се натрупват вследствие на повече от двадесет години експлоатация на двата блока ВВЕР-1000. С внимание се следят изследванията на научни институти – предимно руски и украински, разполагащи с масиви от данни от експлоатацията на реакторни установки, тип ВВЕР-1000.

Наличието на никел в материалите по мнението на някои автори може да има двукраен роля – този елемент намалява корозионната чувствителност на стоманата, но от друга страна влияе отрицателно върху радиационната ѝ чувствителност и би следвало да се отчита при определяне на  $T_K$ .

На база анализи от изследванията на радиационно облъчени материали от корпуси на реактори, тип ВВЕР 1000, направени в Изследователския център “Института Курчатов”, Русия се препоръчва *“числен модел, който осигурява много по-добро оценяване на съответствието при радиационното окръжностяване на заваръчните шевове на ВВЕР, отколкото равенството (7), регламентирано в руските нормативи”*[2]:

$$\Delta T_F = 33,5 \cdot Ni^{1,35} \cdot Mn^{0,7} \cdot (0,64-Si) \cdot (F/F_0)^{1/3} \quad (8)$$

На база експлоатационния опит на реактори от типа ВВЕР 1000 в Украйна, ЦНИИТМАШ, предлага следната формула [3] :

$$\Delta T_F = \frac{[220 \cdot (Ni)^{0,5} \cdot Cu + 3400 \cdot P + 39 \cdot Ni] \left( \frac{F}{D} \right)^3}{1 + \left( \frac{F}{D} \right)^3} + 8 \quad (9)$$

където Ni, Cu и P е съдържанието на никел, мед и фосфор, [тегл. %].

F – флуенса на неутрони, [n/m<sup>2</sup>], D = 72 · 10<sup>22</sup> n/m<sup>2</sup> е нормировъчен коефициент.

В новата редакция на унифицираната процедура за оценка на целостта и остатъчния ресурс на компоненти и тръбопроводи на реакторни установки, тип ВВЕР 1000, [12] за определяне на  $\Delta T_F$  се използва числовия модел, подобен на модела [7] в ПНАЭ Г – 7 - 002-86:

$$\Delta T_F = A_F \cdot (F \cdot 10^{-22})^m \quad (10)$$

- за основен метал:  $m = 0.8$  и  $A_F = 1.45^0 C$  (11)

$$- \text{ за метал на заваръчен шев: } m = 0.8 \text{ и } A_F = \alpha_1 \exp(\alpha_2 \cdot C_{eq}),^0 C \quad (12)$$

$$C_{eq.} = C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 \cdot C_{Si}, \text{ ако } C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 \cdot C_{Si} \geq 0 \quad (13)$$

$$C_{eq.} = 0, \text{ ако } C_{Ni} + C_{Mn} - \alpha_3 \cdot C_{Si} < 0,$$

$\alpha_1 = 0,703$ ;  $\alpha_2 = 0,883$ ;  $\alpha_3 = 3.885$  и  $C_{Ni}, C_{Mn}, C_{Si}$  са съдържанието на Ni, Mn и Si респективно, [тегл. %].

Формулите (12) и (13) са валидни за следното съдържание на елементите Ni, Mn и Si:

$$1,00 \leq C_{Ni} \leq 1,90\%$$

$$0,40 \leq C_{Mn} \leq 1,10\%$$

$$0,20 \leq C_{Si} \leq 0,40\%.$$

### 3. Числени модели за определяне на $\Delta T_F$ като функция от флуенса за енергоблокове, тип ВВЕР 1000 на “АЕЦ КОЗЛОДУЙ”

В настоящата статия се разглеждат 4 числени модели за оценка на неутронното окрежкостяване на метала на корпуса на реактора, известни и приложими за реакторни установки, тип ВВЕР 1000, определени чрез формулите от (7) до (13). Важно е да се знае, че процедурите за определяне на параметрите на неутронното окрежкостяване, изложени в горната точка, трябва да бъдат прилагани, само в случай, че методът на директно определяне на параметрите на неутронното окрежкостяване на база изпитване на образци-свидетели не може да бъде използван.

Пресмятанията по моделите са направени за двата реакторни корпуса на блокове ВВЕР-1000 на „АЕЦ Козлодуй“. Използвани са данни за изчислените флуенси на корпусите на реакторите за всяка горивна кампания, [7,8], освен това се има предвид факта, че е направено верифициране на флуенса посредством задкорпусни измервания с активационни детектори [10]. Използвани са паспортни данни за състава на реакторните корпуси.

Чрез четирите числови модели са изчислени  $\Delta T_F$  за основен метал и за това заварено съединение на корпуса, който е подложено на най-силен неутронен флуенс. Оценките са направени за позициите:

- а) основен метал зад наплавката, max
- б) основен метал зад наплавката, min
- в) основен метал зад наплавката на  $\frac{1}{4}$  дълбочина, max
- г) основен метал зад наплавката на  $\frac{1}{4}$  дълбочина, min.
- д) метал на заваръчен шев зад наплавката, max
- е) метал на заваръчен шев зад наплавката, min
- ж) метал на заваръчен шев зад наплавката на  $\frac{1}{4}$  дълбочина, max
- з) метал на заваръчен шев зад наплавката на  $\frac{1}{4}$  дълбочина, min.

Пресметната е  $\Delta T_F$  по формулите от (7) до (13) и за всичките горивни кампании на блок 5 и на блок 6 на “АЕЦ Козлодуй”.

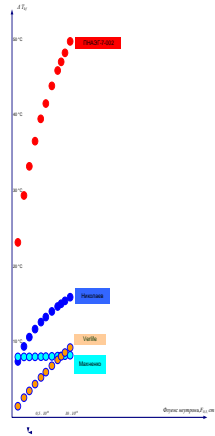
За пълнота на анализите и на основание идеята, че елементите Ni, Mn и Si влияят върху окрежкостяването на материала на заварени съединения, както и на основен метал, формулата (8) на Николаев Ю.А. е приложена не само за материала на заварените съединения, но и за основен метал, [15].

#### **4. Сравнителен анализ между числовите модели за оценка на окрежкостяването вследствие на неутронния флуенс на реакторите тип ВВЕР 1000**

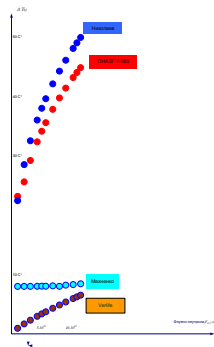
Сравнителният анализ между числовите модели за оценка на окрежкостяването вследствие на неутронния флуенс на реакторите тип ВВЕР 1000 е възможен поради еднотипност на обработваните данни.

##### ***4.1. Пресмятания и графики по четирите числови модели***

На основание данните от измерения флуенс на корпусите на реакторите са извършени пресмятания по четирите числови модели - по ПНАЭ Г – 7 - 002-86, по Николаев Ю., по Махненко В.И. и по Verlife (по формули от 7 до 13). Изготвени са множество графики и е направено тълкуване на взаимното им разположение от гледна точка на степен на окрежкостяване по отделните модели. Две от графиките на  $\Delta T_F$  като функция от флуенса (респективно от времето за експлоатация на реакторите) за четирите числови модели са показани на фигури 1 и 2. От взаимното разположение на графиките е видно, че ПНАЭГ 7-002-86 предполага най-висока степен на окрежкостяване на материалите, по-ниска е степента по Николаев Ю.А., още по-ниска е по Махненко В.И., а най-ниска степен на окрежкостяване на материалите на корпуса на реактора се предлага от Verlife. За основен метал след 9<sup>-та</sup> -10<sup>-та</sup> горивна кампания, степента на окрежкостяване по Verlife надвишава тази по Махненко В.И.



Фигура 1: Графики на зависимостите на  $\Delta T_F$  от флуенса, за основен метал, по числовите модели на ПНАЭГ 7-002-86, по Николаев Ю., по Махненко В.И. и по Verlife



Фигура 2: Графики на зависимостите на  $\Delta T_F$  от флуенса, за метала на заварено съединение, по числовите модели на ПНАЭГ 7-002-86, по Николаев Ю., по Махненко В.И., по Verlife

#### ***4.2. Окрежкостяване на метала на образците-свидетели като потвърждение на окрежкостяването на метала по числовите модели***

Върху всяка графика са нанесени позициите, съответстващи на степента на окрежкостяване на образците - свидетели. Целта е да се анализира окрежкостяването на метала на образците-свидетели като потвърждение на окрежкостяването на метала, определено по различните числовите модели. На практика за всеки набор от образци свидетели е направено:

4.2.1. На база изчисления неутронен флуенс са направени пресмятания за степента на окрежкостяване по ПНАЭГ 7-002-86 (изчислени данни за  $\Delta T_F$ )

4.2.2. На база якостните изпитвания на механичните характеристики, проведени от БАН и отразени в отчетите им, се вземат предвид експерименталните данни за  $\Delta T_F$ .

4.2.3. Най-общо относно позициите на тези точки за образците – свидетели би могло да се каже следното:

За основен метал, за малък брой кампании, точките съвпадат с кривата на окрежкостяване по Махненко В.И и по Verlife. При по-голям брой кампании точките съвпадат с кривата на окрежкостяване по Николаев Ю.А. За заваръчен шев – позициите, показателни за окрежкостяването, са в областта над кривата по Махненко В.И. и по Verlife, и под останалите две криви – по ПНАЭГ и по Николаев Ю.А. Степента на окрежкостяване на образците-свидетели за заварените съединения е:

- по-голяма, в сравнение с изчисленията по Махненко В.И. и по Verlife, и

- по-малка, в сравнение с изчисленията по Николаев Ю.А. и по ПНАЭ Г-7-002-86.

4.2.4. Резултатите от динамичните изпитвания на образците-свидетели, проведени от БАН, съгласно ПНАЭ Г-7-002-86 показват, че:

Степента на неутронното окрежкостяване за образците-свидетели е много по-малка от степента на неутронното окрежкостяване за основен метал на корпуса и за заваръчен шев на корпуса, пресметнати по формула (7) – числовия модел ПНАЭ Г – 7 - 002-86, което потвърждава консервативността на нормативните изисквания по отношение на якостните запаси.

### ***4.3. Тълкуване на графиките по числовия модел на Махненко В.И.***

Пресмятанията за степента на окрежкостяването за основен метал и за заварени съединения, основани на формулата (9) - по Махненко В.И., показват, че  $\Delta T_F$  има константна и малка стойност за основен метал. Тази тенденция се запазва за период от приблизително 2/3 от проектния срок на експлоатация на блокове тип ВВЕР-1000.

Изчисления по формулата (9) - по Махненко В.И., направени на база предполагаеми стойности за флуенса за последващите години на експлоатация, показват, че  $\Delta T_F$  ще се увеличи с нарастването на флуенса. Може уверено да се предполага, че настоящата крива на окрежкостяване по Махненко В.И. ще премине в нарастваща експонента.

### ***4.4. Тълкуване на графиките по числовия модел на Николаев Ю.А.***

Пресмятанията на  $\Delta T_F$  за заварените съединения, основани на формулата (8) потвърждават изводите, направени от Николаев Ю.А., [2], че по-високи стойности на  $\Delta T_F$  се отчитат при по-високи стойности на никел и манган и при по-ниско съдържание на силиций в заварените съединения на метала.

Видът на графиките по Николаев Ю.А. следват тези по ПНАЭГ-7-002-86, и при по-високи стойности на никел – дори ги изпреварват.

#### 4.5. Тълкуване на графиките по числовия модел на Verlife.

- Сравнение на вида на графиките по ПНАЭГ – 7 - 002-86 и по Verlife за окрежкостяване на основен метал: Степента на окрежкостяване по Verlife е много по-малка, отколкото за ПНАЭГ-7-002-86 ;

- Сравнение на вида на графиките по ПНАЭГ – 7 - 002-86 и по Verlife за окрежкостяване на метала на заваръчен шев: Степента на окрежкостяване по Verlife е много по-малка, отколкото за ПНАЭГ.

### 5. Изводи

5.1. Формулата (7), по ПНАЭГ-7-002-86 : 
$$\Delta T_F = A_F \cdot \left( \frac{F}{F_0} \right)^{\frac{1}{3}},$$

осигурява наблюдение и контролиране на ресурса по отношение на проектните изисквания за темповете на неутронно окрежкостяване. Оценките по формула (7) дават най-високи стойности за  $\Delta T_F$  и значително надхвърлящи стойностите за  $\Delta T_F$ , получени от образците-свидетели.

5.2. Формула (8), по Николаев Ю.А.: 
$$\Delta T_F = 33,5 \cdot Ni^{1,35} \cdot Mn^{0,7} \cdot (0,64-Si) \cdot (F/F_0)^{1/3}$$

дава оценка за  $\Delta T_F$  за заварени съединения, по-малка от оценката, изпълнена по формула (7). За графично изобразените зависимости  $\Delta T_F = f(F)$  в три от четири графики по реални данни се наблюдава съвпадение (или близко разположение) на окрежкостяването като функция от флуенса по числовия модел на формула (8), и за образците-свидетели.

5.3. Формулата (9), по Махненко В.И. : 
$$\Delta T_F = \frac{[220 \cdot (Ni)^{0,5} \cdot Cu + 3400 \cdot P + 39 \cdot Ni] \left( \frac{F}{D} \right)^3}{1 + \left( \frac{F}{D} \right)^3} + 8$$

дава оценка за  $\Delta T_F$ , която е с най-малка стойност в сравнение с формули (7) и (8). За графично изобразените зависимости  $\Delta T_F = f(F)$  в една от четири графики по реални данни се



наблюдава съвпадение (или близко разположение) между позициите от оценката за  $\Delta T_F$  по числовия модел на формула (9) и по образците-свидетели.

#### **5.4. Формулите от (10) до (13) по Verlife**

Формулите от (10) до (13) по Verlife дава оценка за  $\Delta T_F$ , която е с най-малка стойност в сравнение с оценка за  $\Delta T_F$ , пресметната по останалите три числови модели.

#### **5.5. Окрежкостяване на метала на образците-свидетели**

От графично изобразените зависимости  $\Delta T_F = f(F)$  по четирите числови модели и внесените в графиките позиции, съответстващи на окрежкостяването на образците-свидетели, се наблюдава:

- *за основен метал*: За един от двата реакторни корпуса при малък флуенс окрежкостяването на образците-свидетели съвпада с това по числовите модели на Махненко В.И. и на Verlife. При по-голям флуенс (натрупан до към пета горивна кампания) окрежкостяването на образците-свидетели съвпада с това по числовия модел на Николаев Ю.А. За другия от двата реакторни корпуса окрежкостяването на образците-свидетели надхвърля това, определено по числовите модели на Николаев Ю.А., Махненко В.И. и Verlife.

- *за метала на заварено съединение*: Окрежкостяването на образците-свидетели надхвърля това, определено по числовите модели на Николаев Ю.А., Махненко В.И. и Verlife.

Във всички разглеждани случаи окрежкостяването на материалите на образците-свидетели е по-ниско от това, определено по числовия модел на ПНАЭ Г – 7 - 002-86.

## **6. Литература**

1. ПНАЭ Г – 7 - 002-86 – Правила и норми в атомной энергетике. Норми расчета на прочность оборудования и трубопроводов АЭС.
2. Nikolaev Yuri A. – Radiation embrittlement of VVER-1000 RPV steels
3. Махненко В.И., Касаткин О.Г. – Изследване на кинетиката на деградация на свойствата на заварените съединения и разработване на модели за оценка на остатъчния ресурс за безопасна работа на заварени корпуси на енергийни реактори от типа ВВЕР, експлоатирани в Украйна.
4. Brumovsky Milan; Steele L.E. - IAEA International studies on irradiation embrittlement of reactor pressure vessel steels;
5. Отчет на “АЕЦ Козлодуй” - Пресмятане на неутронния флуенс в корпуса на реактора на V блок на “АЕЦ Козлодуй” след XII кампания; индекс 06.35.ОБ.УС.НФХ.12-50/0, 2006 г.
6. Паспорт на корпус на реактор, тип ВВЕР 1000, индекс 1152.02.70.00 ПС
7. Обобщен отчет, изд. БАН, Института по металознание. “Определяне на критичната температура на крехкост на корпуса на реактора на блок 5 на “АЕЦ Козлодуй” след изпитване на първи комплект облъчени образци-свидетели”; февруари 1998 г.

8. Отчет на “АЕЦ Козлодуй” - Пресмятане на неутронния флуенс в корпуса на реактора на VI блок на “АЕЦ Козлодуй” след XI кампания; индекс 06.36.ОБ.УС.НФХ.11-60/0, 2006 г.
9. Отчет на БАН, Института по металознание. Определяне механичните характеристики и структурното състояние на втори комплект облъчени образци-свидетели от Пети блок на “АЕЦ Козлодуй”; май 1998 г.
10. Отчет на ИЯИЯЕ, БАН. Валидиране на неутронния флуенс на корпуса на 6 блок посредством задкорпусни измервания на базата на активационни детектори. Облъчени през 9-11 кампания”, юли 2007.
11. Пукнатиноустойчивост на металите при статично натоварване; проф.д.т.н. Младен Георгиев, 2005 г.
12. Unified procedure for integrity and lifetime assessment of components and piping in WWER NPPs during operation “Verlife”, IEAE, 2010; Project RER 4030
13. Анализ охрупчвания материалов корпусов реакторов ВВЭР-1000 в процессе эксплуатации, Б.З.Марголин, В.А.Николаев, Е.Б.Юрченко, Ю.А.Николаев, Д.Ю.Ерак, А.В.Николаева, Вопросы материаловедения, 2009.
14. Прогнозирование расчетной температурной зависимости вязкости разрушения материалов корпусов реакторов на основе результатов испытаний образцов-свидетелей, Б.З.Марголин, В.Н.Фоменко, А.Г.Гуленко, В.А.Швецова, В.А.Николаев, А.М.Морозов, А.А.Вакуленко, В.А.Пиминов, Н.А.Шульган, Вопросы материаловедения, 2009.
15. Сравнителен анализ на числови модели за оценка на неутронното окрежкостяване на метала на корпусите на реактори, тип ВВЕР 1000, Г.Т.Димова, Научни известия на НТСМ, Дни на безразрушителния контрол 2008, XXV Национална конференция с международно участие, 2008.