

УПРАВЛЕНИЕ НА РЕСУРСА НА БЛОКОВЕ, ТИП ВВЕР 1000 В АЕЦ “КОЗЛОДУЙ”. АНАЛИЗ НА КРЕХКО РАЗРУШАВАНЕ НА ЗАВАРЕНИ СЪЕДИНЕНИЯ НА ПАРОГЕНЕРАТОРИ, ТИП ПГВ 1000М

Физ. Димова Г.Т. ¹

¹ОКС-ИЦ ДиК, “АЕЦ Козлодуй” ЕАД, Козлодуй, България

e-mail адреси на авторите: gdimova@npp.bg

Абстракт: Целта на настоящия доклад е да представи анализ на крехко разрушаване на заварените съединения на парогенераторите, тип ПГВ 1000М, на блокове 5 и 6 в АЕЦ “Козлодуй”. Темата на доклада произтича от дейности по управление на ресурса на съоръженията, както и от проекта за продължаване сроковете на експлоатация (ПСЕ) на блоковете. Основен метод за обосноваване възможността за продължаване на сроковете на експлоатация на реакторните установки е якостния анализ на отделните съоръжения. След близо 30 години експлоатация на парогенераторите, тип ПГВ 1000М, се установяват критични зони на оборудването - места с термо-хидравлични натоварвания, около и над допустимите. Анализите се базират на данни за критичните зони, напреженията в тях и постулираните нецялостности в метала. В настоящия доклад се разглежда анализ на крехко разрушаване, изпълнен за заварените съединения 111/z на щуцери Ду 1200 към колекторите на парогенераторите по първи контур. Целта на изследването е да се оцени състоянието на метала на обекта. Резултатите са важни за оценка на работоспособността на конструкцията, управление на ресурса и за решение за продължаване на срока на експлоатация на парогенераторите, тип ПГВ 1000М.

KEY WORDS: Парогенератор, крехко разрушаване, анализи.

1. Въведение

Целта на настоящия доклад е да представи анализ на крехко разрушаване на заварените съединения на щуцери Ду 1200 на парогенератори, тип ПГВ 1000М, на блокове 5 и 6 в АЕЦ “Козлодуй”. Темата на доклада произтича от дейности по управление на ресурса на съоръженията и от проекта за продължаване срока на експлоатация (ПСЕ) на блоковете. През първия етап от ПСЕ беше извършена комплексна оценка на актуалното физическо състояние на съоръженията, основана на данни от експлоатацията, ремонта, дефектите, отказите и оценената ефикасност на методите на безразрушителен контрол спрямо механизмите на деградация на механични свойства. През втория етап от ПСЕ са извършени якостни анализи на съоръжения за 5 блок, изготвени са заключения за техническото състояние; предстои изпълнението на тези дейности за съоръженията на 6 блок.

Основен метод за обосноваване възможността за продължаване на срока на експлоатация на реакторните установки е якостния анализ. При изпълнение на анализите, освен параметрите на термо-хидравличното натоварване в различните експлоатационни режими, трябва да се знаят характеристиките на материалите, определящи съпротивлението им на деформиране и на разрушаване, и натоварванията, обусловени от технологията на изготвянето. При прогнозиране на свойствата на материалите за бъдещ период на експлоатация, трябва да се знаят параметрите на натоварващите фактори и кинетиката на деградация на свойствата на материалите. Успоредно с това, по презумпция, в якостните анализи, изпълнявани при обосноваване на допълнителен срок на експлоатация, се ползват редица от специални характеристики на съпротивление на материалите на разрушаване, например - за метала на антикорозионната наплавка. Тези характеристики се определят не за всеки конкретен случай, а са резултат от специални изследвания и тяхното обобщаване се използва при анализите. След близо 30 години експлоатация на парогенераторите, тип ПГВ 1000М, се установяват критични зони на оборудването - места с термо-хидравлични натоварвания, около и над допустимите. Напреженията и евентуалните нецялостности в критичните зони водят до опасност от крехко разрушаване на метала. Необходимо е да се направи анализ по механика на разрушаване на обекта, с оглед на безопасната експлоатация на ядреното съоръжение за срока на ПСЕ.

В настоящия доклад се представя анализ на крехко разрушаване, изпълнен за заварените съединения 111/z на щуцери Ду 1200 към колекторите по първи контур на парогенераторите. Целта на изследването е да се оцени състоянието на метала на обекта. Резултатите са важни за оценка на работоспособността на конструкцията, за управление на ресурса и за решение за ПСЕ на парогенераторите, тип ПГВ 1000М на АЕЦ “Козлодуй”.

2. Методология

2.1. Използвани термини и съкращения

a, c – размерите на полуосите на нецялостност, [mm];

K_I - коефициент на интензивност на нормалните (мода I т.е. отварящи) напрежения във върха на дефекта, КИН;

K_{IC} - критична стойност на КИН;

$\Delta K = K_{\max} - K_{\min}$ - размах на КИН;

$R = \frac{K_{\min}}{K_{\max}}$ - коефициент на асиметрия R;

N – брой цикли на натоварване;

m – характеристика на материала по закона на Парис;

h – дължина на зоната, в границите на която съставляващата на огъващите напрежения съхранява положителната си стойност;

σ_p - средна съставляваща на напреженията на опън, [MPa];

σ_q - средна съставляваща на напреженията на огъване, [MPa];

M – момент на силата, M_p - на опън; M_q – на огъване;

η - коефициент, отчитащ концентрацията на напреженията;

S – Дебелина на стената;

AC - Аварийни ситуации и въздействия от максимално разчетно и проектно земетресение;

ГЦТ - Главни циркуляционни тръбопроводи;

Ду – Диаметър условен;

КЕМ – Крайно-елементен модел; 2D/3D – дву-/три-мерно (моделиране);

НДС – Напрегнато деформационно състояние;

НУЕ - Нормални условия за експлоатация;

ННУЕ - Нарушение на нормалните условия за експлоатация;

ПГ – Парогенератор;

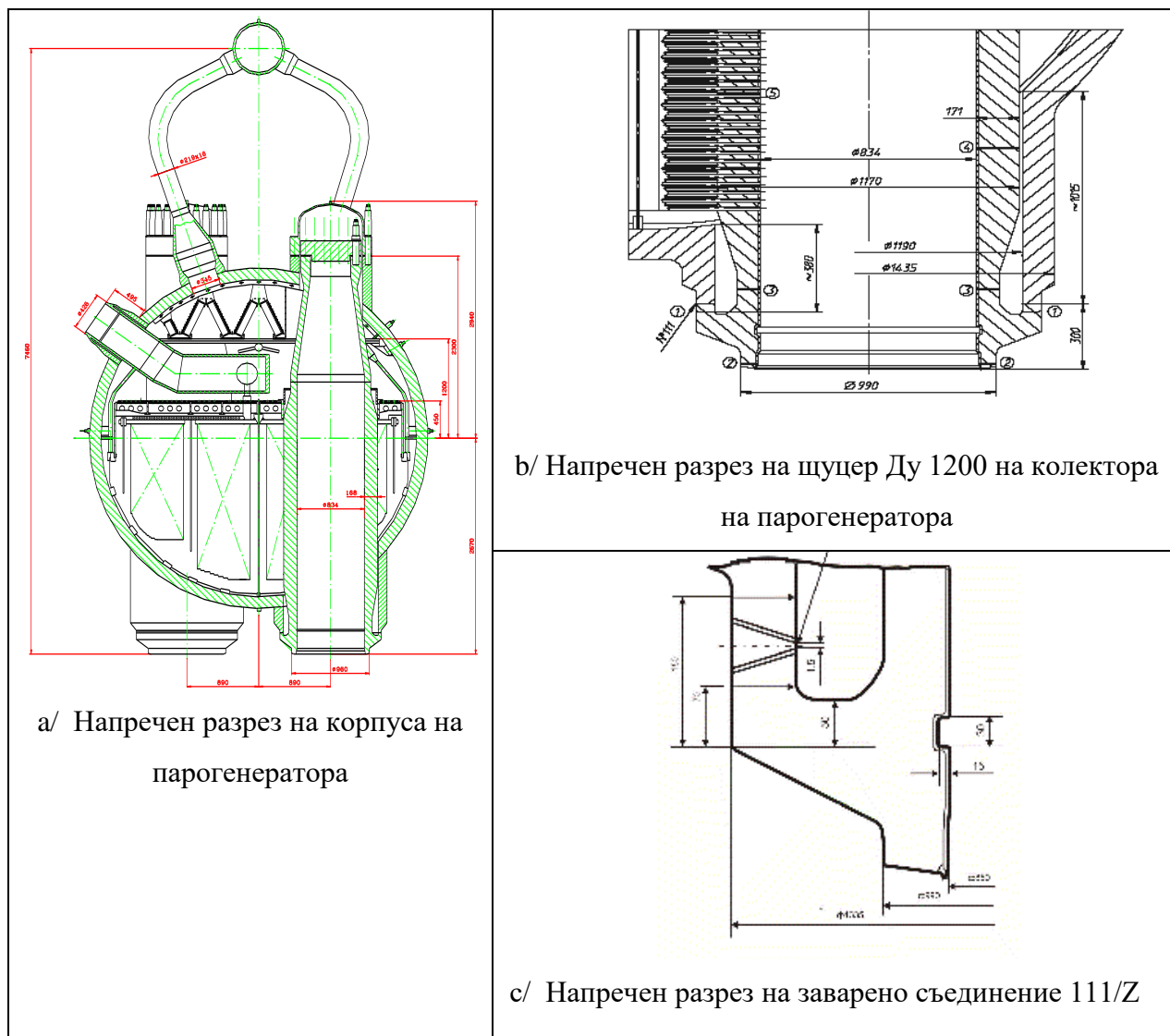
ПСЕ – Продължаване срока на експлоатация;

ХИ - Хидравлични изпитания.

2.2. Обект на изследването

Парогенераторите са предназначени за отвеждане на топлината от топлоносителя и за генериране на суха наситена пара под налягане 64 ± 2 кгс/см². Парогенераторите са компоненти, класифицирани като част от системите за безопасна експлоатация на реакторната установка. На Фигура 1 е показан напречен разрез на корпус на парогенератор,

модел ПГВ 1000М, на щуцера Ду 1200 на колектора на парогенератора и на завареното съединение 111/z.



Фиг. 1 Парогенератор модел ПГВ 1000М.

Колекторите са вертикални съдове, присъединени в долната си част към главните циркуляционни тръбопроводи ГЦТ Ду 850; като чрез нисковъглеродна наплавка са заварени към щуцерите Ду 1200 на корпуса. От вътрешната страна на колекторите има двуслойна антикорозионна наплавка. Детайлите са изработени от ферито-перлитна стомана 10ГН2МФА за щуцера Ду 1200 и за колектора. Обекти на изследването са заварените съединения 111/z на щуцери Ду 1200 към колекторите по първи контур на парогенераторите. Коренът на заварените съединения 111/z е изпълнен със заваръчна тел Св.08ГСМТ, а останалата част на заварените съединения са изпълнени с електроди УОНИ 13/55 за ръчно дъгово заваряване и с тел Св.08Г2С за аргонно дъгово заваряване. Известни са химичния състав и механичните свойства на материалите, на стадий изготвяне на материалите.

2.3. Критерии за оценка на техническото състояние и на ресурсни характеристики

Критериите за оценка на техническото състояние се основават на механизмите на деградация на механични свойства, които са дефинирани в отчета от комплексното обследване на състоянието на оборудването, [1]. В отчета са определени механизмите на деградация на механични свойства - корозия (корозионна умора, корозионно напукване под напрежение, локална корозия, корозионно-ерозийно износване), умора, термично стареене (не е характерен, но е потенциален механизъм). Критериите за оценка са: 1) съответствие на механичните свойства на метала с нормативни (или общоприети) изисквания; 2) оценка на съпротивлението на умора и 3) оценка на съпротивлението на крехко разрушаване. Оценка следва да са валидни за бъдещ период на експлоатация на съоръжението от 30 години, т.е. пресмятанията да обхващат допълнителен брой цикли на натоварване за ПСЕ. Настоящото изследване обхваща оценка по критерий съпротивление на крехко разрушаване.

2.4. Входни данни

Входните данни за изследванията представляват тази информация, която има стойност за пресмятане на натоварванията и за оценяване на съпротивлението на метала. Входните данни включват чертежите и схемите за контрол на обекта, материалите и техните якостни характеристики, действащите сили на натоварванията, формирани от налягането и температурата на флуида, данни за постулирани нецялостности (местоположение, вид, размери, др.), данни за отработени цикли в различните режими при НУЕ, ННУЕ и АС.

2.5. Оценяване изменението на механични свойства

Прави се сравнителен анализ на стойностите на механичните свойства, указани в паспорта, спрямо стойностите по нормативни изисквания [2,3]. Прогнозирането на механичните свойства за бъдещ период на експлоатация от 30 години се изпълнява на основание лабораторни изследвания на контролни проби, изходните (паспортни) данни на парогенератора и резултатите от контрол на твърдост.

2.6. Пресмятания на температурни и напреженови полета

По принцип, неустойчиво състояние на компонент с дефект настъпва най-често при аварийни режими на работа на блока. Обаче, от друга страна, нарастването на дефектите става вследствие на цикличното натоварване под въздействието на различни по произход механични и термични товари, възникващи в ПГ при експлоатацията на енергоблока при всички режими на работа. Структурните пресмятания обхващат разчетните режими на работа на съоръженията – НУЕ, ННУЕ и ХИ. Оценени са напреженията, предизвикани от съвместното действие на топлоносителя и огъващия момент, причинени от: 1) външно налягане от флуида; 2) остатъчни напрежения по дебелината на заварените съединения, 3) напрежения от сили на огъване, 4) напрежения, породени от температурните разлики и от

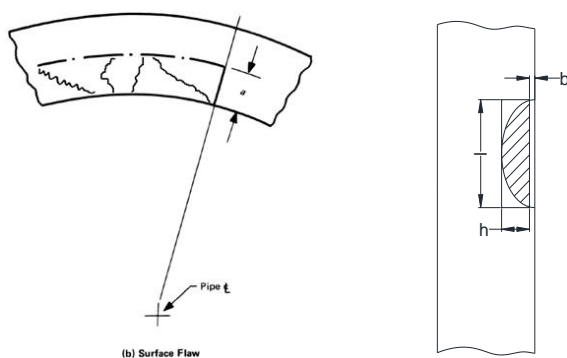
разликите в коефициентите на термично разширение на метала; 5) напрежения, породени от колебания в налягането и температурата.

На мястото около завареното съединение 111/z има характерно геометрично образуване, прилично на джоб. Тази геометрична особеност, съвместно с действащите натоварвания формира зони на напрежения в метала. Оценява се НДС при въздействието на местни мембранни напрежения, местни огъващи напрежения; общи температурни напрежения; напрежения от компенсация; местни температурни; местни напрежения в зоната на концентрация. Резултатите показват, че най-голямо влияние за развитието на дефект оказва налягането във втори контур (в корпуса на ПГ), което предизвиква разпъващи напрежения в областта на “джоба”.

Пресмятанията се правят с помощта на компютърно моделиране на изследвания обект, на който се построяват 3D крайно-елементни модели (КЕМ). Първият етап от структурните пресмятания е да се стартират топлопреносни симулации на изчислителните преходни процеси върху построените модели, чрез симулационни програми, работещи по метода КЕМ. Получават се температурните разпределения на изследвания елемент за различни представителни моменти от времето на протичане на транзиента. Следващият (втори) етап е получаване на полетата на напреженията (или НДС) вследствие на механичните товари (вътрешно налягане, сили и моменти) и тези от термичните такива. Посредством анализ на резултатите от пресмятанията се определят най-натоварените зони на изследвания обект.

2.7. Анализ по механика на разрушаването

В местата на НДС се оценява развитието на постулиран дефект. Дефектите се схематизират във вид на елипси или полуелипси с полуоси a и c , [4], както е показано на Фигура 2.



Фиг. 2 Схематизация на вътрешни (елиптични) и на (условно) повърхностни (полуелиптични) пукнатини.

Пресмятането на K_I е по формулата, [5] :

$$K_I = \frac{\eta \cdot (\sigma_p \cdot M_p + \sigma_q \cdot M_q) \sqrt{\frac{\pi \cdot a}{10^3}}}{\sqrt{1 + 4.6(a/2c)^{1.65}}} \quad (1)$$

където:

$$M_p = 1 + 0.12 \left(1 - \frac{a}{c} \right) \quad (2)$$

$$M_q = 1 - 0.64 \cdot \frac{a}{h} \quad (3)$$

Най-голямата стойност на K_{IC} се изчислява по формулата:

$$[K_{IC}] = 0.7 \cdot \sigma_{0.2}^{\pm} \cdot \sqrt{S} \quad (4)$$

Допустимите стойности на $[K_I]_i$ зависят от приведената температура $(T - T_k)$ и от разглеждания режим, като за стомана 10ГН2МФА и нейните заварени съединения тази зависимост се изразява чрез:

$$K_{IC}(T - T_k) = 23 + 48 \cdot \exp(0.019(T - T_k)) \quad (5)$$

Нарастването на дефектите вследствие на циклично натоварване в процеса на експлоатация се разглежда по модела [4]:

$$\frac{da}{dN} = C_0 \cdot \left(\frac{\Delta K}{\sqrt{1-R}} \right)^m \quad (6)$$

2.8. Критерий за оценка на съпротивление на крехко разрушаване

Съпротивлението на обекта на крехко разрушаване е осигурено, ако е изпълнен критерия:

$$K_I \leq [K_I]_i, \quad (7)$$

$i = 1$ – за НУЕ;
 $i = 2$ – за ХИ и ННУЕ;
 $i = 3$ – за АС.

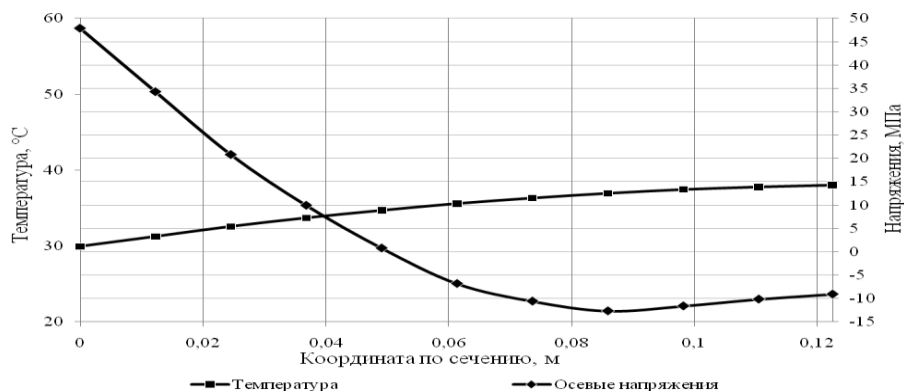
3. Резултати

3.1. Анализ на разчетните режими

Анализът на граничните условия, температурните полета и НДС показва [6], че в режими ННУЕ и ХИ максималните напрежения се достигат именно при провеждане на хидравлични изпитания, като следствие от високото налягане ($P_1 = 24,5$ МПа, $P_2 = 10,8$ МПа). В аварийни ситуации максималните напрежения в елементите на ПГ възникват при температури над 100 °С. При понижаване на температурата на метала на стената, нивото на напрежението в разчетните възли е малко, тъй като няма налягане в парогенератора и произтича неговото естествено охлаждане. Изхождайки от тези съображения, стойностите на коефициента на интензивност на напреженията K_I ще бъдат много по-ниски от максимално допустимите. При работа в режим НУЕ най-опасна ситуация от гледна точка на съпротивление на крехко разрушаване има в режим “Запълване на ПГ”, поради бързо във

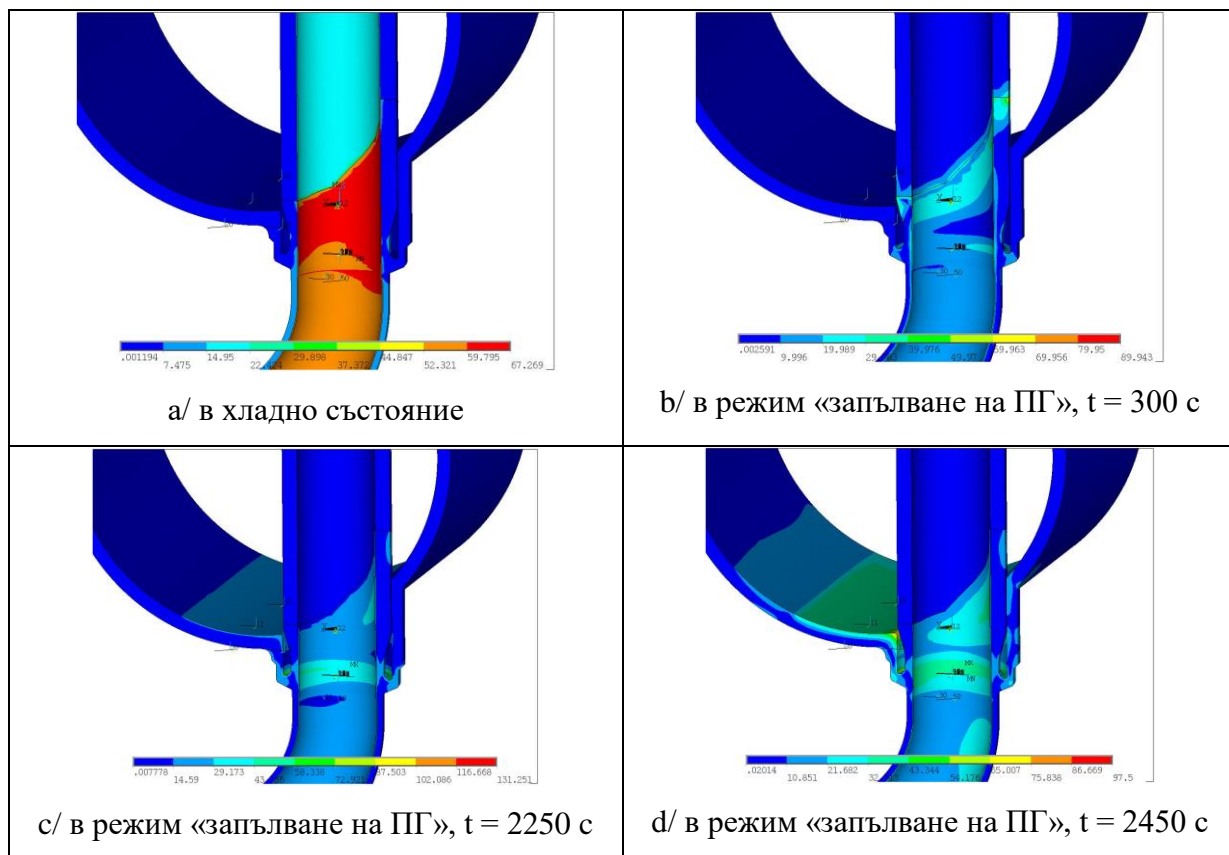
времето и значително изменение на напрежението от флуида. В този режим за около 40 минути има изменение на напрежението с около 60 МПа. Затова структурните пресмятания за оценка на съпротивление на крехко разрушаване следва да се направят именно за този режим.

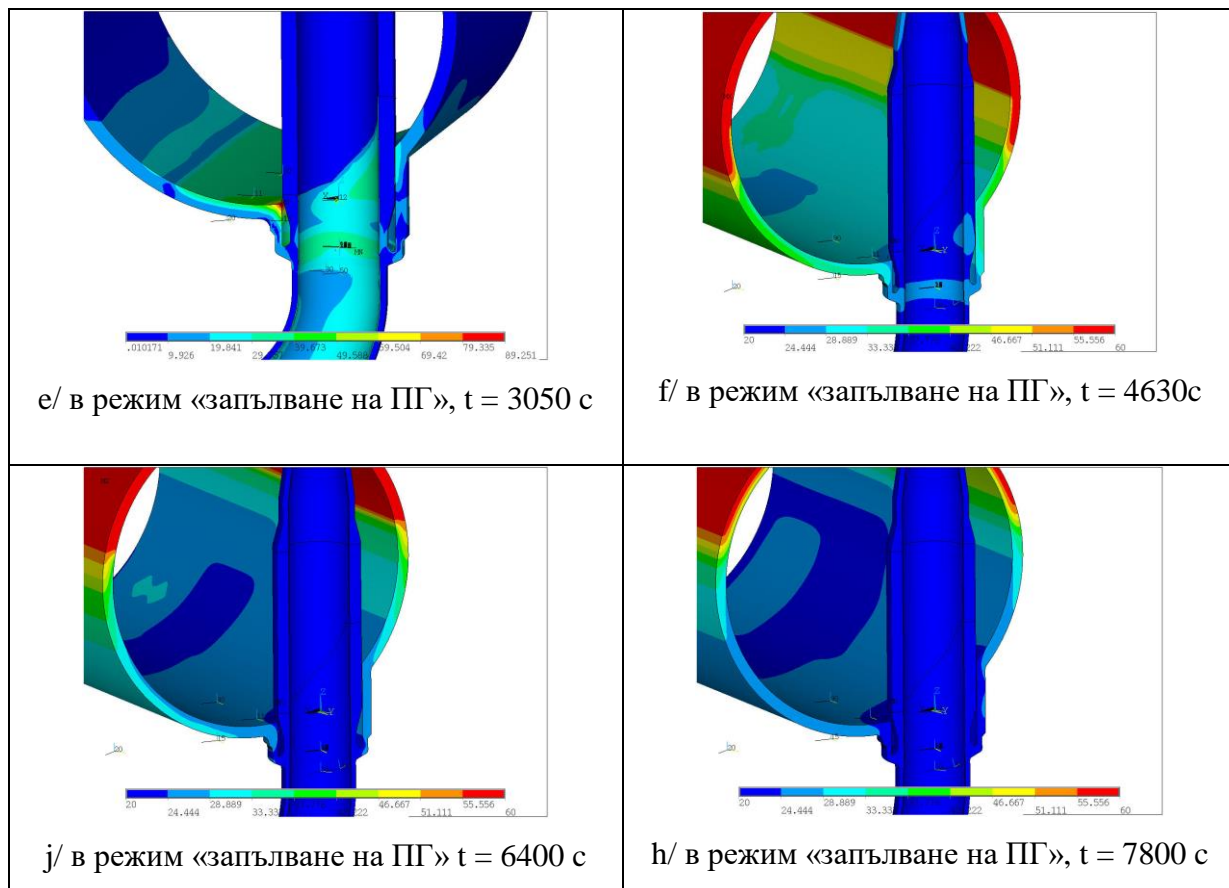
На Фигура 3 са представени графики на изменението на температурата и напреженията на щуцер Ду 1200 в режим “Запълване на ПГ”, [5].



Фиг. 3 Графики на изменението на температурата и напреженията на щуцер Ду 1200 в режим “Запълване на ПГ”.

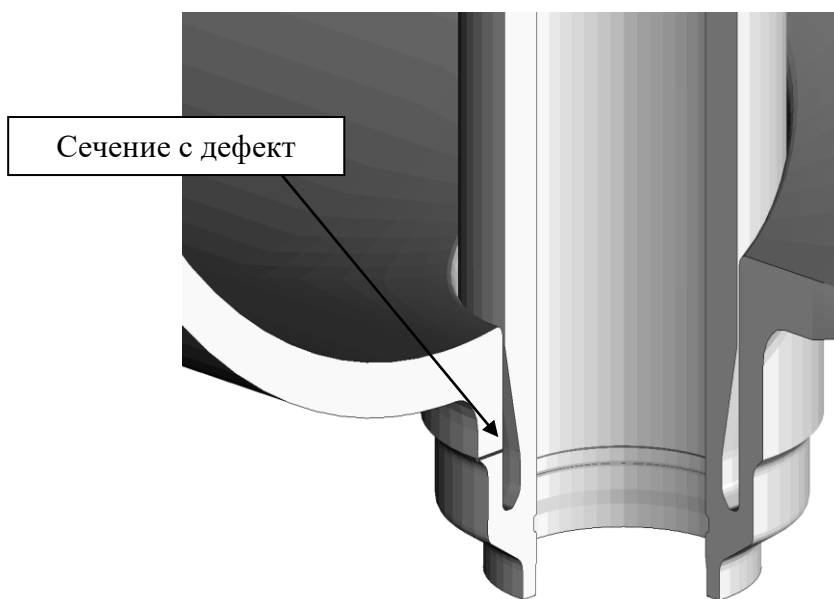
КЕМ модели на разпределението на интензивностите на напреженията са дадени на Фиг. 4, съгласно [6].





Фиг. 4 Разпределение във времето на интензивностите на напреженията на колектори Ду 1200 в режим “Запълване на ПГ”.

На модел на щуцер Ду1200, от вътрешната повърхност се разглежда кръгов постулиран дефект - разположението е показано на Фигура 5.



Фиг. 5 Модел на щуцера Ду 1200 на парогенератора, с постулиран дефект.

За основен метал от стомана марка 10ГН2МФА и метала на завареното съединение, с отчитане влиянието на работната среда на двата контура, а също неопределеността на нейния

състав по елементи мед, хлор и други елементи в района на заварено съединение 111/z, скоростта на нарастване на уморна пукнатина се определя, [7]:

$$\frac{da}{dN} = 2,1 \cdot 10^{-17} \cdot \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,5}} \right)^{7,2} \text{ при } \frac{\Delta K}{(1-R)^{0,5}} < 31,8 \text{ MPa} \quad (8)$$

$$\frac{da}{dN} = 1,08 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{\Delta K}{(1-R)^{0,5}} \right)^{1,4} \text{ при } \frac{\Delta K}{(1-R)^{0,5}} > 31,8 \text{ MPa} \quad (9)$$

Оценката на съпротивление на крехко разрушаване трябва да се изпълнява само в границите на приведената температура $T - T_k$. Критичната температура на крехкост на материала е сметната $T_k = 40^0 \text{ C}$, [8].

3.2. Резултати от изчисленията

Резултатите от пресмятанията за коефициента на интензивност на напреженията K_I за щуцери Ду 1200 са, [6]:

$$K_I = 29,7 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m} < [K_I] = 33,3 \text{ MPa} \cdot \sqrt{m}$$

Условието за съпротивление на крехко разрушаване на заварени съединения 111/Z на възлите на заваряване на щуцери Ду 1200 към корпуса на ПГ е изпълнено за режим НУЕ “Запълване на ПГ”, който се явява най-опасния режим от гледна точка на развитието във времето на напреженията.

4. Заключение

Изпълнен е анализ на съпротивление на крехко разрушаване на заварени съединения 111/z на колектори Ду 1200 към парогенератори ПГВ 1000М. Разчетите показват, че се изпълнява условието за съпротивление на крехко разрушаване.

5. Литература

1. ОТЧ АТЕ.116/02-0836-2012 Отчет за резултатите от комплексното обследване на фактическото състояние и оценка на остатъчния ресурс на оборудването и тръбопроводите на реакторната установка на блок 5 на “АЕЦ Козлодуй” в проектните граници на ОКБ “Хидропрес”, Консорциум РосЕнергоАтом-Електрисите дьо Франс.
2. ПНАЭГ 7-002-86 Правила и норми в атомной енергетике. Норми расчета на прочность оборудования и тръбопроводов АЭС.
3. ПНАЭГ 7-010-89 Правила и норми в атомной енергетике. Правила контроля оборудования и тръбопроводов АЭС.

4. Методика за определяне на допустими размери на дефекти в метала на оборудване и тръбопроводи по време на експлоатация на АЕЦ, Москва, 1991 г., М-02-91.
5. Анализ причин повреждения метала в зоне сварного шва, № 111 парогенераторов ПГВ-1000М, С.Х.Харченко, Н.Б. Трунов, В.В.Денисов, Н.Ф.Коротаев, ФГУП ОКБ Гидропресс.
6. ПАРОГЕНЕРАТОР. Расчет на прочность. Часть 2. Коллектор первого контура, 320.46.10 РР3.1, Ревизия 0
7. 320.46.10 РР3.10 Парогенератор. Расчет на прочность. Часть 11. Сопротивление хрупкому разрушению, ФГУП ОКБ Гидропресс.
8. 320.05.01.00 000 РР 06.1 Парогенератор ПГВ-1000М. Расчет прочности. Коллектор первого контура и теплообменные трубы, ФГУП ОКБ Гидропресс
9. Оценка напряженности узла приварки коллектора к патрубку парогенератора ПГВ- 1000 АЭС при эксплуатации и термообработке после ремонта, Г.В.Степанов¹, В.В.Харченко¹, А.И.Бабуцкий¹, С.В.Романов², В.И.Кравченко¹, С.В.Кобельский¹, А.Ю.Чирков¹, А.А.Ворончук¹, А.А.Котляренко¹, Н.Б.Трунов³, В.В.Денисов³, В.А. Пиминов³
¹Институт проблем прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, Киев, Украина
²Ассоциация “Надежность машин и сооружений”, Киев, Украина
³ФГУП ОКБ ”Гидропресс”, Подольск Московской обл., Россия