



Софийски университет „Св. Климент Охридски”
Физически факултет
катедра Ядрена техника и ядрена енергетика

Иван Стоянов

Дефекти при експлоатация на ядрено гориво. Причини
за тяхното възникване и развитие.

Дипломна работа за придобиване на образователно-квалификационна
степен „бакалавър”

Научен ръководител:
Р-л сектор ЯТК, „АЕЦ Козлодуй” ЕАД, Александър Томов

Научен консултант:
Доц. д-р Пламен Петков

София, септември 2022 г.

Съдържание

1	Въведение	6
2	Обща характеристика на ВВЕР-1000.....	6
2.1	Описание на активната зона на ВВЕР-1000	6
2.2	Определения съгласно нормативните документи на МААЕ и АЯР	8
2.3	Изисквания при нормална експлоатация на ядреното гориво.....	9
3	Дефекти на ядреното гориво. Механизми за развитие.	12
3.1	Дефекти при производството на свежо ядрено гориво (СЯГ)......	12
3.1.1	Описание и възможни механизми за възникване.	12
3.1.2	Нехерметични тапи	13
3.1.3	Дефекти при заваряване	13
3.1.4	Дефекти на обвивката.	14
3.1.5	Критерии, които могат да бъдат нарушени	14
3.2	Фретинг износване. Триене между ДР и ТОЕ.....	15
3.2.1	Общо описание	15
3.2.2	Механизми за възникване и развитие.	15
3.2.3	Критерии, които се нарушават.....	16
3.3	Повреди на ТОЕ, вследствие на попадане на странични предмети (дебриз).....	16
3.3.1	Причини за появата на странични предмети.....	17
3.3.2	Механизми за възникване и развитие.	17
3.3.3	Критерии, които се нарушават.....	18
3.4	Корозия на обвивките на ТОЕ	18
3.4.1	Физическо описание на корозионните процеси, механизми за възникване и развитие.	18
3.4.2	Критерии, които могат да бъдат нарушени	24
3.5	Взаимодействие между таблетка и обвивка на ТОЕ.	24
3.5.1	Описание.....	24

3.5.2	Механизми за възникване и развитие.	24
3.5.3	Критерии, които могат да бъдат нарушени.	28
3.6	Първично наводородяване.	29
3.6.1	Описание.	29
3.6.2	Механизми на отказ.	29
3.6.3	Критерии които могат да бъдат нарушени.	31
3.7	Вторични дефекти.	31
3.7.1	Общо описание.	31
3.7.2	Механизми за възникване и развитие.	31
3.8	Примери за вторични повреди:	33
3.9	Пример от АЕЦ "Козлодуй"	34
3.10	Тежка деградация на ТОЕ.	34
3.10.1	Критерии, които могат да бъдат нарушени.	36
4	Моделиране на повредите на горивните елементи.	37
4.1	Метод на диаграма на за оценка на повредите.	37
4.2	Моделиране на откази поради хидрогениране.	40
5	Заключение.	42
6	Използвана литература.	43

Списък на фигурите

Фигура 2.1. Примери за локална корозия.....	21
Фигура 2.2. Корозия на обвивката на ТОЕ, дължаща се на отлагане на накип.....	23
Фигура 2.3. Натрупване на накип вследствие дезактивация на първи контур.	23
Фигура 2.4. Горивна таблетка на реактори [9].....	26
Фигура 2.5. Корозионно напукване под напрежение вследствие на PCI [9]	27
Фигура 2.6. Масивно локализирано наводородяване [9]	30
Фигура 2.7. Водородът се разпределя във вид на "слънчево изригване [9].....	33
Фигура 2.8. Пример за издутини на обвивката [9]	33
Фигура 2.9. Локално увеличение на обема на обвивката [9].....	33
Фигура 2.10. Пример за перфорация или дупки [9]	34
Фигура 2.11. Пример за малки пукнатини [9].....	34
Фигура 2.12. Дефектирала касета в АЕЦ Кзолодуй ЕАД.....	34
Фигура 2.13. Осево разпукване на ТОЕ [9]	35
Фигура 2.14. Пример за напукан хидриден блистер [9].....	35
Фигура 2.15. Пример за периферно счупване [9]	36
Фигура 2.16. Пример за периферни счупвания в зона на заваряване [9]	36
Фигура 3.1. Моделиране на обвивка на ТОЕ под въздействието на вътрешни напрежения	37
Фигура 3.2 Илюстрация на симулирано разпределение на пукнатини, вследствие от взаимодействието с водород, [11]	40
Фигура 3.3 Диаграмата за оценка на повредите за необлъчен и облъчен модел с дължина на пукнатина с отношение 0,2	41

Списък на съкращенията

АкЗ	Активна зона
ВВЕР	Водо- воден енергиен реактор
ТОЕ(Г)	Топлоотделящ елемент (с гадолиний)
ГК	Горивна касета
ДР	Дистанционираща решетка
РИ	Реакторна инсталация
МААЕ	Международна агенция за атомна енергия
АЯР	Агенция за ядрено регулиране
НЕ	Нормална експлоатация
БЕ	Безопасна експлоатация
ЯЦ	Ядрена централа
ОАБ	Отчет за анализ по безопасността
АЕЦ	Атомна електроцентрала
СЯГ	Свежо ядрено гориво
PCI	Pellet-cladding interaction
BWR	Boiling water reactor
PWR	Pressurized water reactor
CANDU	Canadian pressurized heavy-water reactor
КХО	Контрол на херметичността на обема
CILC	Crud induced localized corrosion - Индуцирана локална корозия от накип
SCC	Корозионно напукване при напрежение
ДОП	Диаграмата за оценка на повредите
RIA	Reactivity initiated accident Авария инициирана от излишък на реактивност

1 Въведение

Работата с ядрените горива е ключова за безопасната експлоатация на ядрените реактори. Процесът на използването на горивата е строго контролиран и започва с тяхното производство съхраняване, транспортиране, използване в ядрените реактори и накрая утилизиране. Съвременните ядрени реактори обикновено имат четири бариери за защита от разпространението на радиоактивни вещества, получени при протичане на верижната реакция. Две от тях са свързани с качеството на изработване на самото гориво - горивни таблетки и обвивка на топлоотделящите елементи (ТОЕ). От всичките етапи, най-сложният е свързан с експлоатацията в ядрените реактори. През този етап е възможно нарушаване на тези две бариери в резултат на възникване на различни повреди и дефекти.

В настоящата дипломна работа са поставени следните цели и задачи:

- Да се разгледат дефектите и причините за откази на ядреното гориво, свързани с потенциално застрашаване на първите две бариери при нормална експлоатация;
- Да се опишат потенциалните механизми за тяхното възникване и развитие;
- Да се представи опростен модел за механична повреда на обвивката на ТОЕ.

Дипломната работа разглежда обща характеристика на горивото за ВВЕР-1000 и описание на дефектите и механизмите за тяхното получаване. В дипломната работа е разгледан модел за възможен отказ на ТОЕ в резултат на наводородяване, което е и често най-вероятната причина за получаване на „йоден спайк“ ефект при резки промени на топлинната мощност и/или налягането в ядрения реактор. Този ефект е бързо и краткотрайно увеличение на скоростта на поява на радиоактивен йод в топлоносителя. Това увеличение обикновено се причинява от наличието на преходен процес в реактора, който води до бърз спад в налягането на топлоносителя спрямо вътрешното налягане на ТОЕ [1].

2 Обща характеристика на ВВЕР-1000

2.1 Описание на активната зона на ВВЕР-1000

Ядреният енергиен реактор е съоръжение, в което се поддържа верижна реакция на деленето на тежки атомни ядра при взаимодействието им с неутрони. При деленето се получава огромно количество топлина, част от която се преобразува в електрическа енергия. Протичането на верижна реакция се определя от условието, че при деленето на ядрото от един неутрон се генерират повече неутрони (средно около 2,5 бързи неутрони). Средата в която

протичат ядрените реакции, процесите на поглъщане, разсейване, делене, се нарича активна зона (АкЗ). Тя се състои от ядрено гориво, конструктивни елементи, забавител и топлоносител [2] [3].

Реакторите с топлоносител обикновена вода под високо налягане ВВЕР са хетерогенни, а неутроните предизвикващи деленето – топлинни. Делящият се изотоп е уран-235, който е включен в смес с изотопа уран-238, като съдържанието на масата на уран-235 е ограничена до 5%, а материалът, от който е съставено горивото е керамика - UO_2 , внесена в ядрения реактор под формата на таблетки. Поставят се в циркониева обвивка, която има формата на тръба. Горивният блок, който образуват горивото и обвивката има цилиндрична форма и се нарича топлоотделящ елемент (ТОЕ). Теплоотделящите елементи се подреждат в снопове - горивни касети (ГК), като целта на това е по-лесното зареждане и презареждане на реактора с гориво и „профилиране на потока на охлаждащата среда в зависимост от интензивността на енергоотделянето в активната зона“ [2]. В напречното сечение на ГК теплоотделящите елементи са групирани в правилна форма, наречена "решетка". За ВВЕР тя е триъгълна. Елементарна клетка се нарича площта, заградена от един ТОЕ и принадлежащият към него забавител (правилен шестостен за реактори ВВЕР), като площта на забавителя се определя като неговата обща площ в АкЗ се раздели на общия брой ТОЕ. Горивните касети имат формата на правилен шестостен в напречно сечение. В активната зона на серийния тип реактори ВВЕР-1000 техният брой е 163 [4] [5] [6].

Горивните касети се състоят от глава, силов скелет (каркас), сноп от ТОЕ (и ТОЕГ) и опашка. В една касета са разположени 312 ТОЕ и ТОЕГ, 18 направляващи канали и една централна тръба, които пресичат дистанциращите решетки (ДР) на касетата. В нашите реактори, в Козлодуй, към настоящия момент се използват касети, типове ТВСА и ТВСА-12 [6]. В следната таблица са представени някои разлики между техните характеристики:

Таблица 2.1. Характеристики на горивни касети [6].

Характеристики	Касета	
	ТВСА	ТВСА-12
Наличие на антидебризен филтър	не	да
Брой дистанциониращи решетки/широчина на ДР, mm	15/20	12/35

Характеристики	Касета	
	ТВСА	ТВСА-12
Устойчивост на скелета на изкривяване, N/mm	55	61,5
Увеличаване на средния размер на зърната на ^{235}U , μm	~10	~35
Максимално обогатяване на горивото по ^{235}U , %	4.4%	4.95%
Дължина на горивния стълб, mm	3530	3530
Маса на UO_2 в касета, kg	495±4.5	546±4.5
Външен/вътрешен диаметър на горивна таблетка, mm	Ø7,6/1.4	Ø7,8/0
Максимална средна дълбочина на изгаряне в ТОЕ, MWd/kgU	64	72
Номинална мощност на работа на РИ (MW)	3000	3120
Материал на обвивката на ТОЕ	E110	E110
Материал на ДР	E660	E660
Глава	08X18H10T	08X18H10T
Опашка	08X18H10T	08X18H10T

2.2 Определения съгласно нормативните документи на МААЕ и АЯР

Анализът на отказите на горивните касети се базира на терминология, разработена в документите на МААЕ и АЯР както следва [7]:

- а) "Експлоатация" е цялата дейност, осъществявана за постигане на целта, за която е била изградена ядрената централа, включително работа на мощност, пускане, спиране, изпитвания, техническо обслужване, ремонт, презареждане на ядреното гориво, инспектиране през време на експлоатация, и другите свързани с това дейности.
- б) "Експлоатационни условия" са определените в проекта условия относно количеството, характеристиките, състоянието на работоспособност и техническото обслужване на

системите (компонентите), необходими за работа без нарушаване на експлоатационните предели.

- c) "Нормална експлоатация" (НЕ) е експлоатацията на ядрената централа в рамките на експлоатационните предели и условия и включва режими на пускане, експлоатация на мощност, планово и непланово спиране на реакторната инсталация, презареждане на активната зона, техническо обслужване и изпитване на конструкции, системи и компоненти.
- d) "Експлоатационни състояния" са състоянията на нормална експлоатация и очаквани експлоатационни събития.
- e) "Експлоатационни предели" са стойности на параметрите и характеристики на състоянието на системите (компонентите) и на ядрената централа като цяло, определени в Проекта, за нормална експлоатация.
- f) "Предели за безопасност" са определените в проекта стойности на параметрите на технологичния процес, отклоненията от които могат да доведат до авария.
- g) "Очаквано експлоатационно събитие" е отклонение на процеса на експлоатация от нормалната експлоатация, което се очаква да възникне най-малко веднъж в рамките на експлоатационния период на ядрената централа, но поради предвидените в проекта мерки не причинява значителни повреди по конструкциите, системите и компонентите, важни за безопасността, или не води до аварийни условия.
- h) "Функция на безопасност" е конкретната цел, която трябва да бъде постигната за осигуряване на безопасността.

2.3 Изисквания при нормална експлоатация на ядреното гориво.

При всички експлоатационни състояния и аварии без стопяване на ядрено гориво енергийният блок на ЯЦ трябва да е в състояние да изпълни следните основни функции на безопасност [7]:

1. Управление на реактивността;
2. Отвеждане на топлината от активната зона и от отработеното ядрено гориво;
3. Задържане на разпространението на радиоактивни вещества в околната среда.

При нормална експлоатация, изпълнението на основните функции на безопасност се постига чрез [7]:

1. намаляване на честотата на отклоненията от нормалната експлоатация чрез повишаване на способността на ЯЦ да остава устойчива в рамките на експлоатационните предели и условия;

2. ограничаване на възможността за развитие на отклоненията от нормалната експлоатация в аварии чрез повишаване на способността на ЯЦ да управлява отклоненията от нормалната експлоатация [7].

За всяка ядрена централа нормалната експлоатация се определя от условията и пределите за нормална експлоатация. По отношение на ядреното гориво, тези условия и предели се задават (регламентират) и определят от [8]:

➤ Технологичен регламент. В него са зададени пределите и условията, които трябва да се спазват, по време на нормална експлоатация на централата, за да се осигури експлоатация в рамките на ограниченията, установени в Отчета за анализ по безопасността (ОАБ).

➤ Водохимичен режим. Химичните и радиохимичните параметри на топлоносителя се контролират, за да се гарантира, че са в границите на стойностите, заложи в ОАБ. Тези параметри имат отношение към структурната цялост на материалите от контура на топлоносителя (първи контур), активността на топлоносителя, поведението на горивото и неговата херметичност, намаляване на радиационния фон в херметичните помещения на първи контур

➤ Контрол на циклите на натоварване на оборудването и тръбопроводите. Представлява процес на отчитане на преходните процеси на които е подложен контура на топлоносителя, за да се потвърди, че броят им не надвишава максимално допустимите стойности, зададени в проекта. Тези стойности са обосновани за възможните механизми за отказ на оборудването и за всички предвидени в проекта експлоатационни и аварийни състояния на РИ.

➤ Експлоатационни ограничения за ядреното гориво. Представлява набор от пределно допустими стойности на неутронно-физични и термодинамични параметри, определени в проекта на АкЗ. Характерните стойности на тези параметри се задават в аварийните анализи и някои от тях зависят от конкретното зареждане на АкЗ. За всяко конкретно зареждане, пресметнатите стойности на тези параметри не трябва да излизат извън пределно допустимите им стойности, зададени в ОАБ.

➤ Периодични изпитания на оборудването. Целта е да се потвърди, че оборудването изпълнява функциите на безопасност, за които е предназначено, в рамките на определените в проекта на централата критерии, през целия период на нейната експлоатация. Изпитанията се извършват съгласно предварително определени графици и процедури.

➤ Инспекции и поддръжка на оборудването. Представяват дейности за поддръжка работоспособността или ремонт с цел възстановяване работоспособността на оборудването, за да може да изпълнява своите функции, съгласно експлоатационните инструкции. Тези дейности са съобразени с нормите за опазване на околната среда, радиационна защита, защита на персонала и всички нормативни изисквания на регулаторния орган (АЯР).

Най-важните експлоатационни критерии, касаещи ядреното гориво, са свързани със състоянието (херметичността) на обвивките на ТОЕ, които се явяват една от бариерите препятстващи разпространението на радиоактивни материали произхождащи от горивото – продукти на делене и трансуранови елементи и обуславят активността на топлоносителя. Нормативно са определени два такива критерия за АЕЦ с ВВЕР-1000 [6]:

a) Критерий за нормална експлоатация (НЕ): сумарната специфична активност на изтопите на йода ($^{131}\text{I} - ^{135}\text{I}$) в топлоносителя на първи контур трябва да бъде под $3.7 \cdot 10^7$ Вq/kg, което съответства на не повече от 0,2% от общия брой ТОЕ да е с газова неплътност или 0,02% от общия брой ТОЕ да е с директен контакт между гориво и топлоносител;

b) Критерий за безопасна експлоатация (БЕ): сумарната специфична активност на изтопите на йода ($^{131}\text{I} - ^{135}\text{I}$) в топлоносителя на първи контур трябва да бъде под $1.8 \cdot 10^8$ Вq/kg, което съответства на не повече от 1,0% от общия брой ТОЕ да е с газова неплътност или 0,1% от общия брой ТОЕ да е с директен контакт между гориво и топлоносител.

Проектният предел за повреда на ядреното гориво представлява пределно допустима степен на повреда на ядреното гориво по време на максимално допустима авария, разгледана в проекта. За реактор ВВЕР-1000 регламентирани пределни стойности са [6]:

a) Температура на циркониевата обвивка на ТОЕ - не повече от 1200 °С;

b) Локална дълбочина на окисляване на обвивките на ТОЕ <17% от първоначалната им дебелина;

c) Част на реагиращия цирконий – не повече от 1% от общата му маса в АкЗ.

Съгласно Технологичния регламент за безопасна експлоатация на блок 5 на АЕЦ "Козлодуй", при нарушаване на критерия за нормална експлоатация се предприемат действия за намаляване на мощността на РИ до 15% от номиналната. В случай, че след намалението на мощността, е невъзможно да се понижи сумарната специфична активност на изтопите на йода в топлоносителя на първи контур, под $3.7 \cdot 10^7$ Вq/kg, за време повече от 48 часа или при достигане на предела за безопасна експлоатация, РИ трябва да се спре [6].

3 Дефекти на ядреното гориво. Механизми за развитие.

Дефект на ядреното гориво възниква, когато е нарушена целостта на втората бариера пред разпространението на радиоактивните продукти на делене – обвивката на ТОЕ. Съществуват различни видове механизми за нарушение на тази бариера.

3.1 Дефекти при производството на свежо ядрено гориво (СЯГ).

3.1.1 Описание и възможни механизми за възникване.

Основните видове дефекти най-често са дефекти на запушващите тапи (заглушките) в краищата на ТОЕ и няколко вида недостатъци на заваръчните им шевове. Броят на повредите в резултат на производствени дефекти напоследък намалява, благодарение на подобренията в производствените процеси. Въпреки това, такива повреди все още се случват и включват главно дефекти на самите тапи и заваръчните шевове, както и в някои случаи дефекти вследствие намаляване на дебелината на обвивката [9].

Некачествените заварки и нехерметичните тапи имат обща характеристика: първичният дефект е малък отвор близо до края на ТОЕ. Поради първоначалния малък размер на дупката и двата типа дефекти ограничават количеството на навлезлия топлоносител в ТОЕ и отделянето на продукти на делене в първи контур. Това означава, че тези дефекти могат да останат неоткрити в АкЗ, докато размерът на първичния отвор не се увеличи или се развие вторичен дефект. Периодът от време, необходим за поява на вторичен дефект от хидриране зависи от размера на първоначалния дефект, температурата на горивото и други параметри [9].

Напоследък производителите на горивни касети използват автоматизиран контрол на процеса, с цел елиминиране на човешките грешки при производството на ТОЕ. Методите за проверка също са подобрени и автоматизирани. Поради тези причини, вероятността за поява на повреди на горивото поради производствени дефекти е много ниска. Следните основни класификации на дефектите се различават [9]:

- Нехерметични тапи
- Дефекти при заваряване
- Дефекти на обвивката.

Особеностите на тези дефекти са представени както следва:

3.1.2 Нехерметични тапи

Производството на тапи от циркониева сплав може да доведе до дефекти, вследствие на които да се осъществи изтичане на газове през тапата. Студеното пресоване на заготовката на тапата например, също може да доведе до вътрешни празнини по краищата на изделията, като деформира външните повърхности повече от вътрешните и в крайна сметка, оставяйки отделни празнини. Повреди от този тип са рядкост. За да се избегне това, се извършва щателен ултразвуков контрол на готовото изделие в процеса на производство [9].

Нехерметични ТОЕ, може да се получат в резултат на екструзионен дефект на материала на заглушката. В процеса на екструзия се образува „екструзионна опашка“, която впоследствие се отстранява. В някои случаи опашката може да не бъде отстранена напълно и да доведе до нехерметичност на ТОЕ. Такива нехерметични ТОЕ са открити при разрушителни изследвания в горещи камери. За отстраняване на този проблем, екструзионния остатък се изрязва по-далеч от края на заготовката, за да се гарантира, че целия дефект е отстранен. След това краят на екструзионната заготовка се проверява чрез металографски методи [9].

Апаратурата за ултразвуков контрол на заготовките и изпитване на крайния материал на ТОЕ също става все по-чувствителна и осигурява окончателна проверка за липса на дефекти [9].

3.1.3 Дефекти при заваряване

3.1.3.1 *Замърсяване на заваръчния шев*

Процесът на заваряване с волфрамов инертен газ на долна или горна заглушка от цирконий се провежда или във среда близка до условия на вакуум, или в атмосфера на инертен газ. При некачествен контрол на газовата среда или непълтни вакуумни камери може да се получи замърсяване на заваръчните шевове с азот и получената корозия в някои случаи да бъде достатъчна, за да се наруши целостта на заваръчния шев. За да бъде избягната тази вероятност е необходимо да се извършва по-добър контрол на газовата среда и мониторинг с помощта на сензори за примеси [9].

Наблюдавани дефекти при заваряване на обвивката се дължат на случайно замърсяване на заварката на заглушка по време на производството [9].

3.1.3.2 *Некачествени заварки*

Повредите на горивото, дължащи се на некачествени заварки на тапа, са изключително редки. Изследвания в горещи камери на облъчени ТОЕ показват, че първичният дефект основно

се дължи на недостатъци при производството. По-голямата част от недостатъците са във вид на много малки оксидни нишки в зоната на заваръчния шев, които позволяват навлизането на топлоносител в ТОЕ [9].

Засегнатите ТОЕ могат да попаднат на различно място в АкЗ, но дефектите се проявяват предимно в позиции с високо енергоотделяне и в горния край на касетата. Броят на повредите, дължащи се на некачествени заварки, напоследък е силно намален в резултат на усъвършенстване на програмите за контрол на качеството [9].

3.1.3.3 Разделяне на границите на зърното

Този тип дефект на заваръчния шев е известен като разделяне на границата на зърното и се характеризира с микроскопичен дефект, подобен на пукнатина, инициран от вътрешната повърхност на заваръчния шев и простиращ се радиално по протежение на границите на зърната на материала. Получава се резултат на възникващи напрежения на опън в заваръчния шев по време на фазата на охлаждане на заварката [9].

3.1.4 Дефекти на обвивката.

Тези дефекти най-често са следствие от неспособност на стандартните системи за контрол на готовите тръбички надеждно да открият места с локално намаляване на дебелината на обвивките. Неоткритите дефекти от този тип могат да увеличат напрежението в обвивката по време на преходни процеси с изменение на мощността на реактора и да доведат до повреда на горивото. Този механизъм на отказ на ТОЕ е подобен на отказа при взаимодействие между таблетка и обвивка на ТОЕ (pellet-cladding interaction - PCI). За да се избегнат подобни дефекти, производителите са предприели коригиращи мерки, включващи усъвършенстване на ултразвуковата система за контрол на дефектите на ТОЕ, както и въвеждане на допълнителна технология за контрол на тръбичките чрез използване на вихрови токове [9].

3.1.5 Критерии, които могат да бъдат нарушени

Поради подобряване на системата за контрол на качеството при производство на ТОЕ и касети, в последно време отказите, дължащи се на недостатъци при производството са много редки и засягат най-често отделни ТОЕ. Отказът на отделен ТОЕ в АкЗ, дължащ се на производствен дефект обикновено води до повишаване на общата активност на топлоносителя в първи контур, без да се достига критерия описан в параграф 2.3.

3.2 Фретинг износване. Триене между ДР и ТОЕ

3.2.1 Общо описание

Триене между дистанциращата решетка и ТОЕ (фретинг) е основният тип повреда на горивото за реактори с вода под налягане. Представява механично износване на обвивката на ТОЕ. Причините са [9]:

- недобро захващане на горивния прът в дистанциращата решетка на касетата, заради неправилно проектиране и/или производствен дефект;
- вибрации на горивния прът/горивната касета, породени от по-високи от предвидените в проекта стойности на турбулентност и на потока на топлоносителя.

3.2.2 Механизми за възникване и развитие.

Поради работата на главните циркулационни помпи в първи контур и високата скорост на преминаване на топлоносителя през АкЗ възникват вибрации, които се предават на ТОЕ, чрез потока на топлоносителя и съчетани с други фактори, могат да доведат до механичното износване на циркониевата обвивка. По време на експлоатация на ядреното гориво в АкЗ фретинг износването се ръководи от сложни, непостоянни във времето физически явления и зависи от [9]:

- Степен на вибрациите, предизвикани от потока, причинени от конструкцията на горивото и/или специфичните работни условия на РИ;
- Първоначалния дизайн на контактния елемент;
- Материалите, от които е изработена решетката;
- Площта на зоната на контакт между обвивката на ТОЕ и решетката.

Конструкцията на решетката понякога може да доведе до самовъзбуждаща се вибрация на горивната касета и/или самовъзбуждаща се вибрация на самата дистанционираща решетка. Като пример може да се посочи касета с циркониеви решетки с ниско хидравлично съпротивление, която е податлива на самовъзбуждащи се вибрации на горивния стълб при специфични условия на потока [9].

От голямо значение е състоянието на зоната на контакт между решетката и ТОЕ, което се определя от първоначалните еластични свойства на контактния елемент, радиационното пълзене на обвивката, индуцирано от радиационното облъчване, намаляването с времето на

натиска на елемента върху ТОЕ, както и местоположението на касетата в активната зона на реактора. Формата и структурата на контактния елемент на решетката са важни за разбиране на възможността за отказ на ТОЕ, в зависимост от поведението на ТОЕ в областта на контакт с ДР (фретинг износване). При по-голяма контактна площ между ДР и ТОЕ се създава по-малко контактно напрежение между тях като по този начин се намалява степента на износване. В течение на кампанията, силата на контактния елемент на решетката намалява и може да се появи процеп между ТОЕ и решетката, което оказва влияние върху вибрационното състояние на ТОЕ. Очевидно е, че по-голяма първоначална еластичност на контактния елемент, по-малко пълзене на обвивката в радиално направление и по-малко радиационно отпускане на елемента ще доведе до по-малка хлабина между него и ТОЕ, в течение на кампанията. По принцип, горивните касети, разположени в периферията на активната зона, могат да създадат по-голяма междина между решетката и ТОЕ, отколкото по-централно разположените, тъй като са подложени на относително по-ниско термично натоварване и следователно имат по-малък диаметър на ТОЕ. При конкретни изследвани случаи на фретинг повреда, дължаща се на изработката на ДР се наблюдава, че възникването на дефекта се случва или в края на втората, или по време на третата кампания. Условието за поява на такъв дефект вероятно могат да бъдат комбинация от:

- висок напречен поток на топлоносителя в най-долната решетка;
- първоначалните свойства на клетката ДР се различават определените в проекта на решетката стойности, което води до силно намаляване на опората на ТОЕ в зоната на контакт с течение на времето [9].

3.2.3 Критерии, които се нарушават

При степен на вибрации и взаимодействие на решетка и обвивка, при които няма пробив на обвивката на ТОЕ, отсъства повишение на активността на първи контур и няма опасност от достигане на който и да е от критериите в параграф 2.3. От експлоатационният опит на АЕЦ "Козлодуй" през 2001 година на 5ЕБ, вследствие на отказали 6 броя касети, е бил преминат критерия за НЕ. Причината за отказа на тези касети е била определена като триене на долната част на снопа ТОЕ в опорната решетка, поради повишени вибрации на горивния стълб. Мощността на реактора е била намалена с 15% с цел недостигане критерия за безопасна експлоатация [6].

3.3 Повреди на ТОЕ, вследствие на попадане на странични предмети (дебриз).

3.3.1 Причини за появата на странични предмети.

"Страничен предмет" или "чуждо тяло", често наричани "debris", е всеки предмет в контура на топлоносителя, чието място не е там по проект. Попадането на странични предмети е много често срещана причина за повреда на ядреното гориво във всички видове енергийни реактори. Такива са предимно метални стружки от работата на металообработващи инструменти, както и други метални късчета и парчета тел, попаднали в топлоносителя вследствие на инспекция и/или ремонт на оборудване и тръбопроводи свързани с първи контур, с последващо недостатъчно почистване на ремонтираните участъци [9].

3.3.2 Механизми за възникване и развитие.

Страничните предмети навлизат обикновено в горивния сноп през опашката на горивната касета, увлечени от топлоносителя и по-рядко попадат в хлабините между самите горивни касети. Причиняват повреди по долната част на ТОЕ, или се улавят по-нагоре в решетките. След засядане в дистанциониращата решетка, чуждите тела вибрират под въздействието на потока топлоносител и повреждат целостта на обвивките на ТОЕ (причиняват изтъняване или пробиване на обвивката). Това може да бъде причина за разхерметизиране на ТОЕ, вследствие на което да се осъществи пряк контакт между горивните таблетки и топлоносителя и поява на вторичен дефект. Повредите на ТОЕ, вследствие на попадане на странични предмети, не са свързани с мощността на РИ и могат да се появят навсякъде в активната зона като степента на повреда зависи от размера на предметите [9].

Следите от въздействието на страничните предмети върху обвивката могат да се класифицират въз основа на размер (малък, среден, голям), форма (малка дупка, вдлъбнатина, груба следа, полумесец) и дали има множество или единични белези. Повече от 95% от повредите от странични предмети се появяват под най-долната дистанционираща решетка [9].

Установено е, че по-голямата част от причинените от отломки дефекти възникват в началото на експлоатационния живот на горивото. Това предполага, че с увеличаване на дълбочината на изгаряне, обвивките на ТОЕ променят свойствата си и стават по-устойчиви на увреждане от дебрис. Възможна причина за това е натрупването на оксиден слой върху повърхността на обвивката в резултат на корозия по време на облъчване, който е много по-твърд от основната циркониева сплав [9].

С цел намаляване на вероятността за повреди на ТОЕ вследствие на попадане на странични предмети, в опашките на горивните касети се монтира антидебризен филтър, който

при ТВСА-12 например, задържа обекти с характерен размер по-голям от 2 mm [6].

3.3.3 Критерии, които се нарушават.

Антидебризните (АДФ) филтри се монтират в долните части на горивни касети за реактори тип вода под налягане. Целта на това устройство е да се създаде структура, която е високоефективна при задържане на отломки с всякаква форма. Използваният в касетите на ВВЕР-1000 АДФ се състои от няколко равнинни филтърни елемента с прорези за преминаване на охлаждащата течност, които са във формата на удължени правоъгълници (слотове) с ширина не повече от 2 mm. Слотовете са наклонени към оста на горивните касети под ъгъл, който гарантира, че няма празнини във филтърния елемент в посока, успоредна на оста на горивната касета. За подобрена ефективност на филтриране, АДФ може да включва няколко (2..3) равнинни филтърни елемента, подредени така, че съседните елементи да отразяват един друг около тяхната равнина на контакт [6].

В последните години в световен мащаб се предприемат редица мерки за намаляване на степента на повреда на ядреното гориво вследствие на странични предмети в първи контур – въвеждане на антидебризни филтри, засилване на контрола за непопадане на странични предмети при ремонт на оборудване от първи контур и свързаните с него системи, контрол и отчет на използваните инструменти при ремонта и т.н.. Борбата със страничните предмети в първи контур е една от основните насоки в общия "стремеж към нулев отказ на ядреното гориво" . В резултат на това, наблюдаваните откази на ТОЕ поради дебриз, установени при изследвания в горещи камери, намаляват по абсолютен брой. За 5ЕБ на АЕЦ "Козлодуй", за последните 20 години е открита само една нехерметична ТВСА, повредата на ТОЕ на която е вследствие от износване от страничен предмет (дебриз). При това повишението на общата активност на първи контур по време на последната кампания на тази касета е било далеч под стойността на критерия представен в параграф 2.3.

3.4 Корозия на обвивките на ТОЕ

3.4.1 Физическо описание на корозионните процеси, механизми за възникване и развитие.

„Корозия” е влошаване на якостните характеристики на циркониевата обвивката на ТОЕ вследствие на:

- механично въздействие – топлоносител;

- химично въздействие – H_3BO_3 .

Циркониевите сплави са корозионно устойчиви при нормална експлоатация, поради което такъв вид дефект е рядкост [6].

Този феномен е бил наблюдаван предимно при реактори от тип BWR и PWR. В общия случай корозията е равномерна по повърхността на обвивката и такава, водеща до повреда на обвивката, се случва много рядко при нормални работни условия. Такива повреди се дължат или на необичайно висок топлинен поток, надвишаващ проектните предели (корозия при прегряване на обвивките на ТОЕ), или на проблеми с водохимичния режим, водещи до повишено отлагане на накип. В BWR, чувствителността на обвивката към корозия и високото съдържание на други примеси в топлоносителя, като въглерод или органични съединения, също може да доведе до повреда на горивото. Повреди на ТОЕ, свързани с корозия, се наблюдават рядко в реактори CANDU и ВВЕР, само в редки случаи на експлоатация в условия, различни от тези за нормална експлоатация [9].

3.4.1.1 Масирана корозия.

В миналото е било наблюдавано, че скоростта на корозия на сплав Циркалой-4 има тенденция да се увеличава, при достигане на високи дълбочини на изгаряне. Този феномен се обяснява чрез няколко механизма за възникване и развитие. Единият е, че топлопроводимостта на циркониевия оксид е ниска и натрупването на оксид има положителна обратна връзка върху окисляването на Циркалой чрез повишаване на температурата на повърхността на обвивката на ТОЕ. Друг такъв е, че циркониевите хидриди са склонни да се отлагат по външната повърхност на обвивката и е известно, че корозията на хидридите протича много по-бързо от тази на метала на обвивката [9].

Като пример може да се даде повредата на горивото поради масирана корозия на обвивката на блок 1 на френската централа Вlayais през 1991 година. По време на газово КХО са били идентифицирани пет повредени касети. Всичките те са били тествани с ултразвук, за да се определи кои ТОЕ са се повредили. Съществуващият контакт между таблетките и обвивката в тези ТОЕ е затруднил разчитането на ултразвуковите сигнали, но е бил установен по един повреден ТОЕ за всяка касета. Била е измерена средна дължина на оксидния слой около 140 mm в горните участъци на ТОЕ, при максимална пикова дължина на същия от 197 mm. Тези горивни касети са били доставени от чуждестранен доставчик, който използва обвивки, произведени по стара технология и които са били облъчени в продължение на четири горивни кампании, което

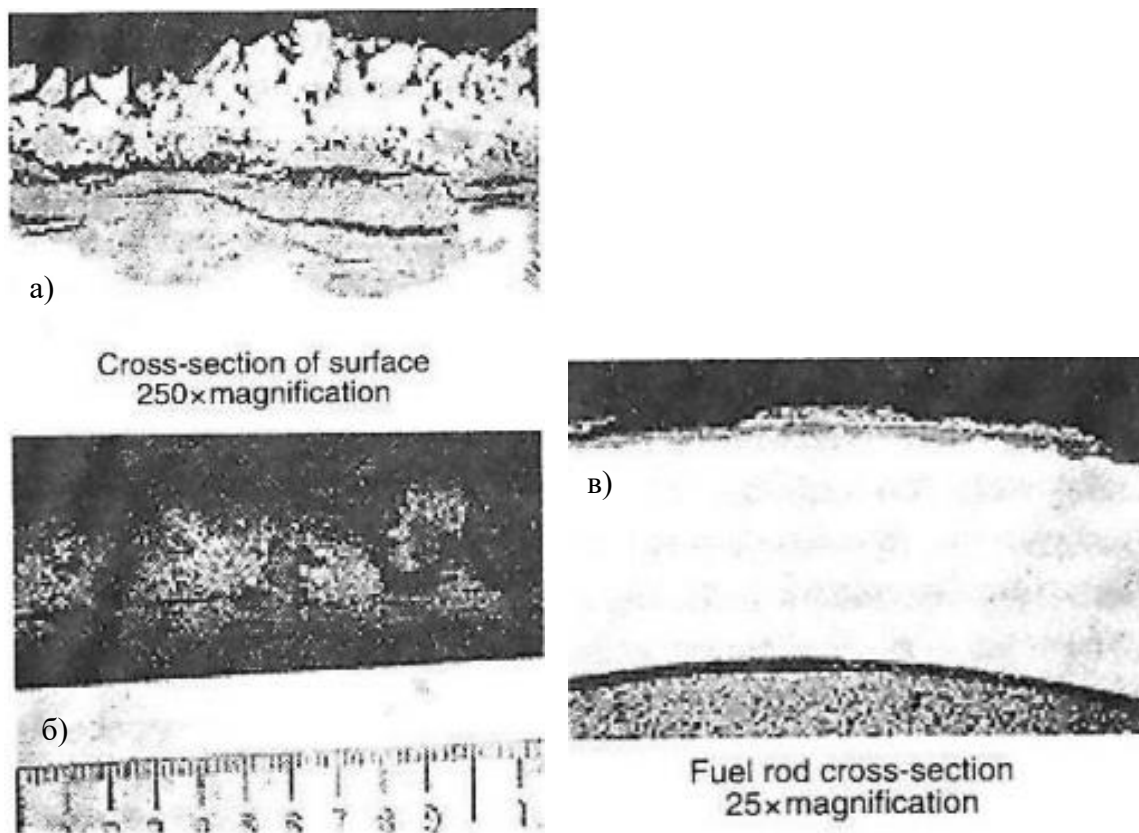
е било с една кампания повече от техния проектен срок на експлоатация [9].

Повреда на ядрено гориво вследствие на масирана корозия е възникнала и в четвърти блок на АЕЦ Нововоронеж (ВВЕР-440) през 1986 г. Тя е в резултат на преразпределение на неутронното поле, което е довело до повишена мощност и вероятно до частично кипене на топлоносителя. Температурата на обвивките се е повишила до 490°C и е било регистрирано повишаване на активността на топлоносителя. Изследванията в горещи камери на повредените ТОЕ е разкрило големи корозионни щети под формата на дебел слой натрошен оксид, който на някои места е довел до пробив в стените на ТОЕ [9].

3.4.1.2 Индуцирана локална корозия от накип (CILC).

Индуцираната локална корозия (Crud induced localized corrosion - CILC) е една от основните причини за повреда на горивото в кипящи реактори (BWR) през 80-те години. Това прогресивно намалява с използването на термично обработена обвивка, по-устойчива на нодуларна корозия. Повреди от локална корозия, предизвикана от накип (CILC), първоначално са били открити през 1979 г. в някои немски BWR с обвивка на ТОЕ от Циркалой-2. Повредата на горивото е била свързана с локална корозия на горивната обвивка, както е показано на 3.1, където се образува „нагар от котлен камък“ и често се придружава от вторични хидридни издутини и надлъжни разцепвания. Отлаганията от котлен камък съдържали високи концентрации на мед, до и над 50%. Отказите са възникнали в средата на жизнения цикъл на касетите и са били силно концентрирани в ТОЕ с изгарящ погълтател, съдържащи таблетки от уран-гадолиний (ТОЕГ) [9].

От подробни изследвания е установено, че трябва да възникнат едновременно три специфични условия относно енергоотделянето, и чувствителността на материала на обвивката на ТОЕ, за да възникне повреда от тип CILC [9].



Фигура 3.1. Примери за локална корозия

По отношение на условията в първи контур повреда от тип СІЛС е установена изключително в инсталации с кипящи реактори, с медни кондензаторни тръби на турбината и система за почистване на кондензата от тип филтър-деминерализатор. Установено е, че наличието на значителни количества мед в топлоносителя е вредно по три причини. Първо, той насърчава образуването на плътен, прилепнал и топлоизолиращ накип от котлен камък. Второ, съдържащата се мед в накипа се отлага предимно между нормалните локални натрупвания на оксиди. Трето, дебелият слой накип, съдържащ мед, възпрепятства постъпването на топлоносител и води до образуване на силно изолиращ слой пара в слоевете на оксида [9].

По отношение на енергоотделянето, повреди от тип СІЛС са възникнали почти винаги в ТОЕ, съдържащи гадолиний, които винаги работят при по-нисък топлинен поток. Установено е, че Циркалоят е по-податлив на възникване и растеж на локален фазов преход на циркония в ТОЕГ, отколкото в ТОЕ, при условия на по-висок топлинен поток. Счита се, че основният механизъм за това явление е свързан със силно окислителни, радиолитно генерирани радикали на повърхността на ТОЕ. При нисък топлинен поток времето на задържане на тези радикали (напр. H_2O_2 , HO , HO_2 и т.н.) е по-дълго в сравнение с това при ТОЕ с висок топлинен поток, и насърчава образуването на локална корозия [9].

3.4.1.3 Влияние на преходната водна химия и материала на обвивката на ТОЕ върху повредата от тип CILC

Забелязано е, че химическият състав на водата в началото на кампанията на горивото може да повлияе на корозията при повреда от типа CILC на по-късен етап от кампанията му. В началото на кампанията, когато слой от циркониев оксид е много тънък, високото съдържание на мед в топлоносителя, особено в комбинация с процеси, които повишават топлопроводността на топлоносителя, може да причини ускоряване на окисляването, необходимо за образуване на дебели, напукани оксиди, способстващи за отказ на обвивката. От механична гледна точка е интересно да се отбележи, че не е наблюдавана връзка между концентрацията на мед в топлоносителя в края на кампанията на горивото и честотата на повреда на партидата [9].

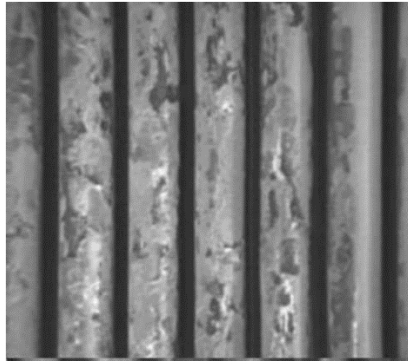
С цел елиминиране на този тип повреди на ТОЕ са били предприети няколко коригиращи практики като: подобрен мониторинг на химичния състав на топлоносителя, пускови процедури с ниска концентрация на мед и по-строги ограничения за максимално допустимата концентрация на мед в топлоносителя на първи контур. Стандартният Циркалой-2 с променлива устойчивост на корозия е бил заменен от специална термично обработен материал за обвивката. Извършена е и подмяна на оборудване, включително подмяна на меден кондензатор на турбината и инсталиране на по-ефективни системи за пречистване на кондензата [9].

3.4.1.3.1 Индуцирана корозия от накип.

В сравнение с корозията от тип CILC, този тип корозия включва повреди на термично обработени обвивки, които не са податливи на локална корозия. Характеристиките на корозията са различни и не включват локална корозия, дори ако първопричината може да е подобна [9].

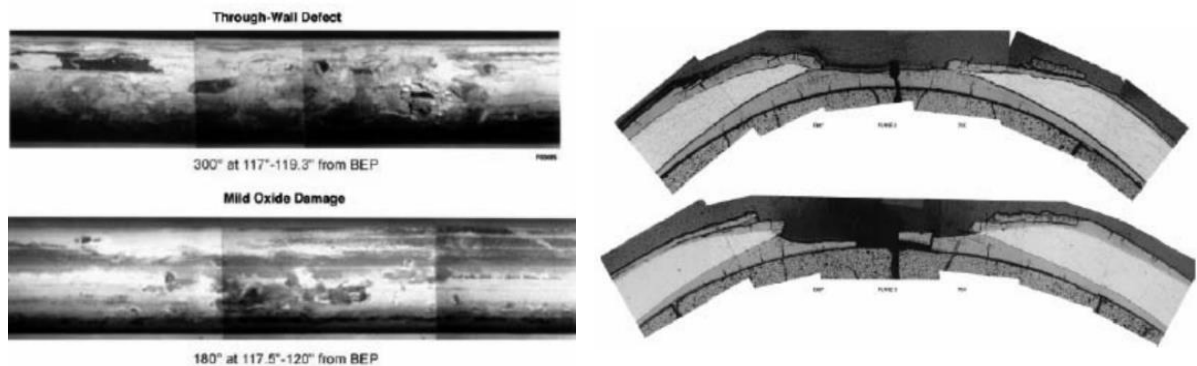
Като пример може да се посочи наблюдавана силна корозия на обвивката, дължаща се на отлагане на накип, в няколко PWR инсталации в САЩ между 1995 г. и 2000 г. По-специално, през 1995 г., в първи блок на АЕЦ "Три Майл Айлънд" са открити девет повредени ТОЕ поради необичайно натрупване на корозионни продукти в горните участъци на външната повърхност на периферните ТОЕ. Те са били в свежи касети с високо обогатяване от 4,75%. Отличителният външен вид на отказалите ТОЕ се характеризира с тъмна, почти черна повърхност с назъбени бели петна, които се виждат и се появяват на около 2,8 метра от дъното на снопа, както е показано на Фигура 3.2. Резултатите от следреакторните изследвания в горещи камери са показали увеличена корозия, по-високо от очакваното поглъщане на водород и повишено окисление на обвивката в горните участъци на ТОЕ, както и рекристализация на обвивката в

тези зони. Тези наблюдения показват, че са били подложени на по-високо термично натоварване [9].



Фигура 3.2. Корозия на обвивката на ТОЕ, дължаща се на отлагане на накип

Причината за отказа на ТОЕ е била оценена като комбинация от висока температура, дължаща се на по-висока мощност и преразпределяне на неутронния поток към свежите касети и ниска стойност на рН поради високата борна концентрация, използвана за преход от 18-месечна към 24-месечна горивна кампания Фигура 3.2 и Фигура 3.3, [9].



Фигура 3.3. Натрупване на накип вследствие дезактивация на първи контур.

Изолирано събитие с повишено натрупване на накип е наблюдавано през 1995 г. в Loviisa-2 (WWER-440) в началния цикъл след дезактивация на първи контур. Забелязани са аномалии в температурата на топлоносителя на изход от АкЗ по време на експлоатация. По-късна инспекция на горивото е разкрила големи отлагания на суровина в много касети и фретинг повреди на ТОЕ в седем касети поради повишено местно съпротивление на потока и турбуленция. Отлаганията по ТОЕ се дължат на недостатъчно почистване на контура, което оставя мръсотия от процеса на дезактивация в застойни зони [9].

3.4.2 Критерии, които могат да бъдат нарушени

Поради разнородния характер и причини, водещи до корозия на ТОЕ, последствията от нея могат да бъдат с различна тежест. Може да се твърди, че масираната корозия има най-тежко негативно влияние върху устойчивостта на отказ на ТОЕ, да доведе до пробив на обвивката и евентуално надхвърляне на критерия за нормална експлоатация в параграф 2.3.

3.5 Взаимодействие между таблетка и обвивка на ТОЕ.

3.5.1 Описание.

Взаимодействието между таблетките и обвивката (pellet-cladding interaction) представлява осъществяване на директен контакт между тях. Причината е термичното разширение на горивото в процеса на експлоатация, вследствие на процесите протичащи в него. Възможно е предаване на високи механични напрежения от таблетката към циркониевата обвивка, от там нарушаване на нейната структурна цялост и вероятност за разхерметизиране на ТОЕ [9].

3.5.2 Механизми за възникване и развитие.

При първоначално нагряване на свежото ядрено гориво, при извеждането на реактора на номинална мощност, протича процес на “доизпичане” на таблетките, водещ до леко свиване на диаметъра на горивната таблетка. Увеличава се технологичната хлабина между таблетката и циркониевата обвивка. „ При последващо увеличение на мощността, размерът на диаметъра на таблетката, получен” при предишното повишаване на мощността, ще бъде достигнат при по-ниска мощност. Следователно, „при циклично изменение на мощността на реактора, дори в едни и същи граници, размерът на газовата хлабина ще намалява” [10]. За реактори тип ВВЕР-1000 се запълва изцяло (осъществяване на пряк контакт между таблетка и обвивка) при достигане на дълбочина на изгаряне около 45 MWd/tU (за касети ТВСА). Всички последващи термични разширения на горивото се предават директно на обвивката, както и вибрациите от преминаване на топлоносителя около ТОЕ се предават на горивото. Това води до възникване на механични напрежения в обвивката, стойността на които зависи съществено от температурата на горивото. При тези условия бързите преходни процеси, свързани с голямо изменение на мощността на РИ (температурата на горивото), могат да доведат до твърде високи механични напрежения в циркониевата обвивка, поради различия в изменението на работните температури на горивото и обвивката в преходни режими. Например, в преходен режим изменението на температурата на горивото „е от порядъка на 500°C ÷ 1000°C, докато за обвивката, това изменение е в границите на 10°C ÷ 20°C.” Освен това, „коэффициентът на обемно

температурно разширение за материала на обвивката е приблизително 1,5 пъти по-малък от този на урановия двуокис” [6] [10].

С изгарянето на горивото в ТОЕ се натрупват газообразни продукти от делене, които повишават вътрешното налягане. Температурата на топене и топлопроводността на горивото намаляват. Влошаването на топлопроводността повишава температурните градиенти в таблетката. Газовите молекули дифундират към границите на структурните зърна на горивото където се натрупват и формират газови области между зърната, вследствие на което зърната се раздалечават едно от друго. Това създава възможност за образуване на пукнатини в горивото. Образуването на пукнатини в таблетките „води до възникване на концентрация на напреженията в обвивката в местата, разположени срещу пукнатините” [10]. Пукнатините се получават при изменение на мощността на реактора, вследствие на формираните газови области и скоростта им на образуване пряко зависи от скоростта на това изменение. При повишение на мощността, пукнатини се получават по външната повърхност на таблетките, под натиска на вътрешните разширяващи се слоеве на таблетката. Пукнатините могат да се затворят, като степента на затваряне зависи от продължителността на работа на реактора в стационарен режим [6] [10].

За избягване на този механизъм на разширяване на горивото се използва горивна керамика с по-големи структурни зърна (ТВСА-12), което намалява относителния брой на местата, в които е възможна дифузия и натрупване на газообразните продукти [6].

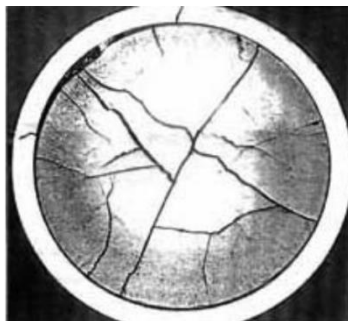
Неизправностите вследствие на PCI са резултат от следната комбинация от ефекти [9]:

- разширяване на горивните таблетки, особено при радиално напукани таблетки, води до напрежения в обвивката, в местата на контакт;
- наличие на среда с химически агресивни продукти на делене.

Тъй като характеристиките на отказите при PCI са доста сходни с тези при корозионно напукване (SCC) на циркония, механизмът на отказ при PCI може да се счита за индуциран от продукт на делене. Като цяло, SCC е бавен процес на счупване, който протича при напрежение на опън в обвивката, по-ниско от напрежението на счупване, в корозионна среда. За появата му трябва да бъдат изпълнени едновременно три основни условия: достатъчна големина и продължителност на напрежението в материала на обвивката, чувствителност на материала към SCC и агресивна среда. Напрежението зависи от концентрацията на йод, времето на задържане, материала и температурата [9].

Области с концентрация на напрежението могат да бъдат места с набраздяване на вътрешната повърхност на обвивката при наличие на отчупени парчета от таблетките или при дефекти на обвивката над определен размер [9].

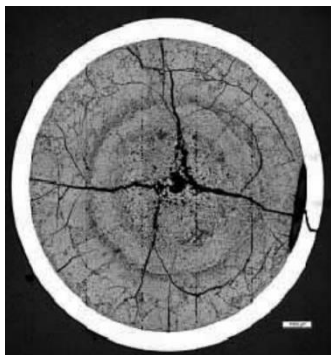
Като пример може да се даде отказал ТОЕ във втори блок на АЕЦ "Гундремминген", където причината е била наличието на отчупени фрагменти от таблетката в газовата хлабина между таблетката и обвивката. Фигура 3.4, [9].



Фигура 3.4. Горивна таблетка на реактори [9]

Металографското изследване е показало, че парченцата са с клиновидна форма и произхождат от външната страна на таблетката и са се плъзнали в междината по време на експлоатацията. За разлика от общия случай, това е довело не до една, а до две пукнатини в обвивката, под ъгъл от около 80° . Горивото е било произведено преди въвеждането на сегашните усъвършенствани производствени практики, които включват подобро качество на таблетките, въвеждане на нова геометрия на челната повърхност, подобрени процедури за зареждане на ТОЕ с горивни таблетки, както и разширен контрол на качеството [9].

Друг механизъм на повреда от корозионно напукване под напрежение вследствие на РСІ, е концентрация на напрежение в обвивката поради наличието на липсваща част от повърхността на таблетката. Концентрацията на напрежението се създава от комбинация от фактори, включващи големи промени на мощността при преходни процеси и съсредоточаването в хлабината на химически агресивни продукти на делене, най-вече изотопи на йода Фигура 3.5, [9].



Фигура 3.5. Корозионно напукване под напрежение вследствие на PCI, [9]

При отказалият ТОЕ, представен като пример на фигура 5.36 всички пеходни процеси с изменение на мощността са били с големина и скорост доста под експлоатационните граници. Следователно липсващата повърхност на таблетката е най-вероятният причинител на повишените нива на локално напрежение, което в крайна сметка е довело до отказа на ТОЕ [9].

Всички използвани циркониеви сплави са податливи на повреди от тип PCI и SCC предизвикана от йод. При лабораторни тестове нелегираният цирконий е най-устойчив на напукване и изисква значително „пластично напрежение“, за да се образуват пукнатини. Следователно нелегираният цирконий може да се използва като бариерен слой в обвивката срещу ефекта от PCI като намаляването на пластичността на материала по време на облъчването в реактора е малко и достига насищане при високи дълбочини на изгаряне. При циркониевите сплави чувствителността към SCC се увеличава с увеличаване на границата на провлачване, защото по-високата граница на провлачване позволява на обвивката да издържа по-високи напрежения в началния стадий на развитие на пукнатината. Тази зависимост при сплавта Циркалой на практика изчезва по време на облъчване в реакторната среда, под влиянието на флуенс от бързи неутрони от около 10^{24} n/m², което съответства на около 1 MW·d/kg U, [9].

Установено е, че йодът е най-вероятният продукт на делене, причиняващ SCC. Известно е, че някои метални йодиди, като тези на Fe, Al, Zr и Te, причиняват SCC на циркония точно като самия йод. Газообразният ZrI₄ е най-корозивният агент. SEM изследването разкрива, че морфологията на фрактурните повърхности, причинени от йодид-индуциран SCC, е подобна на тази, причинена от йод-индуциран SCC. В лабораторни условия е установено, че CsI също предизвиква SCC на циркония при облъчване с гама лъчи. Също така, други химични радикали различни от йода, особено Cs и Cd, са способни да причинят SCC, като ефектът от наличието на смес на двата химични елемента е доста по-силен от този на двата, взети по отделно [9].

SCC е явление, зависещо и от времето. В повечето случаи, в енергийните реактори времето, необходимо за възникване на отказ на ТОЕ вследствие на PCI, след промяна на мощността, не е известно. В експерименталните реактори, където параметрите на средата са добре контролирани, повредата вследствие на PCI може да бъде проследена по-систематично. Така например, проектът INTER-RAMP, който е работил с облъчени ТОЕ от BWR, е очертал много ясна връзка между увеличаването на мощността и времето до възникване на повреда. Установено е, че този интервал от време варира от няколко минути до един ден. Експерименти извършени в рамките на проекта TRANS-RAMP I/II показват, че развитието на пукнатината започва в рамките на приблизително 10 секунди след началото на преходния процес с промяна на мощността, а проникването през стената на обвивката на ТОЕ става в рамките на около една минута [9].

В реакторите CANDU и ВВЕР повреди вследствие на PCI възникват по време на резки промени на мощността, извън експлоатационните граници, при преходни процеси. Като пример може да бъде даден блок 1 на АЕЦ "Пикъринг", където, през ноември 1988 г., след аварийно спиране и последващо набиране на мощност, всички регулиращи органи са били извадени от активната зона и мощността на реактора се е повишила до 87% от номиналната за 40 минути. Този процес бил извън пределите за нормална експлоатация, тъй като в тази ситуация, мощността на реактора обикновено е ограничена до 65%. В резултат на преходния процес около 200 горивни касети в 40 централни канала са претърпели големи натоварвания. От тях са открити тридесет и шест дефектни касети, съдържащи около 290 повредени ТОЕ, главно по периферията. Механизмът на отказ е бил PCI, както е описано по-горе [9].

3.5.3 Критерии, които могат да бъдат нарушени.

Както беше описано по-горе отказите на ТОЕ поради PCI възникват най-често при преходни режими с големи и бързи изменения на мощността и силно зависят от термичното натоварване на ТОЕ в тези режими. Ако преходният процес е извън пределите за нормална експлоатация, то това може да доведе до отказ на значителен брой ТОЕ в АкЗ и надвишаване на предела за нормална експлоатация по обща активност на топлоносителя и евентуално достигане на предела за безопасна експлоатация, описан в 2.3.

3.6 Първично наводородяване.

3.6.1 Описание.

Наводородяването представлява процес на образуване на съединения на водород с метал, при което се променят свойствата на метала. За циркония съединението е ZrH_4 (циркониев хидрид). Първично наводородяване се получава при взаимодействие на водород с външната страна с външната страна на циркониевата обвивка [6].

Локално хидриране може да възникне и при отказ на ТОЕ и навлизане на пара, превръщайки се в източник на водород, получен от радиолиза, който впоследствие взаимодейства с вътрешната страна на обвивката. Този процес се нарича "вторично наводородяване" и е разгледан в следващата точка [9].

Повредата на горивото, причинена от локално наводородяване на обвивката от вътрешната страна се дължи главно на присъствието на влага или органични остатъци в ТОЕ. Въпреки че първичното наводородяване най-често е вследствие на производствени дефекти, обикновено се разглежда отделно, тъй като причината за повредата е подробно проучена. Предприети са ефективни мерки за предотвратяване на първичното наводородяване, включително внимателно изсушаване на таблетките и обвивката в процеса на производството им. Плътноста на таблетките на горивото напоследък е увеличена до 95% от теоретичната възможна плътност за този тип структура. Това е довело до намаляване на порьозността на таблетките и е спомогнало за намаляване на адсорбцията на влага. Понастоящем, възникването на повреда на гориво поради първично наводородяване е рядкост. Среща се предимно като резултат на случайни човешки грешки /или в контрола на качеството при производството [9].

Като пример може да посочим отказ на ТОЕ на първи блок на АЕЦ "Чинсон" (BWR). Коренната причина за повредите е била неправилно изсушаване на тръбичките на ТОЕ, вследствие на човешка грешка (невключване на сушилния след зареждане на тръбичките в нея). Някои откази във френски кипящи реактори също са вследствие на недостатъци при производството на ТОЕ. Изследвания в басейна за отлежаване на горивото са показали първично наводородяване вследствие на замърсяване на вътрешната повърхност на ТОЕ с материал, съдържащ водород [9].

3.6.2 Механизми на отказ

Освен влагата, замърсяването на ТОЕ с органичен материал също е източник на водород поради разлагането му чрез радиолиза. Кислородът реагира с таблетките и обвивката и

освобождава водород под обвивката. Докато натрупването на водород има равномерен характер, значителни последствия не възникват. Но, ако усвояването на водорода е локално ускорено поради някаква причина, се образува масивно наводородяване. Тъй като плътността на водорода е много по-ниска от тази на циркония, обвивката набъбва локално и в обвивката се образува област на повишени напрежения. Водородът се отлага перпендикулярно на напрежението и се образува т. н. "слънчево изригване" Фигура 3.6. Това масивно локализирано наводородяване води до циркониево-хидридни участъци и в крайна сметка до локален пробив на обвивката поради крехката природа на хидридите [9].



Фигура 3.6. Масивно локализирано наводородяване [9]

Както беше споменато по-горе, основният източник на водород в ТОЕ е остатъчната влага в таблетките. Водата се адсорбира главно в отворените пори по време на мокрото шлифование по време на производството. Количеството остатъчна влага в заредените таблетки в ТОЕ зависи от процедурите за сушене и манипулиране, както и степента им на порьозност. Сушенето на таблетките и обвивките на ТОЕ е стандартна процедура при производството на гориво. Стандартната плътност на таблетките в днешно време е 95% TD, а в някои BWR плътността на таблетките е увеличена до 96,5% TD, за да се намали отделянето на газ от делене при високи дълбочини на изгаряне. Таблетките с висока плътност имат по-малка степен на порьозност, което спомага за намаляване на остатъчната влага [9].

Масираното наводородяване може да започне, когато способността на защитният оксиден филм, да препятства проникването на водород силно намалее под някаква критична стойност, тъй като покритието на повърхността под тази критична стойност става нехомогенно. Вследствие на това, често се получава локално повишено отлагане на водород. Разглеждат се основно два механизма, които работят едновременно, за да се обясни как слоевете от циркониев оксид позволяват проникване на водород, [9]:

- Първо, механични дефекти като микропукнатини, пори, места на интерметални частици, както и граници на подзърна и дислокации са възможни пътища за преодоляване на оксидния корозионен филм, през които водородът може да влезе в пряк контакт с циркониевия материал;
- Вторият механизъм се отнася до разтворимостта и дифузията на водорода през оксидния филм при наличие на локално отсъствие на кислородни атоми в оксидния слой (субстехиометрични неравномерности), което позволява по-бързото преминаване на водорода през освободените от кислород места в решетката. Следователно много тънките оксидни слоеве са по-пропускливи за водород.

Понякога локални оксидни петна с ускорено наводородяване се наблюдават срещу радиални пукнатини в таблетките. По-горе беше споменато, че тези петна с високо съдържание на водород/оксид са резултат от локално взаимодействие между оксидния слой от вътрешната страна на ТОЕ от агресивни продукти на делене като цезий и йод [9].

3.6.3 Критерии които могат да бъдат нарушени

Както е показано по-горе, първично наводородяване може да възникне по редица причини и с различна тежест. При масирано първично наводородяване може да се достигне до отказ на ТОЕ с последващо освобождаване на продукти на делене в първи контур и от там до достигане и надвишаване на предела за нормална експлоатация по обща активност на топлоносителя, представен в параграф 2.3.

3.7 Вторични дефекти

3.7.1 Общо описание

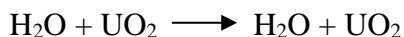
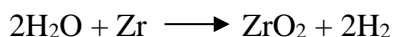
Вторичното наводородяване се получава след навлизането на пара в ТОЕ, вследствие на първичен дефект. Деградацията на ТОЕ, вследствие на вторично наводородяване, винаги е било наблюдавано в циркониевите обвивки и е широко изучена през 90-те години на миналия век. До 80-те години вторичното хидриране е било сериозен проблем при кипящите реактори (BWR), докато в реакторите с вода под налягане (PWR и ВВЕР), този феномен се е наблюдавал по-рядко [9].

3.7.2 Механизми за възникване и развитие

Последователността до събития, водеща до вторичен дефект е добре изучена. Процесът започва с първичен дефект, който позволява навлизането на топлоносител в ТОЕ. Първичният

дефект може да бъде вследствие на фретинг износване, дебриз повреди, взаимодействие на горивна таблетка/обвивка (PCI), както и производствени дефекти, като последните са значително редуцирани през последните години. Към сегашния момент, дебризът и фретинг износването на ТОЕ са най-честите причини за възникване на първичен дефект [9].

Когато водата навлезе в горивния прът през първичен дефект, тя се превръща в пара и започва да реагира с горивото и вътрешната повърхност на обвивката. Парата продължава да навлиза в пръта, докато се достигне равновесие с налягането в първи контур. Кислородът се отделя от парата чрез двете опростени корозионни реакции по-долу (процес, известен като парно гладуване) [9]:

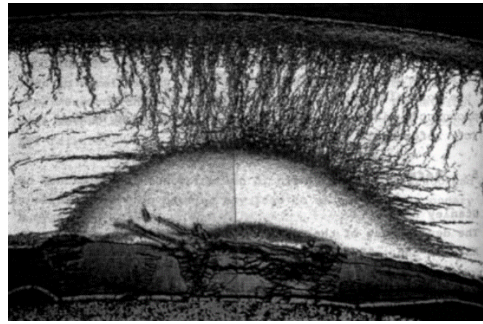


(3.1)

Парата също е обект на радиолитично разделяне, генерирайки допълнителен водород и водороден прекис H_2O_2 . По този начин газовата смес под обвивката непрекъснато се обогатява с водород, като максимума на концентрацията му се получава на известно разстояние от първичния дефект. Когато газовата смес стане достатъчно обогатена с водород, абсорбцията му настъпва чрез разграждане на защитния оксиден слой от вътрешната страна на обвивката. Установено е, че точното съотношение водород към пара, при което се получава бърза абсорбция (т. н. „критично съотношение“), зависи от редица променливи, включително типа на материала на обвивката, дебелина и цялост на оксидния слой, температура и налягане в средата. В серия от тестове при 350°C и 7 MPa (типично налягане в кипящ реактор), е установено, че критичното съотношение $\text{H}_2/\text{H}_2\text{O}$ за гъбест цирконий е между 1000 и 5000. Над тази стойност масивното хидриране е неизбежно, въпреки че може да се забави донякъде с по-дебели предварително създадени оксидни слоеве [9].

След преминаване на критичните условия за абсорбция, водородът бързо се абсорбира в обвивката. Този режим на абсорбцията му е много по-бърз от скоростта на дифузия на водорода в обвивката, като води до образуване на хидридни участъци по вътрешната повърхност на ТОЕ. При наличие на температурен градиент, водородът бавно се транспортира към външната повърхност. След достатъчно време целият водород над нивото на разтворимост ще се премести към външната повърхност и ще образува хидридни участъци по нея. В междинните етапи на

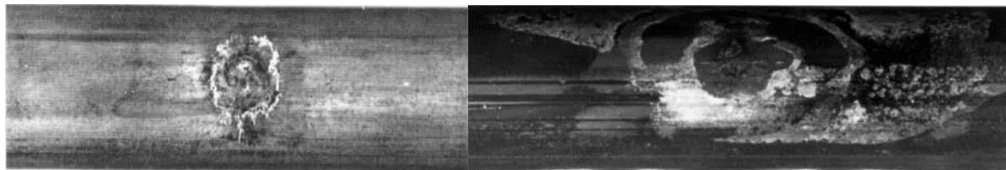
процеса, водородът се разпределя във вид на "слънчево изригване", както е показано на Фигура 3.7, [9].



Фигура 3.7. Водородът се разпределя във вид на "слънчево изригване" [9]

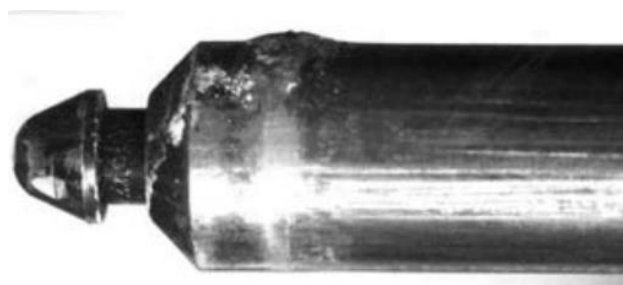
3.8 Примери за вторични повреди:

Различните видове вторични повреди, засягащи повредени пръти, се класифицират по следния начин: "Слънчево изригване". Тази повреда отразява локализирано хидриране, излъчвано от обвивката, Фигура 3.8.



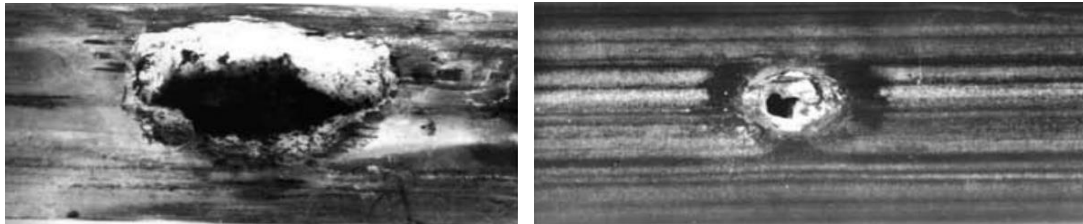
Фигура 3.8. Пример за издутини на обвивката [9]

„Блистер“ или „издутини“. Това е локално увеличение на обема на обвивката, отразяващо масивно хидриране, обикновено с радиален хидрид утаяване под „блистера“, Фигура 3.9.



Фигура 3.9. Локално увеличение на обема на обвивката [9]

Перфорация или дупки. Последният етап в еволюцията на „слънчевото изригване“ или „блистера“ е перфорация или дупки; горивото се вижда, Фигура 3.9.



Фигура 3.10. Пример за перфорация или дупки [9]

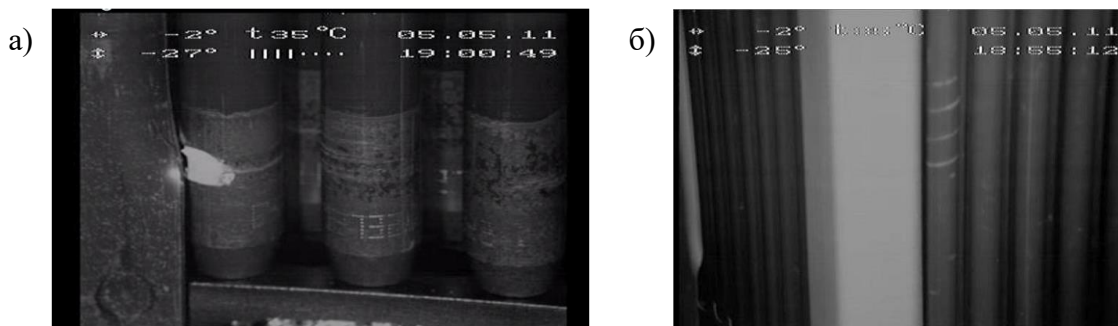
Малки пукнатини. Те могат да бъдат от различни видове, надлъжни, напречни или обиколни и често оставят „слънчеви изригвания“.



Фигура 3.11. Пример за малки пукнатини [9]

3.9 Пример от АЕЦ "Козлодуй"

За периода 2004-2015 г. една касета тип ТВСА, работила в състава на 16-та и 17-та горивна кампания на 5 ЕБ, е изведена от експлоатация поради разхерметизиране на ТОЕ [6].

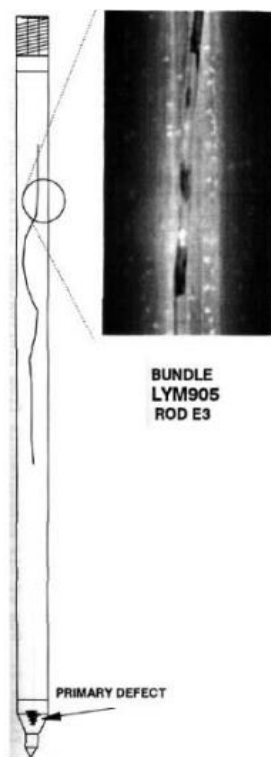


Фигура 3.12. Дефектирала касета в АЕЦ Козлодуй ЕАД [6]: а) Първичен дефект – дебриз; б) Вторичен дефект, вследствие на наводородяване в областта на притискащите пружини и Zr

3.10 Тежка деградация на ТОЕ

Деградацията на ТОЕ до степен над тази, разгледана по-горе, води до два специфични типа на сериозна повреда.

Една форма е осево разпукване, пример за което е показан на Фигура 3.13 на ТОЕ в кипящ реактор, [9].



Фигура 3.13. Осево разпукване на ТОЕ [9]

Аксиалните разцепвания могат да се образуват или чрез разширяване на първичен дефект или чрез инициране и растеж на вторичен хидрид. Видът на пътя за възникване и развитие зависи от размера на дефекта, разпределението на напрежението по обвивката на ТОЕ и параметрите на локалната среда вътре в ТОЕ. Увеличаващите се разцепвания вследствие на първичен дефект са особено интересни, защото разцепванията се образуват (по дефиниция) в окислителна среда, без признаци на масивно хидриране. Особеното значение на дългите аксиални пукнатини е, че те са склонни да причиняват голямо освобождаване на активност на отделен газ и също може да доведе до голямо замърсяване на топлоносителя чрез по-големи загуби на гориво. Макар и по-рядко, няколко случая на вторични аксиални разцепвания са докладвани и при PWR. Пример за отворено аксиално разцепване, наблюдавано върху повреден ТОЕ с PWR, е показан на Фигура 3.14, [9].



Фигура 3.14. Пример за напукан хидриден блистер [9]

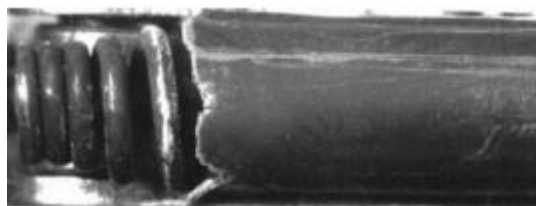
Дупката или напуканият хидриден блистер в средата на разцепването предполага, че пукнатината се е разпространила в двете посоки.

Друга форма на сериозна деградация е периферното счупване, при което обвивката е масивно хидрирана около голяма част от периметъра, за да се счупи буквално на две части. При PWR е наблюдавано вторично увреждане от хидриране през периферна пукнатина, както е показано на Фигура 3.15, главно при ТОЕ с високо изгаряне [9].



Фигура 3.15. Пример за периферно счупване [9]

При PWR понякога са били наблюдавани периферни счупвания в зона на заваряване на горната заглушка. Фигура 3.16 показва счупване в позицията на заварката на горна заглушка, като не е установено счупване на заглушката в долния край [9].



Фигура 3.16. Пример за периферни счупвания в зона на заваряване [9]

3.10.1 Критерии, които могат да бъдат нарушени

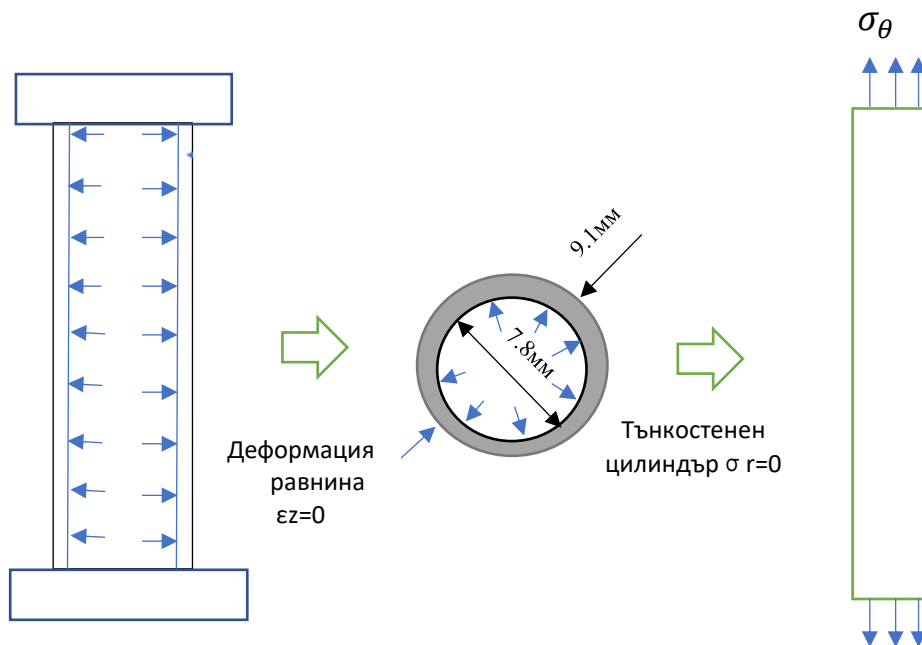
Развитието на вторичните дефекти зависят от много фактори, като най-главните от тях са размерът на първичния дефект и енергонатоварването на ТОЕ. До най-тежки последствия води тежката деградация на целостта на ТОЕ, вследствие на вторично наводородяване и окрежкостяване на обвивката. Резултатът от подобна тежка деградация е сравнително бързо надвишаване на предела за нормална експлоатация и твърде вероятно достигане на предела за безопасна експлоатация по обща активност на топлоносителя. В допълнение, поради голямата площ на пряк контакт с горивото, част от делящия се материал (в размер на килограми), преминава в топлоносителя на първи контур, което затруднява неговото почистване и допълнително повишава радиационния фон в херметичните помещения.

4 Моделиране на повредите на горивните елементи

Подходът с използването на диаграмата за оценка на повредите (ДОП) е базирана с помощта на подхода, създаден за първи път от бившия Central Electricity Generating Board (CEGB), след това разработена допълнително в Electric Power Research Institute (EPRI) в Великобритания, за да се оцени напрежението на повреда. Повредите на втората защитна бариера, обвивките на ТОЕ, могат да възникват в резултат на наводородяване под формата на хидридни кластери или облъчване с неутронен поток. При определени условия наводородяването може да бъде доминиращият фактор за влошаването на якостта на циркониевите обвивки, а не на ефекта на облъчване, в зависимост от разпределението и ориентационните състояния на хидридните кластери [11].

4.1 Метод на диаграма на за оценка на повредите

Деформацията в аксиално направление е ограничена до обвивката на ТОЕ, прието състояние на деформация по хоризонтална равнина, а аксиалната деформация е нула ($\epsilon_z=0$), както е показано на Фигура 4.1. Тъй като радиалното напрежение (σ_r) може да бъде пренебрегнато за такъв тънкостенен цилиндър, какъвто е обвивката на ТОЕ, подложени на вътрешното налягане, то се приема, че усилието е еквивалентно на тест за опън, както е показано на Фигура 4.1, [11].



Фигура 4.1. Моделиране на обвивка на ТОЕ под въздействието на вътрешни напрежения

Инженерният метод за анализ на структурните деформации е един от най използваните методи за анализ на цялостността на структури. Използват се два безразмерни параметъра, [11]:

$$K_r = \frac{K_I}{K_{IC}} \quad (4.1)$$

$$L_r = \frac{P}{P_y} \quad (4.2)$$

Където K_I е коефициент на интензивност на напреженията за съответният режим на деформация; P е приложената сила, а P_y е силата, която води до провлачване. Коефициентът K_I може да се пресметне като се разгледа като модел на пукнатина в средата на стена и в нейния край и се описва със следните формули [11]:

$$K_I = F\sigma\sqrt{\pi a} \quad (4.3)$$

За пукнатина в края на стената [11]:

$$F = 1,12 - 0,231\alpha + 10,55\alpha^2 - 21,72\alpha^3 + 30,91\alpha^4 \quad (4.4)$$

За пукнатина в средата:

$$F = (1 - 0,1\alpha^2 + 0,96\alpha^4)\sqrt{\sec(\pi\alpha)} \quad (4.5)$$

Където F е безразмерна константа която зависи от геометрията и режима на натоварване а параметърът α се определя като отношение на дължината на пукнатината a , спрямо дебелината на стената на ТОЕ, Фигура 4.2. Границата на силата за пластична деформация също е дефинираната за пукнатина на краищата и в средата на цилиндричната обвивка както следва [11]:

За пукнатина в края на стената:

$$P_y = 1,455\eta Bb\sigma_y \quad (4.6)$$

Където σ_y е напрежение на провлачане. За пукнатина в средата на стената:

$$P_y = \frac{4}{\sqrt{3}} B b \sigma_y \quad (4.7)$$

Където B е дебелината на стената, а b е дължината на хидрогенираната зона. За описанието на пукнатините виж Фигура 4.2. Параметърът η е дефиниран както следва [11]:

$$\eta = \sqrt{1 + \left(\frac{a}{b}\right)^2} - \frac{a}{b} \quad (4.8)$$

Параметърът K_{IC} се дефинира както следва:

$$K_{IC} = 44 [MPa\sqrt{m}] \quad (4.9)$$

Уравнението е приложимо при концентрация на водорода по малка от 10 wt. ppm.

Както се вижда от диаграмата, методът е води до крива на отказ, която се състои от непрекъснатата част ($K = K_{IC}$) и отсечен участък $L_r = L_r^{max}$, където [11]:

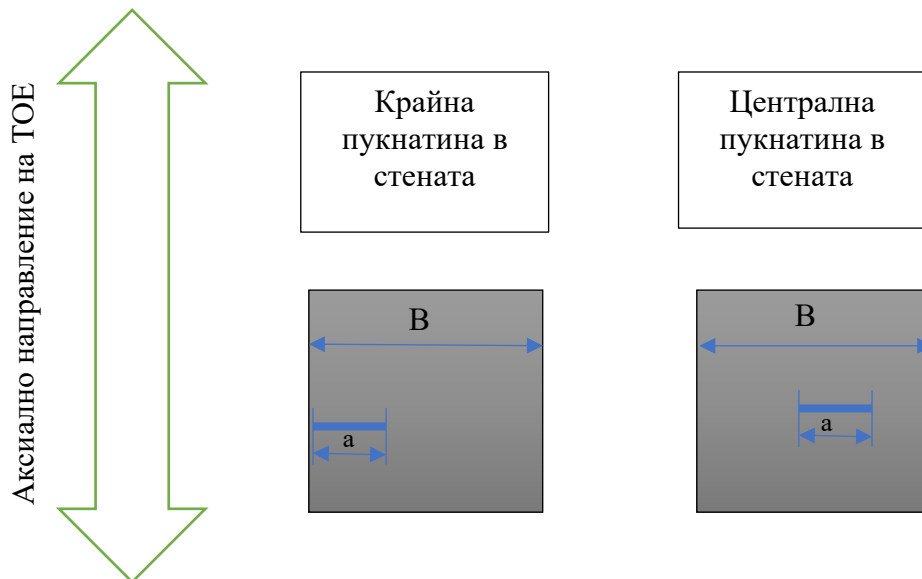
$$L_r^{max} = \frac{P_c}{P_y} = \frac{\sigma_f}{\sigma_y} \quad (4.10)$$

Където P_c е пластичната деформация на възникване на повреда, а σ_f е напрежението породено от флуидния поток на топлоносителя както следва [11]:

$$\sigma_f = \frac{\sigma_y + \sigma_u}{2} \quad (4.11)$$

Където σ_u е напрежение на опън.

Отсечената част от граничната крива може да зависи силно от облъчването на обвивката на ТОЕ.



Фигура 4.2 Илюстрация на симулирано разпределение на пукнатини, вследствие от взаимодействието с водород в стената на ТОЕ, където B е дебелината на стената на ТОЕ, а a е дължината на пукнатината, [11]

Обвивките, изработени от сплавта E110 показват, че зависимостта от облъчването им е много слаба и затова в настоящия анализ се пренебрегва. В резултат следната гранична крива се получава за стени от тип на ТОЕ за ВВЕР-1000 [11]:

$$K_r = \begin{cases} (1 - 0.14L_r^2)[0.3 + 0.7 \exp(-0.65L_r^6)], & L_r \leq L_r^{max} \\ 0, & L_r > L_r^{max} \end{cases}$$

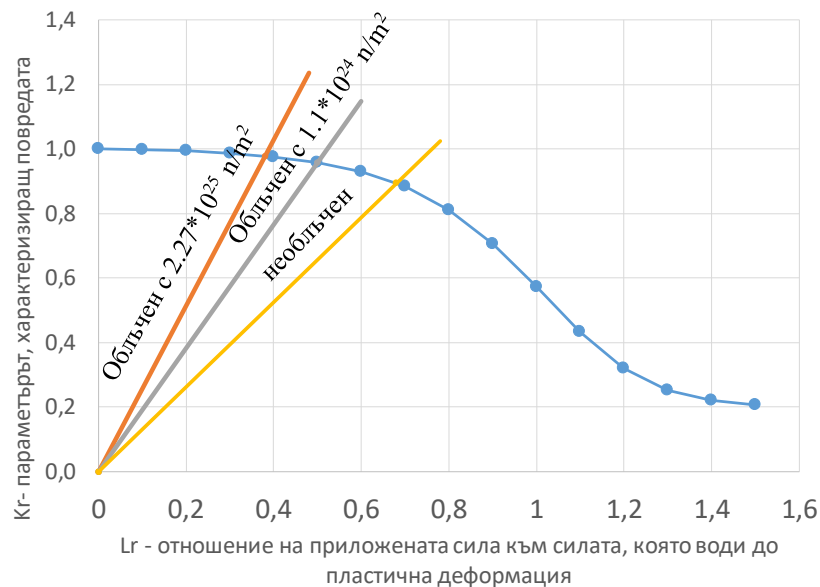
Отказите се получават когато получената точка на натоварване превишава стойностите на граничната крива.

4.2 Моделиране на откази поради хидрогениране

Поглъщането на водород и микроструктурното увреждане, причинено от въздействието на неутронните потоци, се случват едновременно в АкЗ. За циркониеви сплави последиците от съдържанието на водород и радиационното въздействие могат да бъдат комбинирани дори при стайна температура. За циркониевите сплави може да се отбележи, че има синергичен ефект от радиационното увреждане и поглъщането на водород като се намалява пластичността (окрежкостяване). Причината са или радиационно въздействие, или наводородяване (хидрогениране), доминираше основно здравината на обвивката. Изглежда обаче, че резултатът зависи от състоянията на разпределение на хидрида, тоест натрупването на хидрид и/или ориентацията на хидрида [11].

Като цяло водородни кълстери се образуват равномерно и техните равнини се ориентират в периферната посока на циркониевите обвивки. За реакторите с вода под налягане, за обвивките на ТОЕ с високо изгаряне може да се очаква водородни кълстери обикновено да се натрупват локално под външната повърхност на обвивките поради радиалния топлинен градиент. Възможен е обаче вариант при който образуването на плътни хидриди и ориентирането им в радиалната посока на хидридите са един от основните фактори за окрежкостяване на обвивки с висока степен на изгаряне. Следователно, такива обвивки с радиални хидриди може да причини влошаване на здравината на обвивката [11]. Такива кълстери могат да предизвикат йодни спайк-ефекти при нормална експлоатация.

По принцип, матрицата и циркониевият хидрид са съответно в делта-фаза на $ZrH_{1.73}$ ($\delta ZrH_{1.73}$). Тъй като крайната разтворимост на водорода в твърдото вещество на Zircaloy е пренебрежимо малка, то при стайна температура се приема, че целият водород, абсорбиран в Zircaloy се изразходва за формиране на хидрида. Нека средната концентрация на водород в топлоносителя да се приеме за 0,250, 500, 750 и 1000 ppm. При съдържание на водород около 1000 ppm, обемното съотношение на $\delta ZrH_{1.73}$ към Zircaloy може да достигне до около 6%. Така обемното съотношение на хидрида е съответно 0.0, 1.5, 3.0, 4.5 и 6.0%, [11].



Фигура 4.3 Диаграмата за оценка на повредите за необлъчен и облъчен модел с дължина на пукнатина с отношение 0,2

На фигура 3.3 е показано ДОП, когато съотношението на дължината на пукнатина към ширината на обвивката на ТОЕ са 0,2. В тази диаграма точките за оценка с координатите (Lr, Kr) за всеки флуенс са показани като линии за увеличаване на натоварването. Такова

натоварване може да се получи когато в след хидриране на циркониевата обвивка, реакторът се е оказал в режим на RIA (Reactivity initiated accident). В този режим се отделя много топлина за кратко време вследствие на непланова поява на положителна реактивност. Пресечната точка на линията за увеличаване на натоварването и FACS съответства на началото на повреда. Като е показано на тази диаграма, наклонът на линията се увеличава с увеличаване на флуенса и съотношението на дължината на пукнатината. По-стръмният наклон на линията предполага, че подходът на линейно еластичната механика на счупване може да бъде валиден [11].

5 Заключение

В дипломната работа беше направен преглед на дефектите, които се появяват при нормална експлоатация на ядреното гориво. Разгледани бяха основните механизми на тяхната поява. Режимът на наводородяване беше идентифициран като един от най-опасните и беше предложен механизъм за оценка на последствията в резултат на появяването му.

Поддържането на целостта на циркониевата обвивка на ТОЕ е от съществено значение за предотвратяването на директен контакт между горивната таблетка (UO_2 и продукти на деленето) и топлоносителя (първи контур) В случай на отказ на горивото при ВВЕР, първи контур е достатъчна бариера за задържането радиоактивни изотопи като Хе, Кр, I и други,. В такъв случай се налага спиране на ядрения енергоблок при достигане на критериите за НЕ. Отказалите горивни касети трябва да бъдат извадени от АкЗ, ако отделянето на йодни изотопи надвишава пределните стойности за нормална експлоатация, заложен в технологичния регламент [12].

На база дългогодишен опит в експлоатацията на ЯЦ са въведени строги изисквания за манипулации с отказало гориво. Вероятността от повреда на горивото да се превърне в проблем, свързан с безопасността, е сведена до минимум. Въпреки това могат да възникнат значителни икономически последици, които могат да са: загуба от производство на електроенергия, подмяна на гориво, замърсяване на околната среда с радиоактивни продукти, повишено излагане на персонала под въздействието на радиация, увеличени разходи при евентуална подмяна на гориво преди изтичането на срока на експлоатация и други [12].

6 Използвана литература

- [1] NRC, „The U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) web site,“ NRC, 25 January 2022. [Онлайн]. Available: <https://www.nrc.gov/reading-rm/basic-ref/glossary/iodine-spiking-factor.html>. [Отваряно на 7 September 2022].
- [2] М. Л. Георги Глухов, Ядрени реактори и парогенераторни инсталации, София: СИЕЛА, 1999.
- [3] Г. Глухов, Ядрени енергийни реактори, София: ИФО Дизайн ООД, 2004.
- [4] И. Христосков, Записки на лекционния курс по Физика на ядрените реактори, София: СУ "Св. Климент Охридски", юни 2021 г.
- [5] Г. Г. Мико Лаков, Основи на ядрената енергетика, София: СИЕЛА, 1999.
- [6] Архив на АЕЦ "Козлодуй".
- [7] НАРЕДБА за осигуряване безопасността на ядрените централи, София: Държавен вестник, 2016.
- [8] P. Petkov, „Operational limits and conditions for VVER-1000, and protection systems for VVER fuel: Limits and conditions for normal operation,“ в *IAEA TRAINING WORKSHOP*, Sofia, 2020.
- [9] IAEA, „Review of Fuel Failures in Water Cooled Reactors,“ IAEA, Vienna, 2010.
- [10] К. Ф. Владимир Велев, Ядрени горива, София: ИФО Дизайн ООД, 2008.
- [11] S. Y. Masatoshi KURODA, „Assessment of the Combined Effects of Irradiation and Hydrogenation on the Fracture Behavior of Zircaloy Fuel Claddings by Fracture Mechanics,“ *Journal of Nuclear Science and Technology*, том 39, № 3, pp. 234-240, 2002.
- [12] R. L. Y. Bo Cheng, „Fuel Failure Experiences in U. S. Light Water Reactors,“ в *GENES4/ANP2003*, Kyoto, 2003.