

При цьому в структурі матеріалу оболонки утворюються локальні неоднорідності, мікропори та макротріщини, а як результат, виникають наскрізні тріщини, які призводять до розгерметизації ТВЕЛ і викиду продуктів поділу ядерного палива (ЯП) в теплоносій [125, 126]:

У зв'язку з цим необхідно дослідити і вивчити характер і ступінь можливих пошкоджень і руйнувань оболонки ТВЕЛ при різних технологічних та експлуатаційних факторах при працездатності ТВЕЛ.

### **1.2.3.2 Аналіз видів і причин утворення ушкоджуючих дефектів на зовнішній і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ**

Розглянемо види та причини утворення ушкоджуючих дефектів на зовнішній та внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ. Слід зазначити, що багато причин часто пов'язаних між собою, перетинаються чи накладаються друг на друга. При цьому, як відомо [12, 13], у багатьох випадках (20%), причини виходу ТВЕЛ з ладу залишаються невідомими.

У роботах [14, 15], показано, що значна увага приділяється зміні розмірів цирконієвої оболонки ТВЕЛ, в залежності від зовнішніх умов експлуатації та внутрішньотвельних механізмів впливу.

У роботі [16], результати післярадіаційних досліджень 800 ТВЕЛ SGHWR, показали, що при експлуатації, ТВЕЛ подовжилися приблизно на 0,4% (16 мм), що призвело до пошкодження та розгерметизації оболонки ТВЕЛ.

Зміна діаметра та форми в поперечному перерізі відбувається через [12 – 16]:

- радіаційне ущільнення ТЯП, внаслідок чого між ТЯП та оболонкою утворюються зазори, в які нерівномірно вдавлюється оболонка за рахунок повзучості, під тиском теплоносія;

- досить високих вигорань ТЯП, що викликають крихкість.

Зм'яття оболонки ТВЕЛ призводять до наступних наслідків:

- у місцях найбільш різких змін форми оболонки, радіус кривизни на зім'ятій ділянці може досягати 0,5...0,6 мм;

– локальна деформація може сягати понад 20%.

Таким чином, перевищення встановлених значень радіусу кривизни та локальної деформації на зім'ятих ділянках можуть призвести до виникнення наскрізних тріщин в оболонці ТВЕЛ.

При цьому важливе значення мають вихідні допуски в оболонках на овальність, на ексцентриситет, які особливо проявляються при знижених властивостях міцності оболонок ТВЕЛ.

Механічна взаємодія ТЯП з оболонкою (ефект подовження ТВЕЛ) виникає при зміні режимів коливання потужності ЯР і залежить:

- від зміни діаметрального зазору між паливом та оболонкою;
- від довжини, форми та щільності ТЯП;
- від товщини та міцності оболонки ТВЕЛ.

У роботах [12 – 16], було встановлено, що подовження ТВЕЛ, зростає зі збільшенням висоти та щільності ТЯП.

Зі зменшенням початкового діаметрального зазору, зі зменшенням товщини та міцності оболонки.

Вигини оболонки ТВЕЛ (викликають дотик та локальні перегриви оболонки), виникають через наступні фактори та причини [12 – 16, 127]:

- вичерпання проектного запасу на подовження у зазорах між ТВЕЛ та кінцевими деталями ТВЗ або конструкціями ядерного реактора;
- залишкові напруги в оболонках, що виникли під час виготовлення, і навіть під час експлуатації ТВЕЛ;
- радіаційне зростання матеріалу оболонки;
- низький рівень термомеханічної обробки матеріалу оболонки;
- перепад температури за радіусом ТВЗ та перерізом оболонки ТВЕЛ;
- жорстка механічна взаємодія оболонки з решіткою ТВЗ;
- різноосність оболонки та її взаємодія з ТЯП.

Явище радіаційного розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, пов'язане з тим, що цирконієвий сплав, який опромінюється, пересичений точковими дефектами [18, 19].

Отже, є причиною появи та розвитку об'ємних скупчень у вигляді вакансійних пір (розміром близько 10 нм), що призводить до загального збільшення його об'єму (до 6%), тобто до розпухання [128].

До небажаних наслідків розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, слід віднести деформацію, вигини та збільшення геометричних розмірів ТВЕЛ.

В результаті цього, може відбутися самозварювання та заклинювання окремих елементів ТВЕЛ, а також перегрів всередині працюючих елементів ТВЕЛ, що призведе до зниження ступеня герметичності ТВЕЛ.

Таким чином, питання про розмірні зміни геометричних параметрів ТВЕЛ реактора типу ВВЕР-1000 вимагає постійної уваги і вивчення, оскільки воно може виявитися одним з вирішальних факторів, що призводить до руйнувань оболонки ТВЕЛ.

Розгляд та аналіз основних факторів та причин, що впливають на зміну геометричних параметрів ТВЕЛ, які можуть призвести до пошкодження та розгерметизації оболонки ТВЕЛ, показав та виявив найбільш ймовірні ділянки пошкодження оболонки ТВЕЛ, через внутрішні чинники, до яких відносяться (рис. 1.5) [129]:

- окислення, плавлення та переміщення елементів активної зони;
- вихід продуктів поділу з газового зазору в перший контур;
- вихід продуктів поділу з таблетки ядерного палива в газовий зазор;
- деформація та розрив оболонки;
- накопичення продуктів поділу в зазорі між таблетками ядерного палива та внутрішньою поверхнею оболонки ТВЕЛ.

Таким чином, зміна діаметра та довжини ТВЕЛ, в процесі експлуатації обумовлені розмірними змінами цирконієвих оболонок ТВЕЛ.

При цьому, розглядаючи зміну геометричних параметрів ТВЕЛ ядерного реактора типу ВВЕР-1000, у процесі експлуатації можна виділити дві основні стадії:

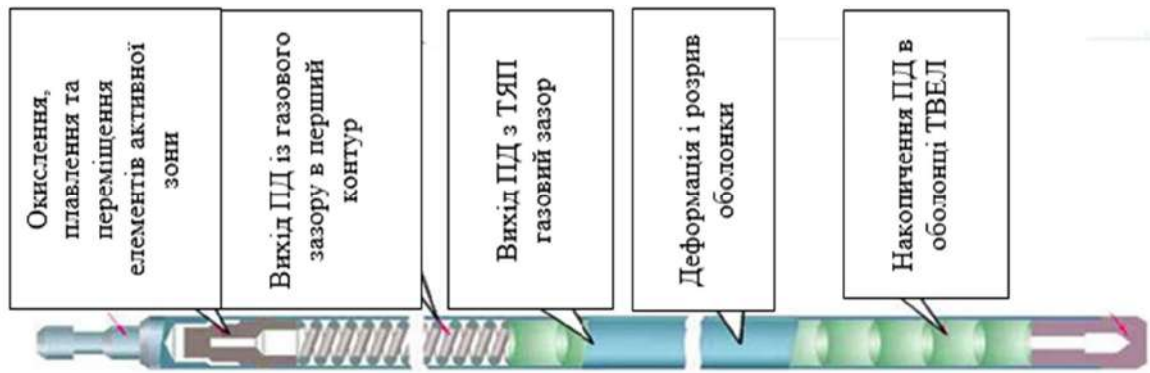


Рис. 1.5. Основні ймовірні ділянки пошкодження оболонки ТВЕЛ через внутрішні чинники

*перша стадія* – до виникнення контакту між паливом та оболонкою:

- зменшення діаметра оболонки за рахунок радіаційно-термічної повзучості під дією перепаду тисків контур-ТВЕЛ;

- подовження ТВЕЛ за рахунок радіаційного зростання, повзучості в осьовому напрямку та впливу з боку паливного сердечника за механізмом “храповика” (якщо відбувається заклинювання таблеток).

*друга стадія* – після виникнення щільного контакту між паливом та оболонкою:

- збільшення діаметра оболонки за рахунок збільшення (розбухання) вигорання таблеток ядерного палива.

### 1.2.3.3 Дослідження механізму розгерметизації ТВЕЛ

Розглянемо механізм розгерметизації оболонки ТВЕЛ за різних умов експлуатації.

Як відомо [130 – 135], під механізмом розгерметизації оболонки ТВЕЛ, розглядається процес локального роздуття оболонки ТВЕЛ під дією надлишкового внутрішнього тиску з утворенням поздовжньої тріщини, при цьому в поздовжньому та окружному напрямку деформування оболонки характеризується великими пластичними деформаціями, у радіальному напрямку практично 100% утоншення місця розриву.

Як відомо [130 – 135], конструкційні матеріали оболонки ТВЕЛ працюють в екстремальних умовах: за високих температур, великих механічних напругах, високих дозах опромінення.

У термоядерних пристроях ядерних реакторів АЕС, кристалічна структура матеріалів оболонок ТВЕЛ, постійно зазнає змін на атомному рівні: у ній утворюються різні типи дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор та макротріщин, які призводять до таких фізичних ефектів як: розпухання, крихкання, зміцнення, повзучість, плинність, набрякання.

Розглянемо зміни фізичних властивостей та структурно-фазового стану, що відбуваються у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, під впливом різних зовнішніх та внутрішніх ушкоджувальних дефектів.

Радіаційні дефекти відбуваються у матеріалах структури оболонки ТВЕЛ ядерного реактора АЕС, тобто там, де матеріали стикаються з інтенсивними потоками опромінення. Через появу великої кількості радіаційних дефектів, матеріали структури оболонки ТВЕЛ змінюють свої фізичні властивості: електропровідність, міцність, об'ємні розміри і навіть елементний склад через появу в них ізотопів нових елементів. Крім того, були виявлені абсолютно нові явища, що відбуваються з опроміненими металами та сплавами оболонки ТВЕЛ: радіаційне крихтіння, прискорена дифузія, радіаційно-індуковані фазово-структурні перетворення; радіаційно-стимульована дифузія; радіаційно-індуковані фазові перетворення у твердих тілах; блістеринг (утворення газових бульбашок поблизу поверхні кристалів); утворення зверхрешітчастих дефектів та багато іншого [136, 137].

Розглянемо явище радіаційного розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, яке пов'язане з тим, що цирконієвий сплав ( $Zr + 1 \% Nb$ ), який опромінюється, пересичений точковими дефектами, а, отже, є причиною зародження та розвитку об'ємних скупчень у вигляді вакансійних пір (розміром близько 10 нм), що призводить до загального збільшення об'єму (до 6%), тобто до розпухання. До найнебажаніших наслідків розпухання структури матеріалу оболонки ТВЕЛ слід віднести деформацію, вигини та збільшення геометричних розмірів ТВЕЛ, що може призводити до самозварювання та заклинювання окремих елементів ТВЕЛ, а також

перегріву всередині працюючих елементів ТВЕЛ [138 – 140].

Результати експериментальних досліджень радіаційного розпухання, проведені в роботах [136 – 140], показали закономірності ступеня розпухання матеріалу: залежність від температури, інтенсивності та потоків опромінення, механічних напруг, а також стану структури та хімічного складу матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Розглянемо ефект радіаційного зміцнення та крихтування матеріалу оболонки ТВЕЛ, який утворюється у процесі опромінення.

Як відомо [136 – 140], радіаційні дефекти викликають суттєву зміну характеристик міцності матеріалу (напруга зсуву, межі плинності та міцності, твердість).

В результаті опромінення матеріалу оболонки ТВЕЛ, майданчик плинності як би згладжується і межа плинності за своєю величиною наближається до руйнівної напруги.

У роботах [136, 140] показано, що межі плинності цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ збільшуються зі зростанням дози опромінення. Тому ефект зростання межі плинності під опроміненням викликає радіаційне зміцнення.

Отже, радіаційне зміцнення майже завжди супроводжується значним зменшенням пластичності опромінених матеріалів – явищем радіаційного крихтіння. Тому неважко припустити, що між радіаційним зміцненням та охрупчуванням існує певний зв'язок. З'ясування природи явища радіаційного зміцнення дозволяє встановити можливі причини радіаційного крихтіння.

У роботі [141] наголошується, що основними причинами радіаційного крихтіння є зменшення пластичності опроміненого матеріалу оболонки ТВЕЛ, яке обумовлене зниженням міцності меж зерен внаслідок утворення та зростання гелієвих бульбашок та виділень інших трансмутантів.

Розглянемо ефект прискореної повзучості оболонки ТВЕЛ, який утворюється в процесі опромінення матеріалу оболонки ТВЕЛ.

Як відомо [142], якщо до матеріалу оболонки ТВЕЛ, додати розтягуючу напругу, яка не перевищує межі текучості матеріалу, то при досить високих температурах матеріал почне деформуватися (подовжуватися), тобто відбувається

ефект пластичної деформації (повзучість) матеріалу.

Конструкційні вузли та деталі ТВЕЛ, сучасних ядерних енергетичних установок перебувають у напруженому стані і зазвичай працюють при підвищених температурах. Тому однією з головних причин зміни геометричних розмірів ТВЕЛ, поряд з набряком, є повзучість, яка значно посилюється під опроміненням [143, 144].

При цьому необхідно зазначити, що для цирконієвого сплаву оболонки ТВЕЛ швидкість радіаційної повзучості значно вища, ніж швидкість термічної повзучості.

Аналіз теоретичних моделей [145], які пояснюють радіаційно-прискорену повзучість, показав, що точкові дефекти, що утворюються в процесі опромінення у вигляді кластерів, мікропор і макротріщин, прискорюють процес деформації під напругою.

Останній ефект найчастіше є суттєвіший, саме тому під впливом опромінення швидкість повзучості зростає.

Крім того, більша частина теоретичних моделей радіаційної повзучості так чи інакше включають процеси переповзання дислокацій в результаті поглинання ними точкових дефектів у вигляді локальних неоднорідностей, мікропор і макротріщин [146].

У полі зовнішньої напруги з'являється додаткова взаємодія дислокації з точковими дефектами, яка зумовлена різницею пружних констант матриці і точкових дефектів, тобто відбувається так званий модульний ефект.

В результаті дислокації, по-різному орієнтовані по відношенню до навантаження, неоднаково поглинаючи точкові дефекти призводять до відмінності їх швидкостей переповзання і в кінцевому рахунку до спрямованої деформації структури матеріалу ТВЕЛ [147 – 153].

#### **1.2.3.4 Аналіз впливу зовнішніх факторів на поверхню оболонки ТВЕЛ**

В залежності від особливостей умов експлуатації цирконієвих оболонок ТВЕЛ в реакторі, вплив зовнішніх факторів (теплоносій, водень, кисень та ін.) на їхню працездатність може бути різним і буде визначатися або характеристиками в'язкості

руйнування при короткочасному впливі значних розтягуючих зусиль, наприклад при вивантаженні з реактора, або швидкістю зростання тріщин у виробках в процесі експлуатації в результаті уповільненого гідридного розтріскування під дією залишкових технологічних та експлуатаційних напруг.

В'язкість руйнування (тріщиностійкість) визначається також як схильність цирконієвих матеріалів оболонок ТВЕЛ, до утворення в них тріщин при експлуатації [154].

Виникнення тріщин відбувається як у зовнішній, так і внутрішній поверхні оболонки ТВЕЛ. Тріщини є напівеліптичними, їх розвиток відбувається не в одному (осьовому, тангенціальному чи радіальному), а одночасно у 2-х напрямках: осьовому та радіальному чи тангенціальному та радіальному. Крім того, цирконієвий сплав оболонки ТВЕЛ, має анізотропію властивостей у різних напрямках (відмінність властивостей середовища в різних напрямках усередині цього середовища).

Щоб зробити більш повні висновки про зміну структурно-фазового стану, під дією зовнішніх ушкоджуючих і руйнівних факторів (теплоносія, водню, кисню тощо), які призводять до зміни в'язкості руйнування (тріщиностійкості) і розвитку процесу уповільненого гідридного розтріскування оболонки ТВЕЛ, необхідно досліджувати ці процеси у різних напрямках, характерних для даного структурно-фазового стану матеріалу оболонки ТВЕЛ [155].

### **1.3 Дослідження процесу утворення ушкоджуючих дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ з позицій кластерного підходу**

Зміна діаметру и довжина ТВЕЛ в процесі експлуатації обумовлені розмірними змінами оболонок. З початку експлуатації під дією надлишкового тиску теплоносія діаметр ТВЕЛ зменшується.

У міру збільшення вигоряння темп зменшення падає до нуля, після чого діаметр оболонки починає збільшуватися. Одночасно зі зменшення діаметра оболонки відбувається збільшення діаметра паливних таблеток – розпухання палива, що призводить до зміни структури матеріалу оболонки ТВЕЛ, тобто появи у структурі



матеріалу, різного розміру мікропор та макротріщин, які заповнюються молекулами гелію [156].

Таким чином, з огляду на аналіз фізико-хімічних процесів у матеріалі оболонки ТВЕЛ, у процесі експлуатації ЯР типу ВВЕР та впливу всіх вище перерахованих факторів та їх наслідків, у роботі було запропоновано, розглядати процес виникнення первинних та вторинних дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ, на основі кластерної теорії .

Розглянемо процес утворення дефектів у структурі матеріалу оболонки ТВЕЛ з позицій кластерного підходу [157, 158].

При впливі факторів руйнування на зовнішню і внутрішню поверхню матеріалу оболонки ТВЕЛ, відбувається первинний дефект у вигляді мікропор розміром до 5 мкм (рис. 1.6), які відповідно до кластерної теорії, можна прийняти у вигляді окремого кластера (рис. 1.7).

Подальше збільшення кількості мікропор (кластерів) призводить до утворення макропор до 500 мкм (рис. 1.6) і відповідно до утворення кластерних агрегацій (рис. 1.7).

Далі, при підвищенні температури і тиску між внутрішньою поверхнею оболонки і зовнішньою поверхнею ядерного палива, збільшення концентрації інертних небезпечних газів, відбувається злиття макропор (кластерних агрегацій), що призводить до наскрізних макротріщин (кластер –кластерних структур), а, отже, до появи вторинного дефекту пошкодження оболонки ТВЕЛ [157, 158].

Таким чином, отримана в результаті вторинного дефекту, кластер – кластерна структура (рис. 1.7), являє собою пористу неоднорідну структуру, яка як відомо, має специфічні фрактальні властивості.

Тому, в роботі, запропоновано провести дослідження механізму пошкодження зовнішньої і внутрішньої поверхні структури матеріалу при утворенні дефектів в оболонці ТВЕЛ, для встановлення факту його розгерметизації, на основі обчислювального апарату фрактально-кластерної теорії.

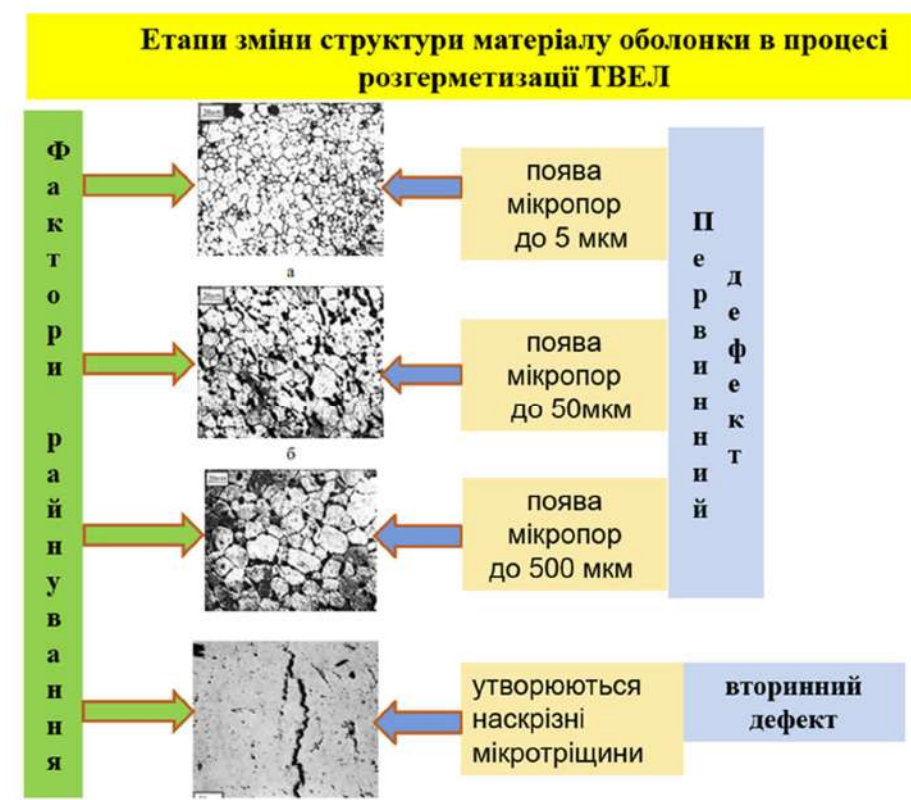


Рис. 1.6. Процес утворення первинних і вторинних дефектів при ушкодженості структури матеріалу оболонки ТВЕЛ

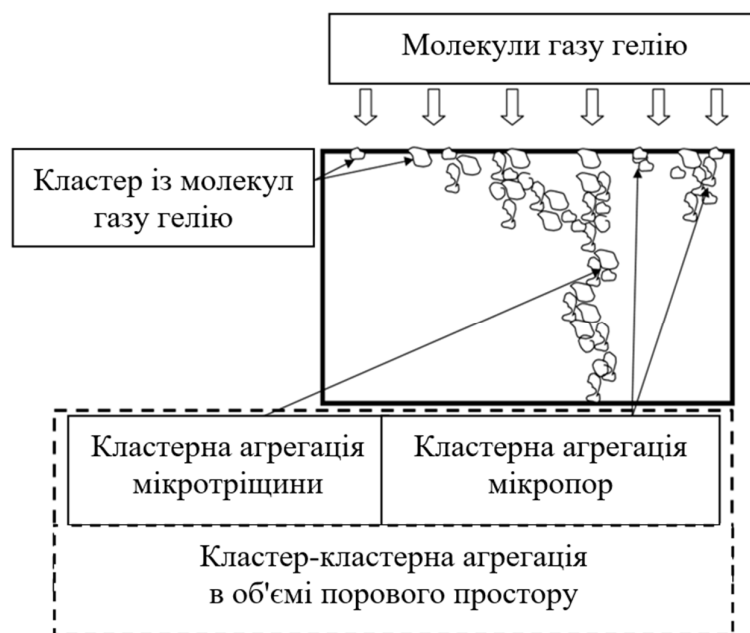


Рис. 1.7. Процес утворення кластер-кластерної агрегації в об'ємі структури матеріалу з пошкодженою поверхнею