

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ЧЕМЕРИС АНДРІЙ ОЛЕГОВИЧ**

УДК 004.942:[539.421+66.023](043.3)

**НАДІЙНІСТЬ І ДОВГОВІЧНІСТЬ МАШИН ТА АПАРАТІВ ХІМІЧНИХ  
ВИРОБНИЦТВ З УРАХУВАННЯМ ЕВОЛЮЦІЇ ЇХ РУЙНУВАННЯ**

05.05.13 - машини та апарати хімічних виробництв

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Київ – 2018

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» Міністерства освіти і науки України.

**Науковий керівник:** доктор технічних наук, професор  
**Гондляр Олександр Володимирович**,  
Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,  
професор кафедри хімічного, полімерного та силікатного  
машинобудування

**Офіційні опоненти:** доктор технічних наук, професор  
**Нагурський Олег Антонович**,  
Національний університет «Львівська політехніка»  
МОН України,  
завідувач кафедри цивільної безпеки

кандидат технічних наук, доцент  
**Топоров Андрій Анатолійович**,  
Державний вищий навчальний заклад «Донецький  
національний технічний університет» МОН України,  
виконуючий обов'язки завідувача кафедри обладнання  
перероблювальних технологічних комплексів

Захист відбудеться «6» березня 2018 р. о 14<sup>30</sup> годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05 у Національному технічному університеті України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37, корп. 19, ауд. 201/1.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» за адресою: 03056, м. Київ, просп. Перемоги, 37.

Автореферат розісланий «6» лютого 2018 р.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради Д 26.002.05



О. І. Іваненко

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Складні умови експлуатації машин та апаратів хімічних виробництв, вихід з ладу яких призводить до великих матеріальних втрат та потребує суттєвих коштів на відновлення та ремонт, а також може завдавати значної шкоди оточуючому середовищу та здоров'ю людей, суттєво підвищують вимоги, що висуваються до створення нового та удосконалення існуючого обладнання хімічних підприємств для забезпечення необхідних умов реалізації хіміко-технологічних процесів.

На сьогоднішній день широке розповсюдження в хімічних виробництвах знайшли такі просторові конструкції, як: різного роду сховища, ємності, трубопроводи, що працюють під високим тиском, теплообмінні агрегати, обертові печі, різноманітне допоміжне обладнання, як то муфти, вали та ін., які забезпечують належне виконання технологічних процесів. Такі об'єкти зазвичай працюють в складних умовах: наявність агресивних середовищ, істотна різниця внутрішніх і зовнішніх тисків і температур, неминучий вплив навколишнього середовища.

В світі щоденно реєструється до 20 аварій техногенного характеру, пов'язаних з викидами хімічно активних речовин в оточуюче середовище, основними причинами яких експерти називають, в першу чергу, виникнення та накопичення дефектів в обладнанні, і лише потім – відхилення від технологічних норм експлуатації та людський фактор. За даними інспекційних агенцій США статистика відмов посудин високого тиску хімічної та нафтохімічної промисловості свідчить про те, що понад 94 % відмов відбувається саме через розвиток в них тріщин, з них 24 % від тріщин втомного походження, 14 % - від тріщин корозійного типу та 29 % - від технологічних тріщин.

Тому актуальною є розробка нових методів дослідження, розрахунку й конструювання машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюційних процесів накопичення та розповсюдження в них дефектів і тріщин для підвищення показників їх надійності та довговічності.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Роботу виконано на кафедрі хімічного, полімерного та силікатного машинобудування Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» відповідно до наукових планів фундаментальних і прикладних досліджень Міністерства освіти і науки України: «Моделювання тріщиноутворення в обладнанні теплових та атомних електростанцій на базі чисельних досліджень», № ДР 0103U00020, автор – виконавець теми; «Моделювання процесів утворення і розповсюдження тріщин в конструкціях хімічного обладнання з урахуванням експлуатаційних факторів», № ДР 0110U002272, автор – виконавець теми; «Методи розрахунку еволюції напружено-деформованого стану обладнання атомних електростанцій з урахуванням зон руйнування від впливу сейсмічних навантажень», № ДР 0113U000685, автор – виконавець теми.

**Мета і задачі дослідження.** Метою даної роботи є розробка нових методів розрахунку просторових конструкцій хімічних виробництв з урахуванням нелінійних процесів розповсюдження в них тріщин для підвищення показників їх

надійності і довговічності. Комплексне дослідження поставленої задачі передбачає вирішення наступних задач:

1. розробку методів побудови розрахункових моделей обладнання хімічних виробництв;
2. розробку методів визначення граничних умов для об'єктів хімічної промисловості;
3. розробку методів реагування в реальному часі на позаштатні ситуації, що виникають при експлуатації обладнання хімічної промисловості, з оперативною видачою рішення про можливі наслідки;
4. розробку методів прогнозування виникнення мікродефектів в обладнанні хімічної промисловості під час його експлуатації;
5. розробку методів моделювання процесів накопичення дефектів та руйнування в обладнанні хімічної промисловості, що працює в умовах статичного і циклічного навантаження;
6. розробку методів прогнозування довговічності обладнання хімічної промисловості.

*Об'єкт дослідження* - життєвий цикл обладнання хімічної промисловості на стадії проектування та експлуатації.

*Предмет дослідження* - машини та апарати хімічних виробництв, що знаходяться під дією складних статичних і циклічних навантажень.

**Методи досліджень.** Поставлені в роботі завдання вирішуються на базі моментної схеми скінченних елементів (МССЕ) з застосуванням ітераційно-аналітичної теорії оболонок, модифікованого методу дискретно-віртуального моделювання просування тріщини та сучасного математичного апарату метода скінченних елементів (МСЕ). Дані натурних експериментів використовуються для верифікації розроблених методів, алгоритмів та числових моделей об'єктів хімічної промисловості.

#### **Наукова новизна отриманих результатів:**

1. Розроблено модифікацію метода дискретно-віртуального просування тріщин та зон розшарування для дослідження процесів руйнування просторових конструкцій хімічної промисловості в процесі їх експлуатації.
2. Вперше проведена адаптація ітераційно-аналітичної теорії просторових конструкцій, в тому числі багат шарових, стосовно до вирішення задач надійності та довговічності об'єктів хімічної промисловості з урахуванням накопичення та розповсюдження в них дефектів.
3. Вперше розроблено новий багат шаровий уточнений скінченний елемент (СЕ), для коректного моделювання процесу розповсюдження зон розшарування.
4. Розроблено методи розрахунку, які дозволяють оцінювати надійність та довговічність елементів обладнання хімічних виробництв в залежності від зміни жорсткості його елементів в процесі їх експлуатації.
5. Розроблено та чисельно реалізовано алгоритми для моделювання еволюції розповсюдження тріщин та зон розшарування в елементах обладнання хімічних виробництв з урахуванням історії їх навантаження в процесі експлуатації.
6. Розроблено системи безперервної інформаційної підтримки об'єктів хімічної промисловості, що дозволяють моделювати їх життєвий цикл на стадії проектування

та виконувати моніторинг обладнання в процесі експлуатації з урахуванням штатних, а також позаштатних, в тому числі і аварійних, ситуацій.

### **Практичне значення одержаних результатів:**

1. Розроблені автоматизовані системи безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу об'єктів хімічної промисловості, що дозволяють не тільки виконувати моніторинг обладнання в процесі його експлуатації, але також прогнозувати сценарії можливого розвитку зон руйнування при виникненні позаштатних або аварійних ситуацій.

2. Результати виконаних в дисертації досліджень використовувались при складанні регламенту технічного обслуговування елементів обладнання парогенератора.

3. Результати виконаних в дисертації досліджень використовувались при проектуванні пластинчастої муфти на ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш».

4. За результатами роботи була проведена модернізація вузла з'єднання вінцевої шестерні с корпусом обертової печі, про що отримано 2 патенти на корисну модель.

**Особистий внесок здобувача.** Здобувачем розроблено новий багатошаровий уточнений скінченний елемент, який надає можливість дослідження факторів неоднорідності деформацій поперечного зсуву [1, 2, 4, 20]. Проведено чисельне моделювання процесів розшарування в елементах обладнання хімічної промисловості з урахуванням тертя в пакеті шарів [2, 4, 8, 23-25]. Розроблено ефективний алгоритм для моделювання процесів сумісного розповсюдження магістральних тріщин з урахуванням процесів розшарування [9, 18, 27]. Проведено числові експерименти, виконано аналіз та узагальнення їх результатів [1-8, 10-26, 28, 29], розроблено технічні рішення по модернізації вузлів обладнання хімічних виробництв [14-17].

Створення автоматизованих систем безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу об'єктів хімічної промисловості [1] здійснювалось разом з науковим керівником д.т.н., проф. Гондляхом О. В.

**Апробація результатів дисертації.** Основні положення дисертаційної роботи доповідались та отримали схвальні відгуки на: XVIII, XIX та XX міжнародних конференціях «Математическое моделирование в механике сплошных сред на основе методов граничных и конечных элементов» (Росія, Санкт-Петербург, 2000, 2001, 2003 рр.); XV міжнародній конференції по сучасним матеріалам в аерокосмічній галузі та методам їх обробки «AeroMat 2004» (США, Сіетл, 2004 р.); XXV ювілейній міжнародній конференції «Композиційні матеріали в промисловості» (Україна, Київ, 2005 р.); VI щорічній промисловій конференції з міжнародною участю «Ефективність реалізації наукового, ресурсного та промислового потенціалу в сучасних умовах» (Україна, Славське, 2006 р.); науково-практичній конференції «Новітні технології пакування» (Україна, Київ, 2006 р.); 6-й міжнародній конференції «Computation of Shell & Spatial Structures» (США, Ітака, 2008 р.); 2-й міжнародній конференції «Передові космічні технології на благо людства» (Україна, Дніпропетровськ, 2009 р.); міжнародній науковій конференції Unitech 2015 (Габрово, Болгарія, 2015 р.).

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 30 друкованих праць, з них 3 монографії, 9 статей у наукових фахових виданнях, з яких 3 у

виданнях України, що індексуються в міжнародних наукометричних базах і системах Scopus, BASE, РИНЦ, Google Scholar, 4 патенти України на корисну модель, 1 стаття у інших наукових виданнях України та 13 праць і тез доповідей в збірниках матеріалів міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг дисертації.** Дисертаційна робота складається з вступу, п'яти розділів, загальних висновків, списку використаних джерел літератури і додатків. Загальний обсяг роботи складає 222 сторінки. Обсяг основного тексту становить 162 сторінки. Робота містить 2 таблиці і 54 рисунки, список використаних джерел літератури складається з 269 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ ДИСЕРТАЦІЇ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми, сформульовано мету досліджень, визначено основні завдання і методи їх розв'язання, викладено наукову новизну та практичне значення результатів роботи, наведено особистий внесок здобувача, інформація про основні публікації.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд стану проблеми та обґрунтування напрямку роботи.

Проведено огляд основних видів машин та апаратів хімічного виробництва, підходів до їх проектування та розрахунку на міцність. Розглянуто питання по вирішенню задач механіки руйнування, розповсюдженню макротріщин при циклічному навантаженні, зроблено огляд числових методів, що використовуються для оцінки надійності та довговічності обладнання хімічних виробництв.

Вищевказані проблеми розглянуті в наукових працях таких відомих науковців, як Баженов В. А., Брок Д., Ворошко П. П., Гельперін Н. І., Гриффітс Р., Гуляр О. І., Дагдейл Д., Зенкевич О. К., Канторович З. Б., Карвацький А. Я., Касаткін А. Г., Корнієнко Я. М., Луговської О. Ф., Панов Є. М., Партон В. З., Парфенюк О. С., Періс П., Сахаров О. С., Черепанов Г. П., Чорнобильський Й. І., Яхно О. М. та ін. За результатами аналізу розглянутих літературних джерел сформульовано основні задачі досліджень.

У **другому розділі** розглядається математична модель процесу розповсюдження тріщин в просторових конструкціях. Основним механізмом руйнування, притаманного металевим шарам багат шарових пакетів, є утворення та розвиток в них «магістральних» тріщин, довжина яких суттєво більше параметра товщини шару, в якому вони поширюються. До того ж швидкості росту магістральних тріщин в окремих металевих шарах пакету можуть суттєво відрізнятись (рисунок 1).

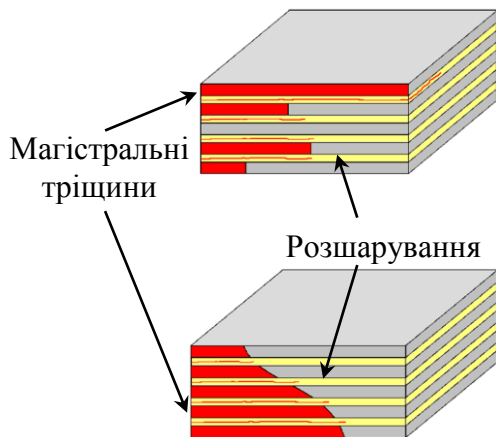


Рисунок 1 - Основні види руйнування багат шарових пакетів

Поява зон пластичних деформацій в верхівці тріщини й розкривання її берегів в металевім шарі призводить до появи та подальшого розвитку розшарувань, які суттєво впливають на процес руйнування багат шарового метало-композитного пакету в цілому. Виходячи

з цього, очевидним є необхідність сумісного врахування всіх видів руйнування при моделюванні процесів розповсюдження тріщин в багатошарових конструкціях.

В роботі пропонується модифікований метод дискретно-віртуального просування (МДВП) фронтів розшарування, який дозволяє ефективно моделювати не лише еволюційні процеси розповсюдження зон розшарування в міжшарових заповнювачах, але й процеси просування магістральних тріщин в металевих шарах. МДВП базується на зображенні дійсного фронту розшарування в вигляді його дискретного аналога як показано на рисунку 2.

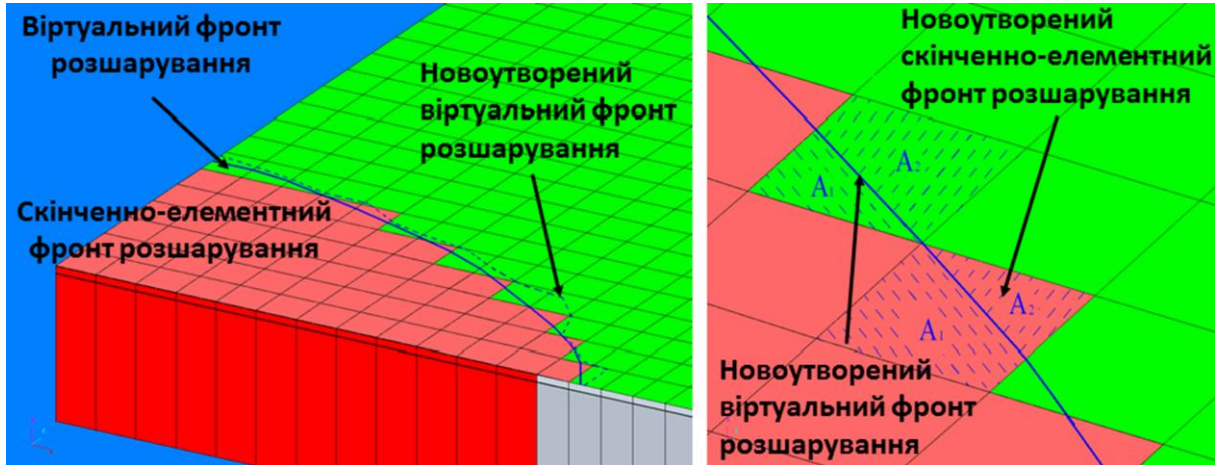


Рисунок 2 - Віртуальний та дискретний фронти розшарування

Дискретний фронт розшарування визначається на основі співвідношення площ частин дискретної області, що знаходиться всередині та зовні дійсної зони розшарування  $A_1^i \geq A_2^i$ , де  $A_1^i$  – площа, яка знаходиться всередині дійсної зони розшарування,  $A_2^i$  – площа, яка знаходиться ззовні дійсної зони розшарування.

Застосування даного критерію дозволяє набагато точніше з енергетичної точки зору враховувати дійсну зону розшарування, оскільки загальна площа дискретної зони буде відрізнятись від площі дійсної зони не більше ніж на половину сумарної площі елементів, що утворюють фронт розшарування, незалежно від розміру зони розшарування.

Основною відмінною особливістю МДВП є те, що вектор прирощення площі розшарування прикладено до вузлів дискретного фронту, а його напрямок

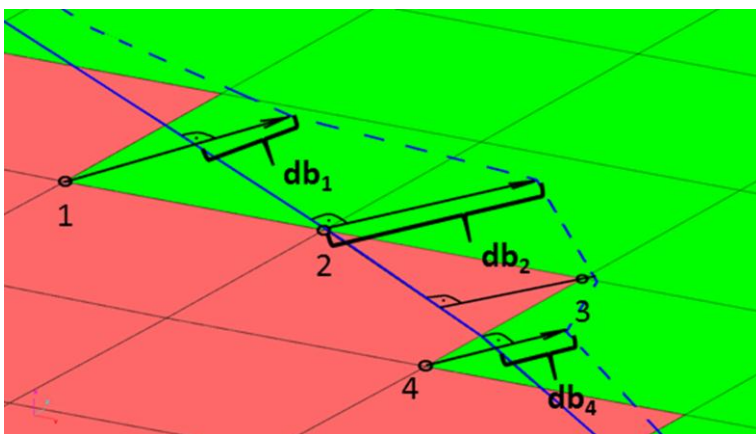


Рисунок 3 - Визначення напрямку подальшого просування фронту розшарування

визначається по нормалі до віртуального фронту, як показано на рисунку 3. Таким чином формується новий віртуальний фронт розшарування. Це дозволяє повністю враховувати всю історію розвитку фронту розшарування та адекватно корегувати відповідну йому дискретну модель на кожному етапі просування зони.

Визначення величини питомої енергії, необхідної для просування розшарування на одиницю площі, здійснюється на основі співвідношень методу віртуального закриття тріщини. Для всіх кутових точок, окрім зовнішніх, використовується співвідношення

$$G_i^p = -\frac{1}{2S^p} R_i^p \Delta U_i^p, \quad (1)$$

де  $R_i^p$  - реакція в  $p$ -му вузлі по  $i$ -му напрямку;  $\Delta U_i^p$  - розкриття берегів фронту розшарування поблизу  $p$ -го вузла по  $i$ -му напрямку;  $S^p$  - новоутворена площа розшарування навколо  $p$ -го вузла.

Для зовнішніх кутових точок використовується співвідношення

$$G_{i(sr)}^p = G_{i(l)}^p + \left( G_{i(r)}^p - G_{i(l)}^p \right) \frac{a_l}{a_r + a_l}, \quad (2)$$

де  $G_{i(l)}^p$  та  $G_{i(r)}^p$  – питома енергія відповідно в попередньому та наступному вузлі;  $a_l$  та  $a_r$  – відстань між  $p$ -м та попереднім і наступним вузлом відповідно.

Сумарна питома енергія визначається наступним чином

$$G^p = \sum_{i=1}^3 G_i^p. \quad (3)$$

Використання віртуального фронту розшарування, не прив'язаного до дискретної моделі, дозволяє зберігати дійсну конфігурацію зони розшарування за неминучого періодичного згущення-розрідження дискретної сітки, викликаного зміною положення та конфігурації інших зон розшарування та тріщин в конструкції. Безумовною цінністю запропонованого методу є його універсалізація щодо використання будь-яких числових методів досліджень, які базуються на дискретному представленні континуальних середовищ (МСЕ, метод сіток та ін.).

Оскільки розглянуті в дисертації об'єкти хімічного машинобудування являють собою сукупність тонкостінних багат шарових та масивних тривимірних елементів, коректне вирішення такого роду задач тільки на основі тривимірної механіки деформованого твердого тіла або тільки на основі оболонкових теорій є достатньо проблематичним. Тому для ефективного визначення напружено-деформованого стану (НДС) об'єктів хімічної промисловості з урахуванням всіх особливостей їх просторової будови та умов роботи використовується комбінований підхід. Для коректного опису НДС та механізмів руйнування в масивних тривимірних елементах використовуються рівняння тривимірної механіки деформованого твердого тіла, а для дослідження процесів розшарування в багат шарових пакетах – співвідношення ітераційно-аналітичної теорії оболонок (ІАТО).

Для отримання основних співвідношень МДТТ вводяться в розгляд базисна та місцева системи координат (рисунок 4).

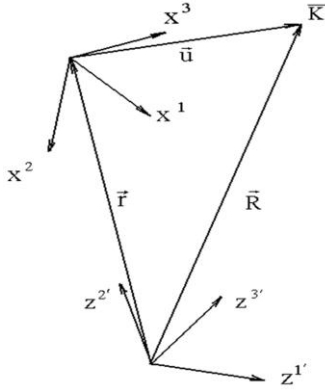


Рисунок 4 - Базисна ( $z^i$ ) та місцева ( $x^i$ ) системи координат

Співвідношення для основного базису радіус-вектора  $\vec{r}$  :

$$\vec{r} = \vec{r}(z^1, z^2, z^3) = \vec{r}(x^1, x^2, x^3), \quad (4)$$

$$d\vec{r} = \vec{r}_i dx^i; \quad \vec{r}_i = \frac{\partial \vec{r}}{\partial x^i}; \quad d\vec{r} = \vec{r}_{i'} dz^{i'}; \quad \vec{r}_{i'} = \frac{\partial \vec{r}}{\partial z^{i'}}. \quad (5)$$

Компоненти тензора деформацій визначаються згідно виразу

$$e_{ij} = \frac{1}{2} (c_i^{k'} \tilde{\nabla}_j u_{k'} + c_j^{k'} \tilde{\nabla}_i u_{k'} + g^{k't'} \tilde{\nabla}_i u_{k'} \tilde{\nabla}_j u_{t'}), \quad (6)$$

де  $g^{k't'}$  - компоненти метричного тензора;  $\tilde{\nabla}_j u_{k'}$  - абсолютна похідна коваріантного тензора;  $c_i^{k'}$  - тензор перетворення координат.

Для отримання системи диференціальних рівнянь рівноваги використовується вираз для варіації функціоналу потенційної енергії

$$\delta \Pi = \delta W - \delta A, \quad (7)$$

де  $W$  - робота деформацій;  $A$  - робота зовнішніх сил, які визначаються за формулами:

$$W = \frac{1}{2} \int \int \int_V \sigma^{ij} e_{ij} dV; \quad (8)$$

$$A = \int \int \int_V (\vec{p} \cdot \vec{u}) dV + \int \int_S (\vec{q} \cdot \vec{u}) dS, \quad (9)$$

де  $\sigma^{ij}$  – тензор напружень;  $V$  - об'єм тіла;  $S$  – поверхня прикладення навантаження;  $\vec{p}$  – вектор об'ємних сил;  $\vec{q}$  – вектор зовнішнього поверхневого навантаження.

Зв'язок між компонентами тензора напружень і тензора малих деформацій пружних тіл визначається за допомогою узагальненого закону Гука.

IATO є уточненою моделлю деформування багаточарових оболонок, функції приведення в якій не формулюються гіпотетично, а визначаються на основі спеціально розробленої ітераційної процедури, побудованої виходячи з умови мінімізації вектора нев'язки, що визначає ступінь відповідності отриманого рішення тривимірним рівнянням механіки деформованого твердого тіла. В рамках IATO компоненти вектора переміщень багаточарового елемента представляються наступним чином

$$u_i = \sum_{s=1}^S F_s^i(x^3, t) v_i^s(x^1, x^2, t), \quad (10)$$

де  $v_i^s$  - компоненти узагальненого вектора переміщень поверхні приведення оболонки;  $F_s^i$  - функції приведення.

При цьому необхідною умовою є виконання варіаційного принципу Лагранжа:

$$\delta\Pi = \delta(W - A) = \delta_{v_i^s}(W - A) + \delta_{F_s^i}(W - A) = 0, \quad (11)$$

де  $\delta_{v_i^s}$  і  $\delta_{F_s^i}$  означають, що варіювання функціоналу виконується по  $v_i^s$  або  $F_s^i$  відповідно.

З урахуванням (11) вираз перетворюється до вигляду:

$$\begin{aligned} & \int_V A_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta v_j^r dV - \\ & \quad - \int_S a_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta v_j^r dS + \\ & + \int_V B_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; \frac{\partial^2 v_i^s}{\partial x^\alpha \partial x^\beta}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; \frac{d^2 F_s^i}{(dx^3)^2}; p_j^r \right) \delta F_r^j dV - \\ & \quad - \int_S b_j^r \left( V_i^s; \frac{\partial v_i^s}{\partial x^\alpha}; F_s^i; \frac{dF_s^i}{dx^3}; q_j^r \right) \delta v F_r^j dS. \end{aligned} \quad (12)$$

Характерна відмінність виразу (12) від відомих з літературних джерел полягає в визначенні не тільки вектора узагальнених невідомих  $v_i^s$ , але також і фізично обґрунтованих функцій приведення  $F_s^i$ , незалежно від фізичних процесів, що протікають в матеріалі оболонки в будь-який момент. Основною перевагою ІАТО є можливість мобільної зміни базису розкладання по товщині в залежності від величини норми функції нев'язки, що в решті-решт призводить до фізично обґрунтованого визначення функцій приведення.

Не зважаючи на очевидні переваги МДВП, йому притаманні недоліки характерні для всіх методів, які використовують дискретні аналоги, а саме залежність системи рівнянь від кількості шарів в пакеті та «миттєвий» перехід СЕ від незруйнованого стану до повністю зруйнованого. Використання ІАТО при побудові нового спеціального багат шарового уточненого скінченного елемента дозволила модифікувати метод дискретно-віртуального просування та позбавитись вищевказаних недоліків. СЕ побудований на базі ІАТО допускає градієнт жорсткості між шарами пакету до 8 порядків, що надає можливість моделювання частково або повністю розшарованого контактного шару. Модель спеціального багат шарового уточненого восьмивузлового СЕ з частково зруйнованим шаром показана на рисунку 5.

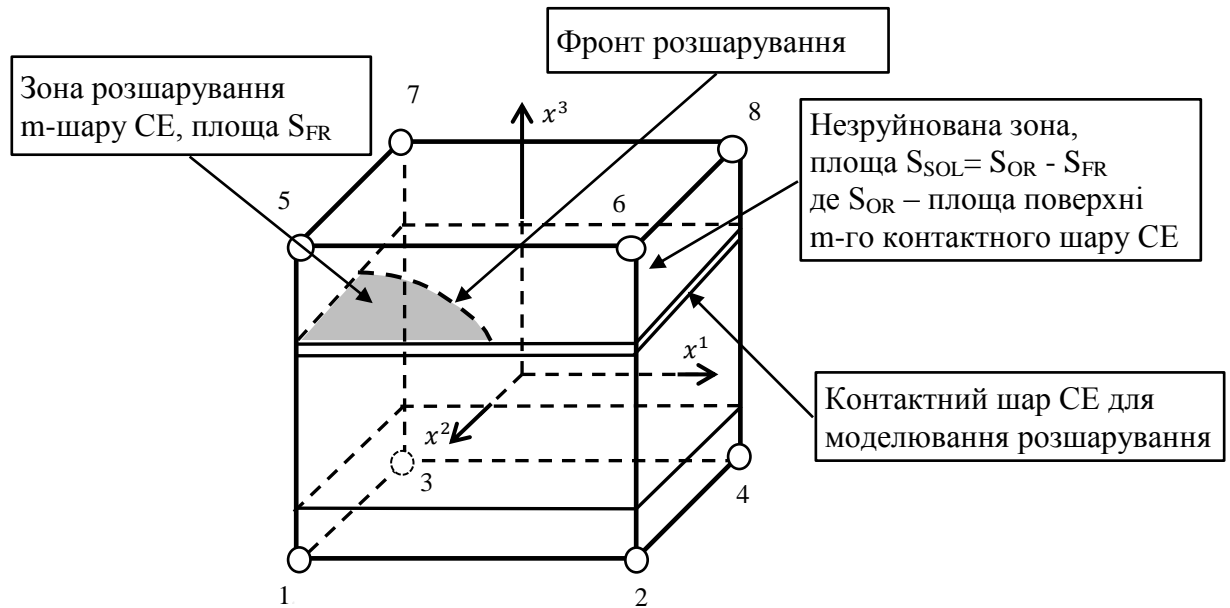


Рисунок 5 - Моделювання частково зруйнованого шару багатошарового CE.

При цьому, зміна фізико-механічних характеристик  $m$ -го шару при наявності в ньому зони розшарування визначається за залежністю

$$C_m^{*ijkl} = C_m^{ijkl} \left[ 1 - \left( \frac{S_{FR(m)}}{S_{OR(m)}} \right)^{n(m)} \right]^{k(m)}, \quad (13)$$

де:  $C_m^{ijkl}$  – компоненти тензору фізико-механічних констант незруйнованого контактної  $m$ -го шару елемента;  $C_m^{*ijkl}$  – компоненти тензору фізико-механічних констант частково зруйнованого контактної  $m$ -го шару елемента;  $S_{FR(m)}$  – площа зруйнованої поверхні контактної  $m$ -го шару CE;  $S_{OR(m)}$  – площа поверхні початкового контактної  $m$ -го шару CE;  $n(m)$  і  $k(m)$  – константи матеріалу  $m$ -го шару, що визначаються з натурних або числових експериментів.

Таким чином, просування віртуального фронту в контактному шарі CE здійснюється за рахунок врахування зміни жорсткості цього шару, що обумовлена частковим або повним його розшаруванням.

**У третьому розділі** описано побудову нелінійних рівнянь на основі МСЕ. При дослідженні геометрично нелінійного деформування конструкцій методом скінченних елементів особливо актуальними є питання, пов'язані з призначенням апроксимуючих функцій, що задовольняють умовам спільності деформацій при зміщеннях тіла як жорсткого цілого. З цієї причини, в даній роботі для дослідження процесів розповсюдження тріщин в фізично і геометрично нелінійній постановці використовувалась МССЕ, запропонована проф. Сахаровим О. С.

В роботі розроблено новий спеціальний багатошаровий уточнений скінченний елемент з полілінійною функцією поповнення переміщень в плані і нелінійним законом апроксимації переміщень по товщині, відповідно з співвідношеннями ІАТО (рисунок 6).

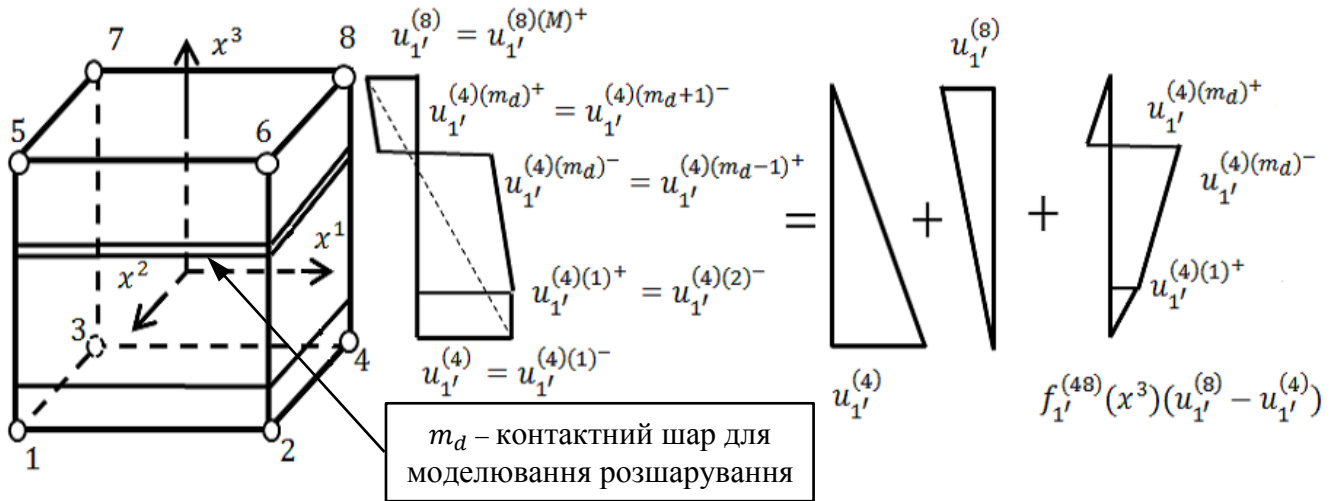


Рисунок 6 – Апроксимація компонент вектора переміщень багат шарового уточненого восьмивузлового СЕ в випадку розшарування з урахуванням тертя ( $\mathbf{u}_{i'}^{(t)}$  - компоненти модуля вектору переміщень вузла  $t$  в напрямку  $i'$ ;  $\mathbf{f}_{i'}^{(point(-),point(+) )}$  – скалярні функції приведення, що характеризують ступінь неоднорідності розподілу деформацій поперечного зсуву по товщині пакету шарів грані  $(point(-),point(+))$  СЕ в напрямку  $i'$ ;  $\mathbf{u}_{i'}^{(point)(m)\pm}$  - компоненти модуля вектора переміщень в напрямку  $i'$ , що визначені на верхній (+) та нижній (-) поверхнях шару  $m$ , вузла  $(point)$ ;  $\mathbf{a}_{i'}^{(s)}$  – коефіцієнти штрафу, що дорівнюють 0 для граней, які є спільними з гранями сусідніх стандартних восьмикуткових СЕ (для забезпечення умов сумісності по переміщенням) і дорівнюють 1 у всіх інших випадках)

Скінченний елемент забезпечує повну сумісність зі стандартним восьмивузловим СЕ та має наступні суттєві переваги:

1. можливість дослідження факторів неоднорідності деформацій поперечного зсуву, що залежать не тільки від співвідношень жорсткісних характеристик, але й від компонент НДС пакету;

2. можливість природним чином фізично обґрунтовано змінювати кінематичні і статичні умови контакту між шарами в процесі покрокового навантаження конструкції, що дозволить моделювати процеси накопичення дефектів, розвитку зон пластичності в шарах та зон розшарування;

3. стійкі показники збіжності рішень по визначенню компонент НДС як масивних тривимірних тіл, так і тонких конструкцій;

4. при зміні фізико-механічних характеристик шарів багат шарового СЕ на 8 та більше порядків зберігаються стійкі показники збіжності;

5. порядок розрешуючої системи рівнянь не залежить від кількості шарів в пакеті;

6. Побудова матриці жорсткості уточненого восьмивузлового СЕ виконується відповідно до загальної процедури МССЕ.

Апроксимуюча функція розподілу узагальнених переміщень для СЕ записується у вигляді

$$u_k^{s(n)} = \frac{1}{4} \sum_{t=1}^4 \prod_{\alpha=1}^2 (1 + P_{\alpha t} x^\alpha) V_k^{s(n)}, \quad (14)$$

де  $P_{\alpha t}$  – коефіцієнти, що враховують розташування вузлів СЕ;

$x^\alpha$  – координати вузлових точок;  $V_k^{s(n)}$  – компоненти вектора переміщень.

Функції приведення зсуву та обчислення при полілінійній апроксимації компонент вектору переміщень визначаються з рівняння

$$\sum_{p=1}^p \int_{h_p} \left\{ \phi_{pik(n)}^{srlj} F_{s,lj}^{k(n)} - \phi_{pik(n)}^{srl} F_{s,l}^{k(n)} - \right. \\ \left. - \phi_{pik(n)}^{sr} F_s^{k(n)} + R_{pi}^{(n-1)} \right\} dh_p \delta F_r^{i(n)} = 0. \quad (15)$$

При цьому коефіцієнти матриці жорсткості багатопарового уточненого скінченного елемента визначаються згідно формули

$$G_{fsrt}^{T_{k'q'm}} = \sum_{m=1}^{M-M_t} G_{rtsf}^{k'q'm} + \\ + \frac{1}{4} \sqrt{g_0} \sum_{m=M_t+1}^M \left( c_m^{ijkl} c_k^{k'} c_i^{q'} \bar{B}_{l(t)s}^m \bar{B}_{j(r)s}^m + \sigma_m^{\alpha\beta} \bar{B}_{trsf}^m c_\alpha^{k'} c_\beta^{q'} \right), \quad (16)$$

де  $G_{rtsf}^{k'q'm}$  – коефіцієнти матриці жорсткості СЕ з повним контактом між шарами;

$g_0$  – визначник метричного тензора;  $\sigma_m^{\alpha\beta}$  – тензор напружень на  $n-1$  кроці по навантаженню;  $\bar{B}_{l(t)s}^m$ ,  $\bar{B}_{j(r)s}^m$  та  $\bar{B}_{trsf}^m$  – коефіцієнти, що залежать від функцій приведення;  $c_m^{ijkl}$  – тензор констант деформування.

**У четвертому розділі** описано основні механізми руйнування та алгоритм нелінійного розрахунку просторових конструкцій.

В даній роботі для моделювання фізично нелінійної поведінки матеріалу застосовується теорія пластичної течії. Це дозволяє враховувати складність траєкторії навантаження, змінність параметрів пластичності, ефект Баушингера. Оскільки асимптотичні методи визначення коефіцієнту інтенсивності навантажень (КІН) не можуть бути застосовані в разі вирішення нелінійної задачі механіки руйнування, в роботі застосовується енергетичний метод визначення КІН, який базується на зв'язку з похідною потенціальної енергії по довжині тріщини, так званий J-інтеграл

$$J = \int_{\Gamma} W dy - T \frac{\partial u}{\partial x} ds, \quad (17)$$

де  $\Gamma$  – замкнений контур навколо верхівки тріщини;  $W$  – енергія деформації одиниці об'єму;  $T$  – вектор напружень, перпендикулярний контуру  $\Gamma$  та направлений назовні;  $u$  – переміщення в напрямку осі  $x$ ;  $ds$  – елемент контуру  $\Gamma$ .

Для вирішення фізично і геометрично нелінійної задачі визначення залишкової міцності конструкції реалізовано кроково-ітераційний алгоритм послідовних навантажень, заснований на модифікованому методі Ньютона-Канторовича. Переформування матриці жорсткості виконується на початку чергового кроку по навантаженню і після кожного етапу просування тріщини. Урахування пластичної роботи матеріалу здійснюється в процесі ітерацій по методу додаткових навантажень. Суттєвою відмінністю цього алгоритму є те, що в блоці формування матриці жорсткості реалізовано методи змінних жорсткостей і змінних апроксимацій.

Для моделювання циклічного навантаження розроблено алгоритм, в якому приріст довжини тріщин обчислюється за формулою Періса:

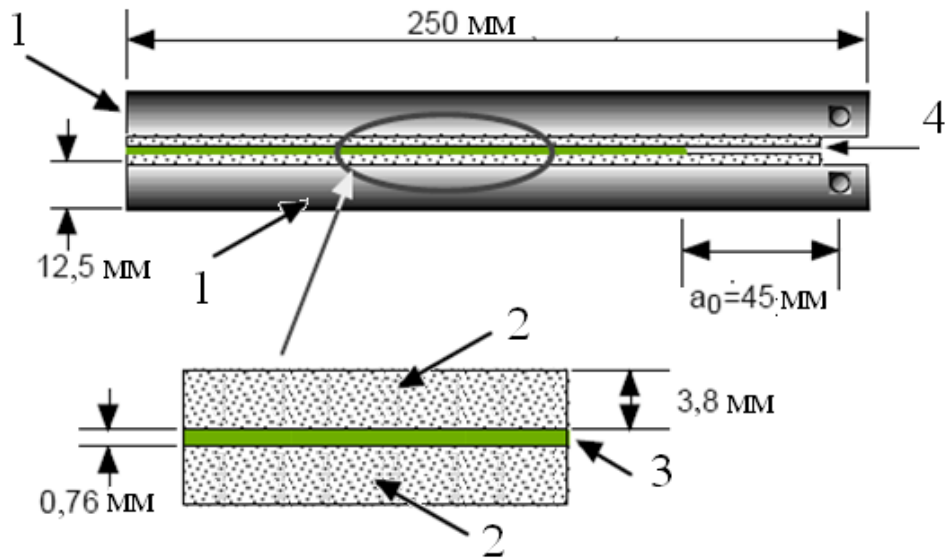
$$\frac{da}{dN} = 1e^{-4} \left( \frac{\Delta K}{C} \right)^n, \quad (18)$$

де  $da$  – приріст довжини тріщини;  $dN$  – кількість циклів;  $\Delta K$  – приріст КІН;  $n$  в розрахунках прийнятий рівним 3;  $C$  - емпіричний коефіцієнт, що визначається по експериментальній діаграмі  $da/dN$ – $\Delta K$ .

В циклі по навантаженню обчислюється і накопичується  $J$ -інтеграл, по досягненню максимального навантаження циклу виконуються обчислення приростів КІН, визначаються довжини тріщин за формулою Періса і зміна навантаження. Після цього йде повторний захід на формування матриці жорсткості конструкції і новий цикл по навантаженню. Після досягнення встановленого максимального значення кількості циклів виконується умова зупинки рішення задачі по циклічному навантаженню та запис отриманих результатів рішення задачі.

У випадку коли необхідно продовжити вирішення задачі для оцінки залишкової міцності конструкції, реалізовано алгоритм, в якому прирости довжин всіх тріщин по відомих  $K_I^i$  на основі  $R$ - кривих, а критерієм зупинки рішення задачі є досягнення максимального навантаження або перевищення тріщиною максимальної довжини.

Для перевірки коректності роботи алгоритму втомного зростання тріщини та модифікованого методу дискретно-віртуального просування зон розшарування було вирішено задачу по числовому моделюванню натурального експерименту, метою якого було визначення кількості циклів навантаження DCB-зразка до моменту його руйнування. В якості початкової інформації були прийняті геометричні і фізико-механічні параметри зразка, вказані в роботі D. L. Erdman та J. M Starbuck, а також діаграма  $da/dN$ – $\Delta G$  для матеріалу VFG528E. Фотографічне і схематичне зображення DCB-зразка представлено на рисунку 7.



1 – алюміній; 2 – композитна плита; 3 – клейовий шар; 4 – початок тріщини  
Рисунок 7 - Фотографічне і схематичне зображення DCB-зразка

Аналіз результатів числового моделювання показує, що використання модифікованого МДВП дозволяє повністю відтворити етапи руйнування зразка на всьому діапазоні зовнішнього впливу (рисунок 8). При цьому максимальна похибка відносно даних експерименту по діаграмі «довжина тріщини-кількість циклів» не перевищила 2.4 %.

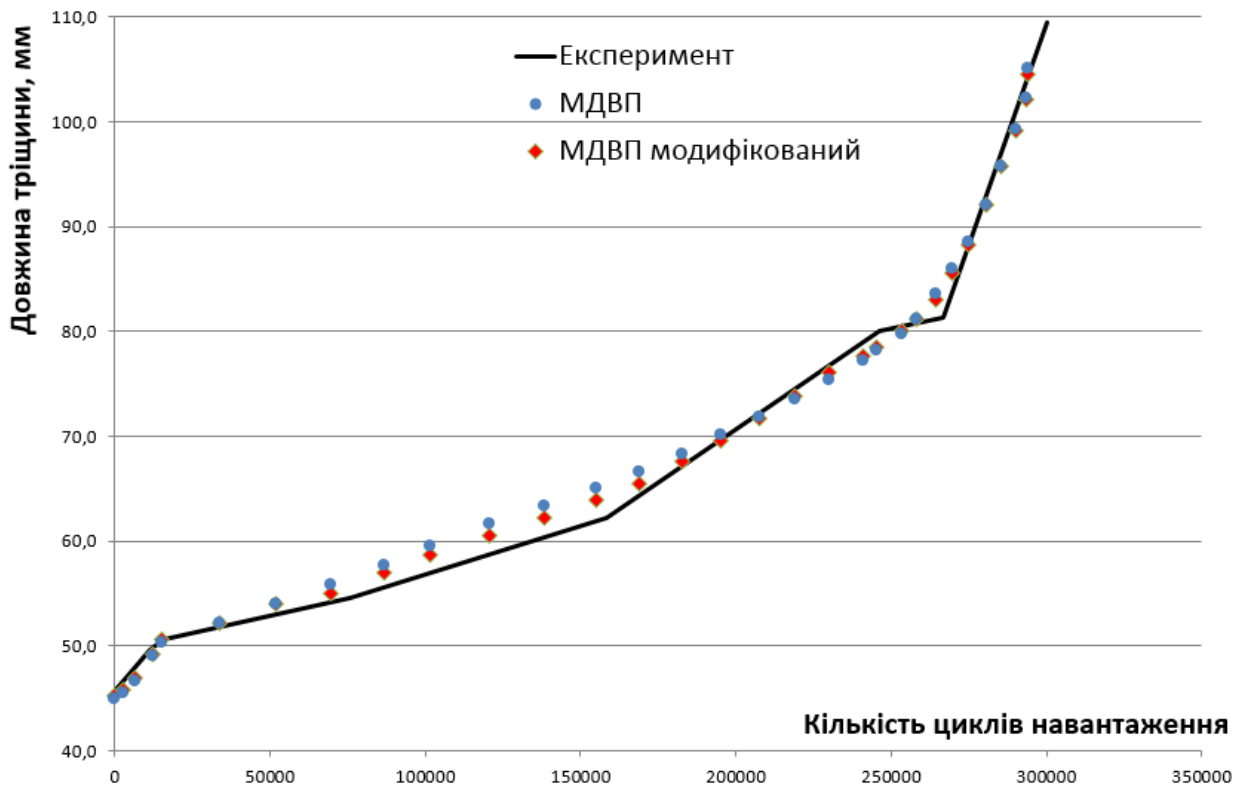
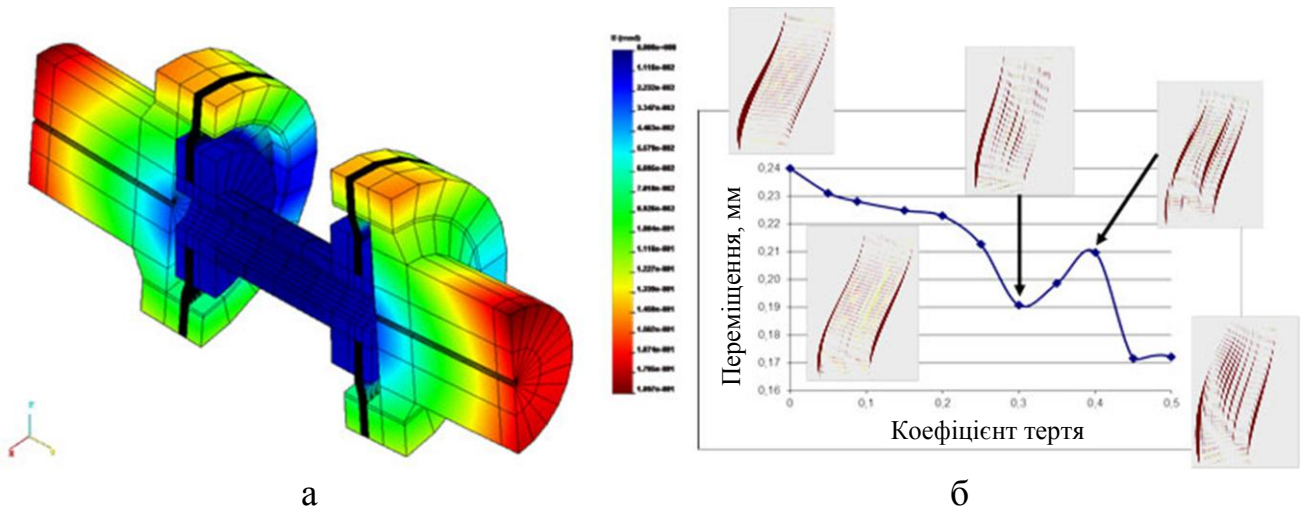


Рисунок 8 – Моделювання процесу зростання тріщини в DCB-зразку під дією циклічного навантаження

У п'ятому розділі подано опис реалізації запропонованих в даній роботі методик і алгоритмів в програмному комплексі розрахунків на міцність АПРОКС, а також практичне використання результатів роботи.

Створені на базі АПРОКС автоматизовані системи дослідження надійності та довговічності об'єктів хімічної промисловості дозволяють в зручному для інженера вигляді виконувати процес задавання початкової інформації аж до генерації SE моделі, залишаючись в звичному середовищі інженерних термінів та понять.

Зокрема, була створена система дослідження надійності пластинчатих муфт, що мають широке розповсюдження в хімічній промисловості. При передачі крутного моменту найбільш навантаженим елементом в них є пакет пружних дисків. Застосування нового спеціального уточненого скінченного елемента дозволяє успішно моделювати контактну взаємодію дисків в процесі їх деформування з урахуванням сил тертя. Під час роботи таких муфт коефіцієнт тертя в пакеті пружних дисків може змінюватись в досить широкому діапазоні. Тому було чисельно промодельовано життєвий цикл муфти з моменту початку роботи до виходу її з ладу.



а – НДС муфти; б – графік залежності переміщень пружних елементів від коефіцієнту тертя

Рисунок 9 - Дослідження надійності пластинчатої муфти

На діаграмі залежності максимальних переміщень від коефіцієнта тертя (рисунок 9) можна спостерігати, що при рості коефіцієнта тертя спочатку утворюються додаткові зони зсуву та проковзування, потім утворюються додаткові зони відриву між дисками і пакет розпадається на декілька незалежно працюючих пакетів. Подальше збільшення коефіцієнта тертя приводить до акумулювання внутрішньої енергії деформування муфти (ефект зміцнювання). На останній ділянці діаграми відбувається різка зміна форми деформування пакету, з'являються додаткові зони відриву і муфта фактично втрачає несучу спроможність.

Наступним об'єктом хімічної промисловості, для якого була створена система інформаційної підтримки життєвого циклу, стала обертова піч для виробництва клінкеру. В процесі роботи печі прогин футерівки значно перевищує прогин корпусу, що призводить до виникнення зазору між обичайкою та футерівкою.

Виходячи з того, що зона контакту футерівки з обичайкою заздалегідь невідома, а також змінюється в процесі роботи печі, цю зону необхідно обчислювати на протязі всього періоду роботи печі. Тому на базі уточненого СЕ була розроблена числова модель печі то проведено моделювання її роботи. Аналіз результатів числових експериментів показав наявність суттєвих зон відриву між корпусом печі та футерівкою (рисунок 10). Найбільш значні зони відриву спостерігаються поблизу бандажних кілець та посередині прольотів. Максимальні напруження в конструкції з урахуванням відшарування футерівки від корпусу зростають на 14 % в порівнянні зі стандартними методиками розрахунків.

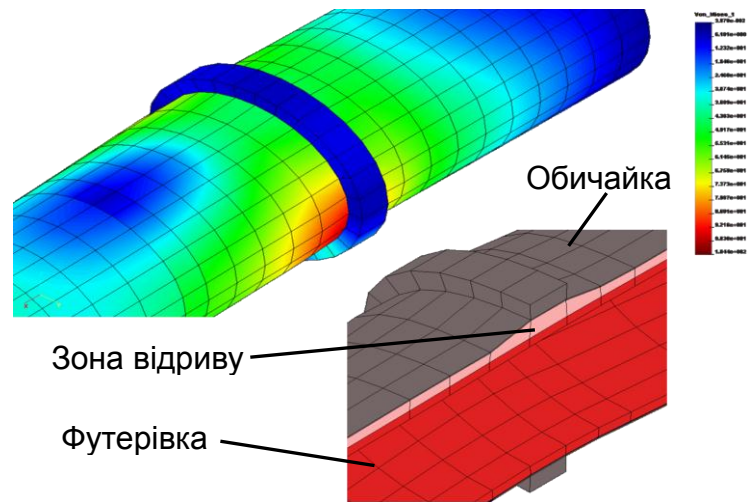


Рисунок 10 - НДС та зони розшарування обертової печі

За допомогою системи АПРОКС можуть створюватись нові конструктивні рішення. Так за результатами числових досліджень була запропонована модернізація вузла з'єднання вінцевої шестерні з корпусом барабана обертової печі. Нове рішення полягає в тому, щоб виконати плоскі пружини у вигляді пакета пластин. Така схема дозволяє більш м'яко реагувати на зупинку і запуск печі та надає можливість компенсації надлишкових зусиль в більш широкому діапазоні значень.

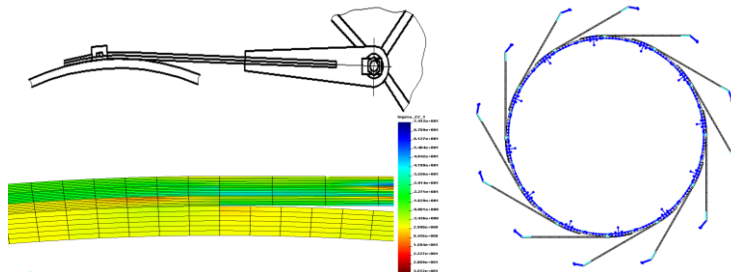


Рисунок 11- Модернізація вузла з'єднання вінцевої шестерні з корпусом обертової печі

Запропонована конструкція вузла з'єднання представлена на рисунку 11. При роботі печі в пакеті пластин виникають зони проковзування і відриву. Система інформаційної підтримки дозволила визначити оптимальну кількість пластин в пакеті та оптимальне притискне зусилля.

На базі системи АПРОКС також розроблена система для моделювання життєвого циклу контуру охолодження реактора Запорізької АЕС. За допомогою системи було досліджено нормальний режим експлуатації парогенератора та аварійну ситуацію, що виникла в 4-й петлі контуру охолодження реактора Ровенської АЕС. Аналіз результатів виявив виразні зони концентрації розтягуючих напружень. В цих зонах при неефективній роботі продувних ліній можуть накопичуватись відкладення, які сприяють виникненню агресивного середовища, що в свою чергу призводить до появи корозії і виникнення мікродефекту.

Тому за допомогою системи інформаційної підтримки було проведено чисельне моделювання роботи парогенератора з моменту виникнення мікродефекту до виходу тріщини на зовнішню поверхню корпусу. Аналіз результатів показав, що

наскрізна тріщина утворюється за 70 тис. годин експлуатації парогенератора (рисунок 12). Акт обстеження гарячого колектора парогенератора 1-го блоку Південноукраїнської АЕС підтвердив наявність аналогічного дефекту – тріщини в зоні зварного з'єднання, при цьому термін роботи вузла до виявлення дефекту склав 69841 годин.

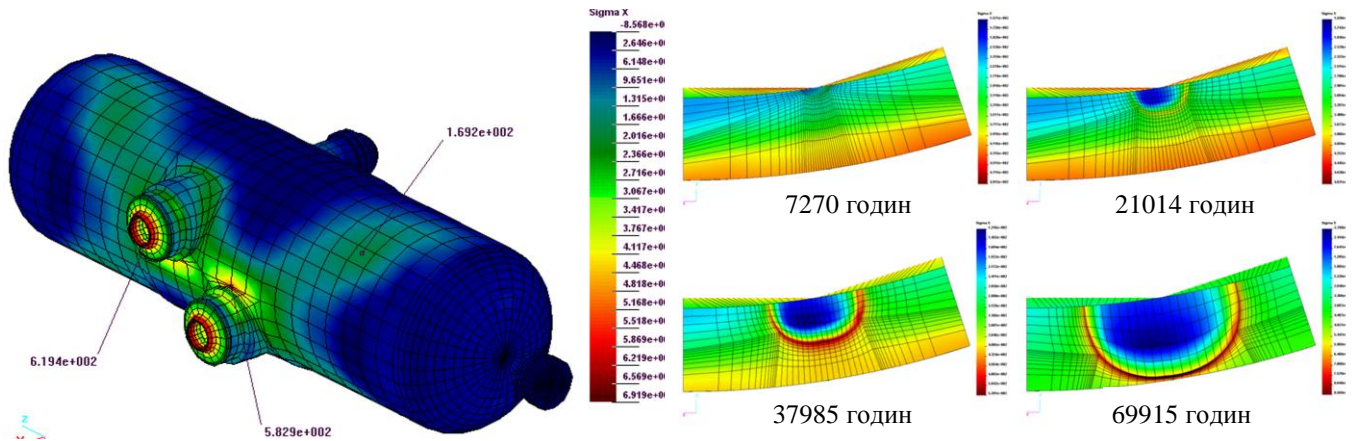


Рисунок 12 - Моделювання розвитку мікрodefекту в парогенераторі при нормальному режимі експлуатації

## ВИСНОВКИ

1. Розроблені, програмно реалізовані та апробовані на низці контрольних-тестових задач методи інформаційної підтримки систем моніторингу життєвого циклу обладнання хімічної промисловості, що працює в умовах статичного і циклічного навантаження.

2. Для коректного моделювання накопичення дефектів та руйнування об'єктів хімічної промисловості вперше проведена адаптація ітераційно-аналітичної теорії оболонок стосовно до вирішення задач механіки руйнування просторових конструкцій в тому числі багатошарових.

3. Вперше розроблений метод дискретно-віртуального просування зон розшарування для дослідження процесів руйнування багатошарових конструкцій хімічної промисловості.

4. Розроблено новий багатошаровий уточнений скінченний елемент, який дозволяє коректно моделювати життєвий цикл обладнання хімічних виробництв з урахуванням умов контакту між шарами матеріалу та тертя.

5. Розроблено алгоритми, що дозволяють моделювати накопичення дефектів, руйнування та розшарування з урахуванням умов контакту між шарами в елементах обладнання хімічних виробництв, що працюють в умовах циклічного навантаження.

6. Проведена апробація запропонованих методів, алгоритмів та СЕ шляхом вирішення низки контрольних-тестових задач.

7. Розроблено системи безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу об'єктів хімічної промисловості, що дозволяють виконувати моніторинг обладнання хімічних виробництв в процесі їх експлуатації з урахуванням штатних та позаштатних, в тому числі і аварійних, ситуацій.

8. Результати виконаних в дисертації досліджень використовувались при проектуванні пластинчатої муфти на ВАТ «Сумський завод «Насосенергомаш», при розробці модернізованої конструкції вузла з'єднання вінцевої шестерні з корпусом обертової печі та при створенні регламенту технічного обслуговування елементів обладнання енергоблоку Запорізької АЕС.

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. САПР. Система інформаційної підтримки життєвого циклу захисних оболонок та обладнання АЕС. / [О. В. Гондлях, В. І. Сівецький, **А. О. Чемерис** та ін.] // К.: НТУУ «КПІ», 2014. – 190 с. *Особистий внесок здобувача: розробка уточненого тривимірного восьмивузлового багат шарового скінченного елемента, розробка системи інформаційної підтримки життєвого циклу обладнання АЕС.*

2. САПР. Чисельне моделювання нелінійного деформування та руйнування багат шарових елементів хімічного обладнання. Частина 1. Пружні муфти. / [О. В. Гондлях, О. С. Сахаров, **А. О. Чемерис** та ін.] - К.: ВП «Едельвейс», 2011. – 172 с. *Особистий внесок здобувача: розробка багат шарового ізопараметричного скінченного елемента, моделювання нелінійних процесів деформування і руйнування муфт з урахуванням контактної взаємодії пружних елементів.*

3. САПР. Програмний комплекс АПРОКС в розрахунках машин та апаратів хімічних виробництв. / [О. В. Гондлях, О. С. Сахаров, **А. О. Чемерис** та ін.] – К.: ТОВ «Поліграф Консалтінг», 2006. – 136 с. (Входить до наукометричних баз РИНЦ, Google Scholar). *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків, аналіз результатів розрахунків.*

4. Гондлях А. В. Расчет полужесткой дисковой муфты методом конечных элементов с учетом контактного взаимодействия дисков и трения между ними / А. В. Гондлях, **А. О. Чемерис**, В. С. Васильев // Прогресивні технології і системи машинобудування: Міжнародний зб. Наукових праць. –2005. - № 30. – С. 60-66. (Входить до наукометричних баз BASE, Google Scholar). *Особистий внесок: розробка нового скінченного елемента, проведення числових розрахунків, аналіз результатів.*

5. Копиленко О. В. Застосування програмного комплексу АПРОКС у розв'язанні задач на міцність і довговічність обладнання хімічної та харчової промисловості / О. В. Копиленко, О. В. Гондлях, **А. О. Чемерис** та ін. // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2006. - № 18. - С.72-74. (Входить до наукометричних баз Scopus, BASE, РИНЦ, Google Scholar). *Особистий внесок здобувача: розробка числових моделей та проведення числових розрахунків.*

6. Гондлях О. В. Чисельний аналіз міцності каністр за умов статичного та динамічного навантаження / О. В. Гондлях, **А. О. Чемерис**, В. Ю. Онопрієнко // Східноєвропейський журнал передових технологій. - 2015: № 3/7 (75). - С. 23-29. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.44383 (Входить до наукометричної бази Scopus). *Особистий внесок здобувача: розробка числових моделей та проведення числових розрахунків.*

7. Гондлях О. В. Дослідження напружено-деформованого стану головного циркуляційного насосу в різних режимах експлуатації / О. В. Гондлях, М. І. Осипенко, **А. О. Чемерис** // Восточно-европейский журнал передовых

технологій. – 2006. - № 2/3 (20). - С. 35-39. *Особистий внесок здобувача: проведення аналізу числових досліджень.*

8. Гондляр А. В. Учет нарушения контакта между футеровкой и корпусом вращающихся печей промышленности стройматериалов / А. В. Гондляр, В. Ю. Щербина, **А. О. Чемерис** та ін. // Будівельні матеріали, виробництво та санітарна техніка: Науково-технічний збірник. – 2006. - № 22. - С. 25-29. *Особистий внесок здобувача: розробка скінченно-елементної моделі конструкції, проведення числових розрахунків, аналіз результатів.*

9. Гондляр О. В. Вплив процесів розшарування на коефіцієнт інтенсивності напружень в усті тріщини в багатошарових конструкціях хімічного машинобудування. / О. В. Гондляр, Р. М. Пашинський, **А. О. Чемерис** та ін. // Наукові вісті Національного технічного університету України "Київський політехнічний інститут". – 2005. - № 6. - С. 40-45. *Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму просування тріщин та зон розшарування в багатошарових конструкціях.*

10. Щербина В. Ю. Выбор оптимальной формы тары (нанесение сеточной области на конструктивные элементы тары) / В. Ю. Щербина, В. И. Сивецкий, **А. О. Чемерис** та ін. // Упаковка. – 2005. - № 5. - С. 32-34. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

11. Осипенко М. І. Проектування канистр для нафтопродуктів / М. І. Осипенко, Р. М. Пашинський, **А. О. Чемерис** та ін. // Упаковка. – 2005. - № 6. - С. 34-37. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

12. Копиленко О.В. Аналіз особливостей роботи центрифуг для харчової і хімічної промисловості. / О. В. Копиленко, О. В. Гондляр, **А. О. Чемерис** та ін. // Наукові праці Національного університету харчових технологій. – 2005. - № 16. - С. 166-168. *Особистий внесок здобувача: розробка скінченно-елементної моделі, проведення числових розрахунків, аналіз результатів.*

#### **Патенти на корисну модель:**

13. Патент на корисну модель № 22003 Україна, МПК (2006) F27B7/00. Обертова піч / Щербина В. Ю., Сівецький В. І., **Чемерис А. О.** та ін. –№ у 2006 11767; заявл. 08.11.2006; опубл. 10.04.2007, Бюл. № 4. – 4 с. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

14. Патент на корисну модель № 27585 Україна, МПК (2006) F27B7/00. Обертова піч / Щербина В. Ю., Сівецький В. І., **Чемерис А. О.** та ін. –№ у 2007 06293; заявл. 07.06.2007; опубл. 12.11.2007, Бюл. № 18. – 4 с. *Особистий внесок здобувача: розробка нової конструкції вузла з'єднання, проведення числових розрахунків.*

15. Патент на корисну модель № 31197 Україна, МПК (2006) F27B7/20. Вузол з'єднання вінцевої шестірні з корпусом барабана печі / Щербина В. Ю., Сівецький В. І., **Чемерис А. О.** та ін. –№ у 2007 14418; заявл. 20.12.2007; опубл. 25.03.2008, Бюл. № 6. – 4 с. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

16. Патент на корисну модель № 38123 Україна, МПК (2006) F27B7/20. Вузол з'єднання вінцевої шестірні з корпусом барабана печі / Щербина В. Ю., Сівецький

В. І., **Чемерис А. О.** та ін. –№ и 2008 08733; заявл. 02.07.2008; опубл. 25.12.2008, Бюл. № 24. – 4 с. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

**Статті в інших наукових виданнях:**

17. Гондлях О. В. Чисельне моделювання процесів руйнування захисної оболонки контура АЕС в результаті падіння на неї літака. / О. В. Гондлях, О. С. Сахаров, **А. О. Чемерис** та ін. // Вісті академії інженерних наук України. – 2005. - № 1. - С. 17-23. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

**Тези доповідей:**

18. Gondliakh A. Mathematical modeling of crack propagation in body of steam generator. / A. Gondliakh, **A. Chemeris**, V. Onoprienko // Proceedings: International scientific conference Unitech'15, Gabrovo. - 2015. – Vol. II. - P. 204-213. *Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму просування тріщини.*

19. Гондлях О. В. Розробка програмного комплексу формоутворення і міцнісних характеристик об'ємної тари / О. В. Гондлях, Р. М. Пашинський, **А. О. Чемерис** // Науково-практична конференція «Новітні технології пакування» (з проблем технологій та обладнання), 1 березня 2006 р. – Київ: ІАЦ «Упаковка», 2006. - С. 19-24. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

20. Гондлях А. В. Применение контактно-фрикционного конечного элемента для расчета полужестких дисковых муфт / А. В. Гондлях, **А. О. Чемерис** // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: XXI Международная конференция, 4-7 октября 2005 г.: труды. - СПб.: ВВМ, 2006. - С. 184-190. *Особистий внесок здобувача: розробка нового скінченного елемента.*

21. Гондлях О. В. Дослідження компонент напружено-деформованого стану промислового парогенератора в аварійному режимі експлуатації / О. В. Гондлях, Р. М. Пашинський, **А. О. Чемерис** // «Эффективность реализации научного, ресурсного и промышленного потенциала в современных условиях»: Шестая ежегодная промышленной конференции с международным участием и блиц-выставка, 20-24 февраля 2006 г.: материалы. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2006. - С. 71-73. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

22. Копиленко О. В. Визначення оптимальних розмірів центрифуг для харчової та хімічної промисловості / О. В. Копиленко, Л. В. Зоткіна, **А. О. Чемерис** та ін. // «Нові технології та технічні рішення в харчовій та переробній промисловості: сьогодні і перспектива»: IX Міжнародна науково-технічна конференція, 17-19 жовтня 2005 р.: Матеріали конференції. - К.: НУХТ, 2005.- Ч. II. – С. 20. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

23. Гондлях О. В. Чисельна діагностика працездатності муфт з пакетами пружних дисків / О. В. Гондлях, **А. О. Чемерис**, С. Ф. Терещенко // «Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики»: Тринадцатая ежегодная международная конференция, 3-7 октября 2005 г.: материалы. – Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. - С. 58-60. *Особистий внесок здобувача: чисельне моделювання процесів розширення в пакеті пружних елементів, проведення числових розрахунків.*

24. Гондляр А. В. Методика уточненного расчета полужестких дисковых муфт методом конечных элементов / А. В. Гондляр, **А. О. Чемерис** // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: XXI Международная конференция, 4-7 октября 2005 г.: тезисы. - СПб.: ВВМ, 2005. - С. 72-74. *Особистий внесок здобувача: чисельне моделювання процесів розширвання в пакеті пружних елементів, проведення числових розрахунків.*

25. Гондляр А. В. Параметрический расчет пластинчатой муфты при заданных условиях эксплуатации на базе многоцелевого вычислительного комплекса "АПРОКС" / А. В. Гондляр, Н. И. Осипенко, **А. О. Чемерис** // «Композиционные материалы в промышленности»: Двадцать пятая юбилейная международная конференция, 30 мая - 3 июня 2005 г.: материалы. - Киев: УИЦ «Наука. Техника. Технология», 2005. - С. 32-34. *Особистий внесок здобувача: чисельне моделювання процесів розширвання в пакеті пружних елементів, проведення числових розрахунків.*

26. Sklyut N. Alcoa Computer Based Design Tools to Conduct Trade Studies / N. Sklyut, M. Kulak, **A. Chemeris** // «Aeromat 2004»: 15<sup>th</sup> Advanced Aerospace Materials & Processes Conference and Exposition, 7-10 June 2004: abstracts. - Seattle, 2004. - P. 37. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

27. Гондляр А. В. Численное моделирование распространения пространственных трещин в трехмерных телах / А. В. Гондляр, Н. И. Осипенко, **А. О. Чемерис** // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: XX Международная конференция, 24-26 сентября 2003 г.: тезисы. - СПб.: НИИХ СПбГУ, 2003. - С. 57-59. *Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму просування тріщини.*

28. Sklyut N. Alcoa Computer Based Design Tools to Conduct Trade Studies / N. Sklyut, M. Kulak, **A. Chemeris** // «Aeromat 2002»: 13<sup>th</sup> Advanced Aerospace Materials & Processes Conference and Exposition, 10-13 June 2002: abstracts. - Orlando, 2002. - P. 48-49. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

29. Гондляр А. В. Влияние остаточных напряжений на эволюцию распространения трещин в пространственных конструкциях / А. В. Гондляр, Н. И. Осипенко, **А. О. Чемерис** // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: XIX Международная конференция, 30 мая - 2 июня 2001 г.: тезисы. - СПб.: НИИХ СПбГАСУ, 2001. - С. 52-53. *Особистий внесок здобувача: проведення числових розрахунків.*

30. Гуляев В. Н. Влияние остаточных напряжений на эволюцию распространения трещин в пространственных конструкциях / В. Н. Гуляев, А. В. Гондляр, **А. О. Чемерис** и др. // «Математическое моделирование в механике сплошных сред. Методы граничных и конечных элементов»: XVIII Международная конференция, 16-20 мая 2000 г.: тезисы. - СПб.: НИИХ СПбГУ, 2000. - С. 37-38. *Особистий внесок здобувача: розробка алгоритму просування тріщини.*

## АНОТАЦІЯ

**Чемерис А. О. Надійність і довговічність машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюції їх руйнування.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття вченого ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.05.13 – машини та апарати хімічних виробництв. - Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» МОН України, Київ, 2018.

Дисертаційна робота присвячена розробці нових методів дослідження, розрахунку і конструювання машин та апаратів хімічних виробництв з урахуванням еволюційних процесів накопичення і розповсюдження в них дефектів та тріщин для підвищення показників їх надійності і довговічності.

Створено ефективну модифікацію ітераційно-аналітичної теорії оболонок стосовно вирішення задач механіки руйнування в просторових конструкціях.

Розроблено новий спеціальний багат шаровий уточнений скінченний елемент для моделювання процесів розповсюдження магістральних тріщин в багат шарових просторових системах з урахуванням процесів розшарування.

На базі розробленого скінченного елемента створена модифікація методу дискретно-віртуального просування зон розшарування для уточненого дослідження процесів руйнування багат шарових конструкцій хімічного машинобудування.

Розроблено ефективний алгоритм, який дозволяє в фізично і геометрично нелінійних постановках моделювати процеси сумісного розповсюдження магістральних тріщин з урахуванням процесів розшарування для оцінки залишкової міцності елементів хімічного обладнання.

Розроблено автоматизовані системи безперервної інформаційної підтримки життєвого циклу об'єктів хімічної промисловості, які дозволяють виконувати моніторинг обладнання в процесі його експлуатації, прогнозувати сценарії можливого розвитку зон руйнування при виникненні позаштатних або аварійних ситуацій.

*Ключові слова:* просторова конструкція, руйнування, тріщина, зона розшарування, циклічна тріщиностійкість.

## АННОТАЦИЯ

**Чемерис А. О. Надежность и долговечность машин и аппаратов химических производств с учетом эволюции их разрушения.** – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.05.13 – машины и аппараты химических производств. - Национальный технический университет Украины “Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского” МОН Украины, Киев, 2018.

Диссертационная работа посвящена разработке новых методов исследования, расчета и конструирования машин и аппаратов химических производств с учетом эволюционных процессов накопления и распространения в них дефектов и трещин для повышения показателей их надежности и долговечности.

Для решения поставленной задачи произведена адаптация итерационно-аналитической теории оболочек применительно к решению задач механики разрушения в пространственных подкрепленных конструкциях. Это позволило детально описывать процессы распространения трещин в тонких, средней толщины и толстостенных элементах машин и аппаратов химических производств, в том числе и многослойных.

Разработана, программно реализована и апробирована на ряде контрольно-тестовых задач основанная на методе конечных элементов методика исследования процессов распространения трещин в машинах и аппаратах химического машиностроения, работающих в условиях статического и циклического нагружения с учетом физической и геометрической нелинейности.

Разработан новый специальный многослойный уточненный конечный элемент с полилинейной функцией пополнения перемещений в плане и нелинейным законом аппроксимации перемещений по толщине. Элемент позволяет на базе итерационно-аналитической теории оболочек моделировать процессы распространения магистральных трещин в многослойных пространственных системах с учетом расслоения.

На базе нового конечного элемента создана модификация метода дискретно-виртуального продвижения зон расслоения для уточнённого исследования процессов разрушения многослойных конструкций химического машиностроения. Модифицированный метод позволяет, за счет возможности использования частично разрушенных конечных элементов, более точно описывать реальный фронт расслоения в конструкции.

Разработан эффективный алгоритм, позволяющий в физически и геометрически нелинейных постановках моделировать процессы совместного распространения магистральных трещин с учетом процессов расслоения для оценки остаточной прочности элементов химического оборудования. При этом, для оценки параметров трещиностойкости магистральных трещин использован энергетический критерий  $J$ -интеграла, а для определения параметров распространения зон расслоений – критерий, базирующийся на определении величины энергии  $G$ , необходимой для продвижения расслоения на площадь  $\Delta S$ .

Разработан алгоритм, позволяющий в физически и геометрически нелинейных постановках моделировать процессы совместного распространения магистральных трещин с учетом процессов расслоения в условиях циклического нагружения при  $R$  больше 0. При этом для магистральных трещин используется стандартный подход по  $da/dN$ – $\Delta K$  кривым, а для моделирования продвижения зон расслоения используется метод дискретно-виртуального продвижения зон расслоения с оценкой величины приращения по  $db/dN$ – $\Delta G$  кривым.

Апробация разработанной методики и реализованных на ее основе численных алгоритмов проведена путем решения ряда контрольно-тестовых задач. Сравнение результатов численных исследований с экспериментальными и аналитическими данными свидетельствует об их хорошем согласовании как по величине и скорости развития магистральных трещин, так и по характеру развития зон расслоения при циклическом нагружении.

Разработаны автоматизированные системы непрерывной информационной поддержки жизненного цикла объектов химической промышленности, позволяющие не только выполнять мониторинг оборудования в процессе его эксплуатации, но также прогнозировать сценарии возможного развития зон разрушения при возникновении нештатных или аварийных ситуаций.

Анализ результатов исследования жизненного цикла таких объектов показал, что моделирование процессов расслоения в многослойных элементах оборудования химической промышленности приводит к существенному изменению напряженно-деформированного состояния конструкции в целом и позволяет существенно уточнить результат по сравнению с моделированием без учета этого фактора.

*Ключевые слова:* пространственная конструкция, разрушение, трещина, зона расслоения, циклическая трещиностойкость.

## ANNOTATION

**Chemieris A. O. Reliability and longevity of machines and apparatuses of chemical productions taking into account the evolution of their destruction.** – Manuscript copyright.

A thesis for obtaining a scientific degree of a candidate of engineering sciences on specialty 05.05.13 – machines and vehicles of chemical productions. - National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute” MSE of Ukraine, Kyiv, 2018.

The dissertation is devoted to the development of new methods of research, analysis and designing of machines and apparatuses of chemical production, taking into account evolutionary processes of accumulation and propagation of defects and cracks in them, in order to increase their reliability and durability.

An effective modification of the iterative-analytical theory of shells in relation to the solution of the problems of the destruction mechanics in spatial structures was created.

A new special multilayer refined finite element for modeling the processes of propagation of main cracks in multilayer spatial systems with consideration of delamination processes has been developed.

Based on developed FE a modification of the method of discrete-virtual propagation of delamination zones was created for a precise investigation of the fracture processes of multilayer constructions of chemical engineering.

An effective algorithm is developed which allows to modeling the processes of joint propagation of main cracks in physically and geometrically nonlinear formulation taking into account the delamination processes to assess the residual strength of chemical equipment elements.

The automated systems of continuous information support of the chemical industry objects life cycle are developed, allowing to carry out monitoring the equipment during its operation, to predict scenarios of possible development of fracture zones in case of occurrence contingency or emergency situations.

*Keywords:* spatial construction, fracture, crack, delamination zone, cyclic crack-resistance.