На здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки за 2017 рік

**Цикл наукових праць**

# “НАПРУЖЕНИЙ СТАН СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ ТІЛ, СПРИЧИНЕНИЙ ДІЄЮ ПОЛІВ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ"

***Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України***

(**Гачкевич О.Р.**, д-р фіз.-мат. наук , **Попович В.С.**, д-р техн. наук, **Терлецький Р.Ф.**, д-р фіз.-мат. наук, **Ясінський А.В.**, д-р фіз.-мат. наук)

***Інститут проблем міцності ім. Г.С. Писаренка НАН України***

(**Харченко В.В.**, чл.-кор. НАН України, **Чирков О.Ю.,** д-р техн. наук)

***Інститут електрозварювання ім. О.Є. Патона НАН України***

(**Махненко О.В.**, д-р техн. наук)

***Дніпропетровський національний університет ім. Олеся Гончара***

(**Лобода В.В.**, д-р фіз.-мат. наук)

## *Загальна характеристика праць*

Цикл наукових праць складається із 12 монографій; 8 розділів монографій, 150 наукових статей; 11 патентів України; свідоцтва про реєстрацію авторського права на твір; національного нормативного документу; довідникового посібника; 4 енциклопедичних статей видавництва “Springer”.

***Монографії:***

1. ***Гачкевич А.Р.*** Термомеханика электропроводных тел при воздействии квазиустановившихся электромагнитных полей. – К.: Наук. думка, 1992. – 192 с.

2. *Говоруха В. Б.,* ***Лобода В.В.*** Моделі та методи механіки руйнування для п’єзоелектричних тіл з міжфазними тріщинами. – Дніпропетровськ: Вид-во Дніпропетр. нац. ун-ту, 2013. – 252 с.

3. *Моделювання* та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. У 5-и т. Т. 1: Термомеханіка багатокомпонентних тіл низької електропровідності / Я.Й. Бурак, **О.Р. Гачкевич**, **Р.Ф. Терлецький**. – Львів: СПОЛОМ, 2006. – 300 с.

4. *Моделювання* та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. Т. 2: Механотермодифузія в частково прозорих тілах / **О.Р. Гачкевич**, **Р.Ф. Терлецький**, Т.Л. Курницький. – Львів: СПОЛОМ, 2007. – 184 с.

5. *Моделювання* та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. Т.3: Термопружність термочутливих тіл / Р.М. Кушнір, **В.С.Попович**. – Львів: СПОЛОМ, 2010. – 412 с.

6. *Моделювання* та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. Т.4: Термомеханіка намагнечуваних електропровідних термочутливих тіл / **О.Р. Гачкевич, Б.Д. Дробенко.** – Львів: СПОЛОМ, 2010. – 256 с.

## *Загальна характеристика праць*

7. *Моделювання* та оптимізація в термомеханіці електропровідних неоднорідних тіл / Під заг. ред. Я.Й. Бурака, Р.М. Кушніра. Т.5: Оптимізація та ідентифікація в термомеханіці неоднорідних тіл / Р.М. Кушнір, **В.С. Попович, А.В. Ясінський.** – Львів: СПОЛОМ, 2011. – 256 с.

8. **Харченко *В.В.*** Моделирование процессов высокоскоростного деформирования материалов с учётом вязкопластических эффектов. – Киев: ЛОГОС, 1999. – 280 с.

9. ***Чирков А.Ю***. Смешанная схема метода конечных элементов для решения краевых задач теории упругости и малых упругопластических деформаций. – К.: Ин–т пробл. прочности им. Г.С.Писаренко НАН Украины, 2003. – 250 с.

10. ***Gaczkiewicz A****., Kasperski Z.* Modele i metody matematyczne w zagadnieniach brzegowych termo-mechaniki cial przewodzących. – Opole: OW, Politechnika Opolska, 1999. – 368 s.

11. *Manufacturing* processes. Actual problems – 2013. Vol. 1: Basic science applications in manufacturing processes. Studia i monografie, z. N 364 / Ed. by M. Gajek, **A. Hachkevych**, A. Stanik-Besler. University of Technology Opole, (ISSN 978-83-62736-85). – Opole, 2013.

12*. Makhnenko V.I., Velikoivanenko E.A., Pochinok V.E.,* ***Makhnenko O.V.****, Rozynka G.Ph., Pivtorak N.I.* Numerical Methods for the Predictions of Welding Stresses and Distortions // Welding and Surfacing Reviews. – 1999, Vol. 13, Part 1. –P. 1–146 (ISSN: 1073-4511, ISBN: 90-5823-041-4).

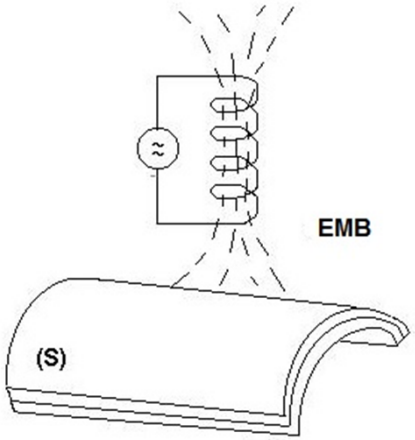
Переважну кількість статей (120) опубліковано у провідних міжнародних виданнях, які містяться у базах даних SCOPUS. Загальна кількість посилань на публікації авторів складає за даними SCOPUS – 761 (h-індекс = 14), а за даними Google Scoolar – 2051 (h-індекс = 19). За тематикою циклу праць захищено 12 докторських та 15 кандидатських дисертацій.

## Цикл наукових праць об’єднує наступні розділи:

1. ***Моделі термомеханіки багатокомпонентних деформівних твердих тіл низької електропровідності при електромагнітному опроміненні;***
2. ***Моделі темомеханіки для шаруватих тіл та систем тіл зі складовими різної прозорості за теплового випромінювання;***
3. ***Моделі та методи розрахунку кусково-однорідних тіл з міжфазними тріщинами під дією, механічних, теплових та електричних полів***
4. ***Математичні моделі та методи визначення, дослідження і оптимізації температурних полів і напружень у термочутливих елементах конструкцій;***
5. ***Варіант теорії неізотермічної електро-магніто-термо-пружно-пластичності термочутливих електропровідних тіл;***
6. ***Удосконалення методів розрахункового аналізу задач термомеханіки з обґрунтування міцності елементів обладнання АЕС;***
7. ***Математичні моделі визначення напружень і деформацій конструкцій при зварюванні, термообробці та експлуатаційному навантаженні, в тому числі, радіаційному опромінюванні.***

σ <

# Моделі термомеханіки багатокомпонентних деформівних твердих тіл низької електропровідності при електромагнітному опроміненні




**Розглянуто** неметалічні тверді тіла та тіла з домішками (гомогенні тверді суміші чи розчини) – однофазні кристалічні чи аморфні тверді речовини змінного складу з двох або більше компонент, що характеризуються поляризацією компонент і низькою електропровідністю (~$10^2$ $Ом^{-1}$ $м^{-1}$ ) – тіла низької електропровідності (ТНЕ) **за дії** механічних, теплових, дифузійних і різного типу електромагнітних навантажень, зокрема **квазіусталеного електромагнітного випромінювання** (ЕМВ) від радіочастот (до $10^{11}$ Гц) до світлових ($10^{11}$-$10^{15}$ Гц)

**ЗАСТОСУВАННЯ:** розробка режимів обробки ТНЕ високочастотним (ВЧ), надвисокочастотним (НВЧ), тепловим і лазерним ЕМВ, зокрема з метою інтенсифікації дифузійних процесів (при дегазації, сушці, очищенні, нанесенні зміцнювальних покрить, легуванні і т.п.)

## *Схема побудови моделей*

А). Балансові рівняння механіки для сумішей (вплив ЕМВ через чинники дії на окремі компоненти густини пондеромоторних сил, моментів та притоку енергії) → наближення слабкого твердого розчину (СТР) → рівняння енергетичного стану домішкових компонент;

В). СТР: нерівність росту ентропії (нерівність Клаузіуса-Дюгема), А). і Б). → зведена дисипативна нерівність;

В). Модель взаємодії ЕМВ з багатокомпонентним тілом → рівняння ЕМВ в тілі, чинники дії ЕМВ;

Г). Простір станів. Визначальні (конститутивні чи фізичні) рівняння для ТНЕ. Чинники дії ЕМВ на окремі компоненти;

Д). Ключові диференціальні рівняння, що описують процеси тепломасопереносу та деформування в багатокомпонентних ТНЕ при дії ЕМВ. Лінеаризація.

Е). Постановка (на основі наближень електродинаміки) з врахуванням специфіки опису квазіусталеного ВЧ, НВЧ, теплового та лазерного випромінювання крайових задач механотермодифузії в багатокомпонентних ТНЕ за умов дії випромінювання;

Є). Розробка методики розв'язування сформульованих задач. Дослідження впливу ЕМВ з різними енергетичними та частотними (спектральними) параметрами на тепломасоперенос та напружений стан в багатокомпонентних ТНЕ.

***При цьому розвинуто оригінальну методику розв'язування рівняння балансу теплової енергії газової домішки:*** Враховується спричинена дією ЕМВ неоднорідність енергетичного стану компонент, яка зумовлює нерівноважні процеси обміну енергією в фізично малих елементах тіла. Взаємодія час-тинок домішкових компонент з каркасом в слабкому твердому розчині моделюється взаємодією з квазічастинками – фононами. Енергія, яку отримує каркас від домішки, виражається через частотні і енергетичні параметри фононів, що визначаються за відомими параметрами зовнішнього ЕМВ (яке у випадку світлового діапазону частот описується квазічастинками – фотонами) та поляризаційними чи поглинальними характеристиками домішкових компонент.

***Досліджено тіла та отримано:***

1) ***з домішкою, яка поляризується при односторонньому НВЧ опроміненні ТЕ-хвилею.***

а) залежність характеру розподілу тепловиділень, температури та напружень і їх рівнів від співвідношення між довжиною електромагнітної хвилі $\lambda_*$ та характерним розміром $h$ ;

б) залежність швидкості дифузії домішок від їх поляризаційних характеристик і параметрів хвилі;

в) глибинний характер стимуляції дифузії домішок (зокрема, води в околах поверхні);

г) зростання максимальних рівнів розтягуючих напружень зі зменшенням довжини хвилі НВЧ опромінення;

д) хвильовий характер розподілу напружень при $\lambda_* < h$ .

2) ***з домішкою, яка поляризується в полі стоячої хвилі (за умови повного відбивання ТЕ-хвилі на межі ТНЕ – метал).***

а) зростання рівнів тепловиділень та швидкості дифузії домішок при утворенні стоячої хвилі (яка визначається з умови $m\lambda_* \approx h, \quad m = 1, 2 \cdots$ );

б) нижчі рівні максимальних розтягуючих напружень при дії НВЧ випромінювання міліметрового діапазону, ніж сантиметрового.

3) ***з домішкою, яка поляризується в полі конденсатора.***

а) рівномірність нагріву при незначних рівнях напружень;
б) зростання швидкості дифузії домішок з підвищенням напруги на обкладках конденсатора чи частоти поля;
в) значне зростання рівня напружень в околах певних (''резонансних'') частот ЕМП.

4) ***з газовими домішками за теплового опромінювання та теплового опромінювання з коригованим спектром.***

***- за теплового опромінення*:**

а) зростання нерівномірності розподілу температури та максимальних рівнів розтягуючих та стискуючих напружень при зменшенні температури джерела випромінювання від 3000 до 1000 К;
б) одночасне прискорення дифузії домішок окису вуглецю та води (на відміну від дії ЕМП радіочастотного діапазону), але лише в приповерхневій області зі сторони опромінення;
в) залежність швидкості дифузії домішок окису вуглецю та води від температури джерела випромінювання;

***- за теплового опромінення з коригованим спектром (реалізованого наявністю частково прозорої підобласті):***

а) рівномірність прогріву при низьких рівнях напружень (порівняно з нагрівом тепловим випромінюванням);
б) можливість стимуляції дифузії окремих видів домішок.

5) ***з газовою домішкою при помірному лазерному опроміненні.***

а) залежність рівня напружень від спектральних параметрів лазерів (при однакових їх потужностях);
б) прискорення дифузії домішок окису вуглецю і води за відносно малих потужностей конкретних технологічних лазерів (за помірного опромінення);
в) можливість стимуляції дифузії лише одного виду домішки.

# Моделі та методи розрахунку кусково-однорідних тіл з міжфазними тріщинами під дією, механічних, теплових та електричних полів

**Нові точні аналітичні розв'язки** задач електропружності для електропроникної та електроізольованої міжфазних тріщин у п'єзоелектричних матеріалах (Рис. 1) з урахуванням зон контакту їх берегів

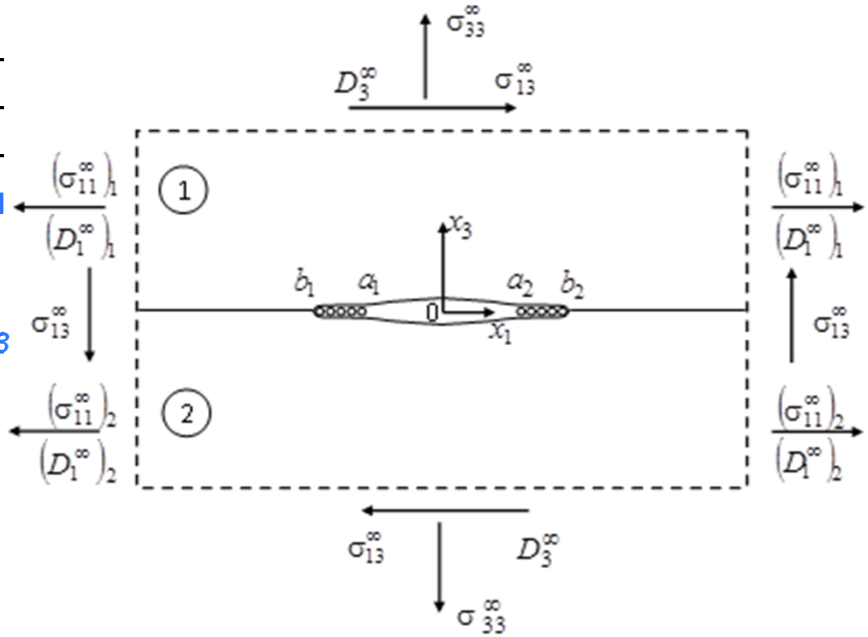



Рис. 1

*Представлення електромеханічних факторів через кусково-аналітичні функції*

$$[[\mathbf{V}'(x_1)]] = \mathbf{W}^{+}(x_1) - \mathbf{W}^{-}(x_1)$$

$$\mathbf{t}(x_1, 0) = \mathbf{G}\mathbf{W}^{+}(x_1) - \overline{\mathbf{G}}\mathbf{W}^{-}(x_1)$$

$$\mathbf{V} = [u_1, u_3, \varphi]^T \qquad \mathbf{t} = [\sigma_{13}, \sigma_{33}, D_3]^T$$

*Комбінована крайова задача Діріхле-Рімана*

$$\begin{cases} \Phi_1^{+}(x_1) + \gamma_1 \Phi_1^{-}(x_1) = 0, & x_1 \in a_1, a_2 \\ \mathrm{Im}\,\Phi_1^{\pm}(x_1) = 0, & x_1 \in b_1, a_1 \cup a_2, b_2 \end{cases}$$

*- точний розв'язок*

**Вперше:**

**а) показана важливість використання контактної моделі;**

**б) проаналізовано вплив спряжених механічних і електричних полів на довжини зон контакту та параметри руйнування;**

**в) проведено узагальнення методики на зовнішні міжфазні тріщини в п'єзоелектричних матеріалах.**

**Пріоритетні результати** стосовно врахування **електричної проникності середовища** в моделях міжфазної тріщини в п'єзоелектричних біматеріалах під дією механічних та електричних полів

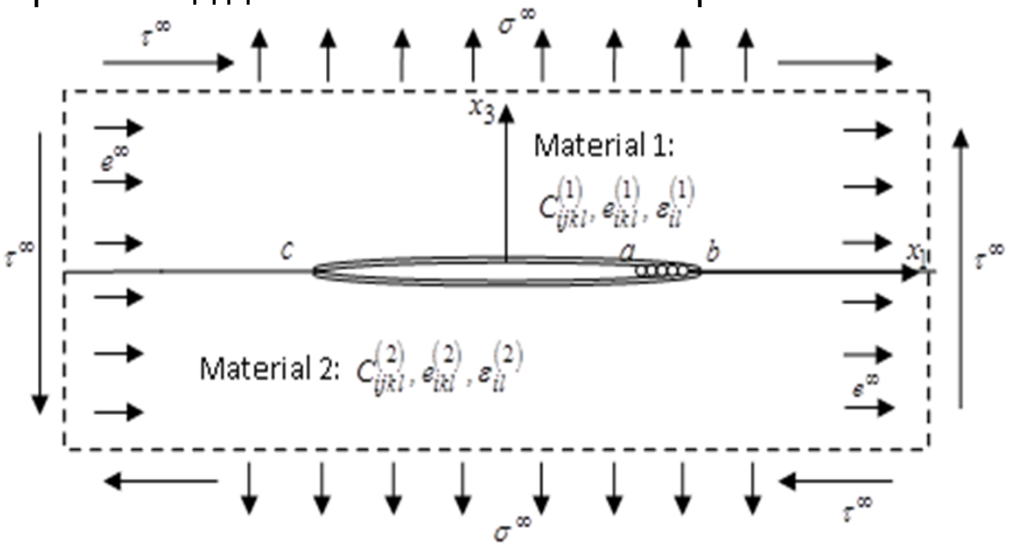



Рис. 2

Електричні граничні умови для частково електропроникної тріщини

$$D_3(u_3^+ - u_3^-) = -\varepsilon_a(\varphi^+ - \varphi^-)$$

$\varepsilon_a$ - *діелектрична проникність заповнювача тріщини*

**Новий точний розв'язок** для електродованої тріщини з зоною контакту між двома п'єзоелектричними матеріалами за дії електромеханічних полів (Рис. 2).

Вперше виявлено суттєвий вплив електричного поля, паралельного берегам тріщини, на довжину зони контакту.

Пріоритетні дослідження тріщин із зонами контакту між двома матеріалами під дією комбінованого механічного навантаження, електричного та теплового потоків:

- комбінації ізотропних і анізотропних матеріалів;
- п'єзоелектричні матеріали;
- термопружна задача для рухливої міжфазної тріщини з зонами контакту

- **Нові** точні аналітичні розв'язки для міжфазних тріщин в матеріалах, що мають п'єзоелектричну і п'єзомагнітну фази.

- **Пріоритетні** результати при дослідженні періодичних систем міжфазних тріщин в ізотропних, анізотропних і п'єзоелектричних матеріалах під дією полів різної природи

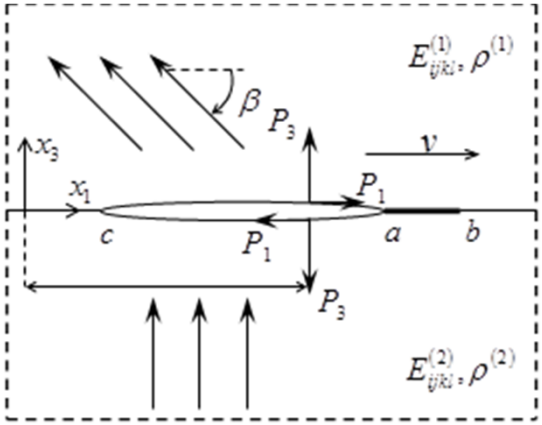
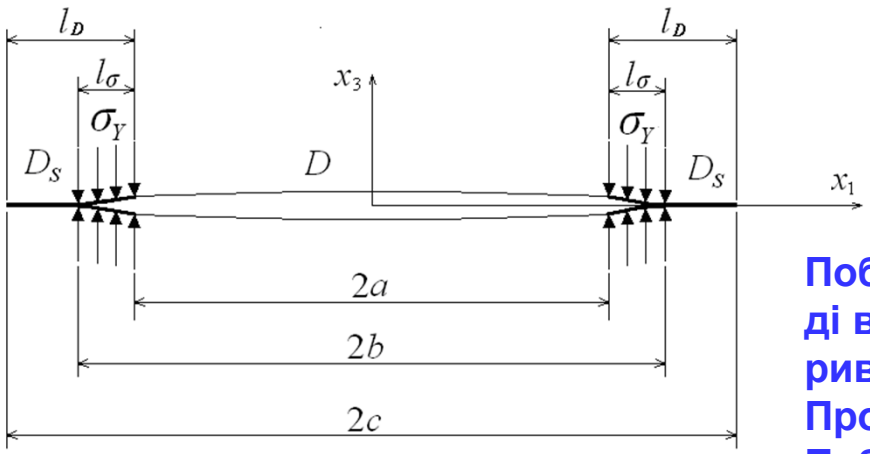



Рис. 3

**Нові розв'язки** задач про тріщини з зонами контакту, що рухається по межі поділу ізотропних та п'єзоелектричних матеріалів під дією механічних і електричних полів (Рис.3).

**Нові механічні ефекти**, зокрема, суттєвий ріст зон контакту, коефіцієнтів інтенсивності напружень та швидкості звільнення енергії при наближенні швидкості до швидкості хвиль Релея.

**Пріоритетні результати** по дослідженню внутрішніх та міжфазних тріщин в п'єзоелектричних матеріалах із зонами електромеханічного передруйнування.




$l_\sigma = b - a$ - мехнічні зони ОМЗ

$l_D = c - a$ - зони електричного насичення

$D$ – скінченна електрична проникність тріщини

**Побудовано нові математичні моделі у вигляді векторних задач лінійного спряження з розривними правими частинами.**
**Проведено аналітичний аналіз цих моделей.**
**Побудовано алгоритми для реалізації критеріїв руйнування**

# Математичні моделі та методи визначення, дослідження і оптимізації температурних полів і напружень у термочутливих елементах конструкцій

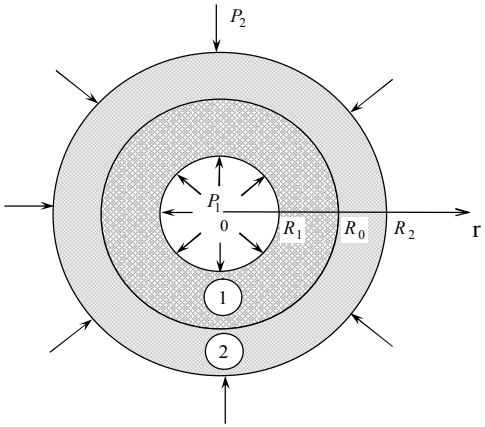



Рис. 1

Запропоновано нові математичні моделі та методи визначення одно- та двовимірних нестаціонарних температурних полів та термонапружень в кусково-однорідних, неоднорідних і термочутливих достатньо поширених у інженерній практиці елементах конструкцій канонічної геометрії за складного теплообміну, а також за відомої температури та додатково відомих переміщень на одній з межових поверхонь і відсутності інформації про теплове навантаження на іншій (через неможливість безпосереднього доступу до неї. Наприклад, температура внутрішньої межової поверхні $r = R_1$ довгого двошарового порожнистого циліндра невідома (Рис.1)).

Побудовано нові математичні моделі визначення асимптотичного температурного режиму і відповідних термонапружень у двошарових з фрикційним теплоутворенням різнорідних тілах за додатково відомими переміщеннями однієї із межових поверхонь і відсутності інформації про параметри неідеального теплового контакту їх складових (сумарний тепловий потік, термічний опір).

Розроблено методику зведення отриманих некласичних квазістатичних задач термопружності до обернених задач термопружності, які описуються інтегральними рівняннями першого роду, або до задач теплопровідності з некласичними межовими умовами та побудовано стійкі до малих змін вхідних даних їх аналітичні, аналітико-числові та числові розв'язки.

## Оптимізація зв'язаних полів за умов пластичного деформування матеріалу

Розроблено методику розв'язування задач оптимального за швидкодією (за найкоротший час) керування нестаціонарними одно- та двовимірними температурними режимами у термочутливих тілах за обмежень на функцію керування (температуру нагрівального середовища, тепловий потік на поверхні тіла) та максимальне значення інтенсивності напружень чи накопиченої пластичної деформації

$$U_1(\mathrm{x},\tau) \le u(\mathrm{x},\tau) \le U_2(\mathrm{x},\tau), \qquad \max_{\mathrm{x}\in\bar{V}}\left\{S(T),\Gamma_p(T)\right\} \le R(T,\tau),$$

яка передбачає зведення вихідних задач до розв'язування послідовності прямих та обернених задач термопластичності.

В межах теорії неізотермічних пружнопластичних процесів деформування елементів тіла за криволінійними траєкторіями малої кривини з використанням методу скінченних елементів побудовано числові алгоритми розв'язування сформульованих задач оптимізації.

Показано, що знайдені оптимальні за швидкодією температурні режими нагрівання термочутливих тіл дають змогу, шляхом вибору відповідних величин обмежуючих параметрів, керувати рівнем залишкових напружень і деформацій у тілі, що важливо з огляду забезпечення їх міцнісних та функціональних властивостей.

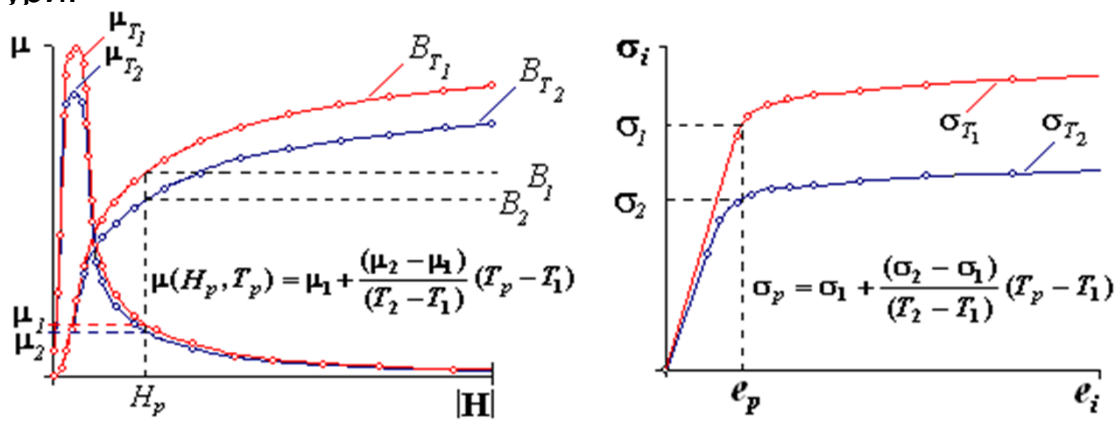
Знайдені оптимальні температурні режими дають змогу:

- підвищити продуктивність процесу термообробки;
- зменшити енергозатрати.

# Варіант теорії неізотермічної електро-магніто-термо-пружно-пластичності термочутливих електропровідних тіл

Запропоновано варіант теорії кількісного опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за дії комплексних (силових, температурних та електромагнітних) навантажень з урахуванням **температурної залежності** властивостей матеріалів, **пружно-пластичного** характеру **деформування** і **нелінійності** залежностей індукцій електричного та магнітного полів від відповідних напруженостей і температури.

Побудовано з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) і родини однокрокових багатопараметричних різницевих алгоритмів (з різними за величиною кроками числового інтегрування за часом рівнянь, що описують в запропонованій математичній моделі електромагнітні, теплові та механічні процеси) методику числового моделювання розглядуваних **взаємозв'язаних процесів** в електропровідних тілах.




*Числова апроксимація кривих намагнічування і деформування*

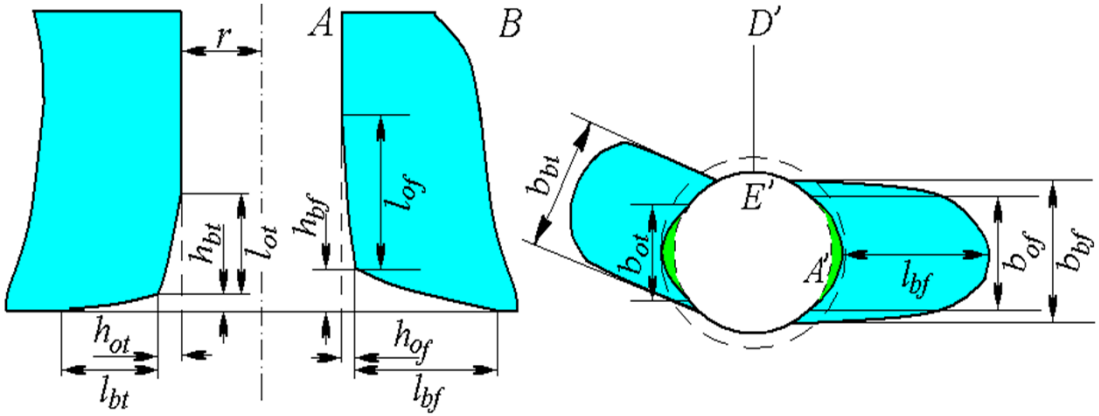
Для апроксимації температурно залежних кривих намагнічування, поляризації й деформування запропоновано інтерполяційні сплайни, побудовані за точками екпериментальних кривих, що описують поведінку матеріалів у широкому температурному діапазоні за дії ЕМП.

Розроблено відповідне **програмне забезпечення**.

Побудовано оптимальні **режими** високотемпературної індукційної обробки елементів конструкцій за відповідними критеріями.

На основі запропонованого варіанту теорії та створеного програмного забезпечення опрацьовано методику дослідження процесів деформування **елементів діючого енергетичного обладнання** теплових (ТЕС) і атомних (АЕС) електростанцій за різних режимів їх експлуатації (планових зупинок-пусків, аварійних зупинок, стаціонарної експлуатації з урахуванням термоциклування, гідравлічних випробувань) за врахування деградації матеріалу, експлуатаційних пошеоджень та ремонтних втручань. Розроблено теоретичні **основи технології виконання регламентних ремонтних робіт** на діючому енергообладнанні з метою зміцнення та подовження термінів його експлуатації.

Отримано кількісні **оцінки придатності** конкретних елементів енергоблоків (барабанів котлів високого тиску, теплообмінників, колекторів парогенераторів, екранних труб) до експлуатації понад парковий ресурс на ТЕС ДТЕК "Західенерго" та ВП "Запорізька АЕС". Визначено **оптимальні за напруженнями** форми технологічних вибірок металу в околах зон з пошкодженнями в трьох барабанах котлів діючих енергоблоків на Бурштинській та Добротвірській ТЕС, оцінено залишковий ресурс цих барабанів на постремонтній стадії експлуатації, внаслідок чого продовжено термін їх експлуатації на чітко окреслені терміни.




*Ремонтні вибірки на отворах і на тілі барабана в околі отворів з внутрішньої поверхні*

## Удосконалення методів розрахункового аналізу задач термомеханіки з обґрунтування міцності елементів обладнання АЕС

Розроблено ефективний числовий апарат розв'язання крайових задач неізотермічної термопластичності на основі змішаних схем МСЕ. Розвинуто загальну теорію змішаних схем МСЕ для розв'язання крайових задач неізотермічної термопластичності; сформульовано умови, що забезпечують стійкість та збіжність змішаних апроксимацій; запропоновано змішані апроксимації для розв'язання двомірних і просторових задач; побудовано матричні рівняння змішаного МСЕ з урахуванням статичних крайових умов; розроблено покроково-ітераційні алгоритми змішаного МСЕ для квазістатичних задач термопластичності.

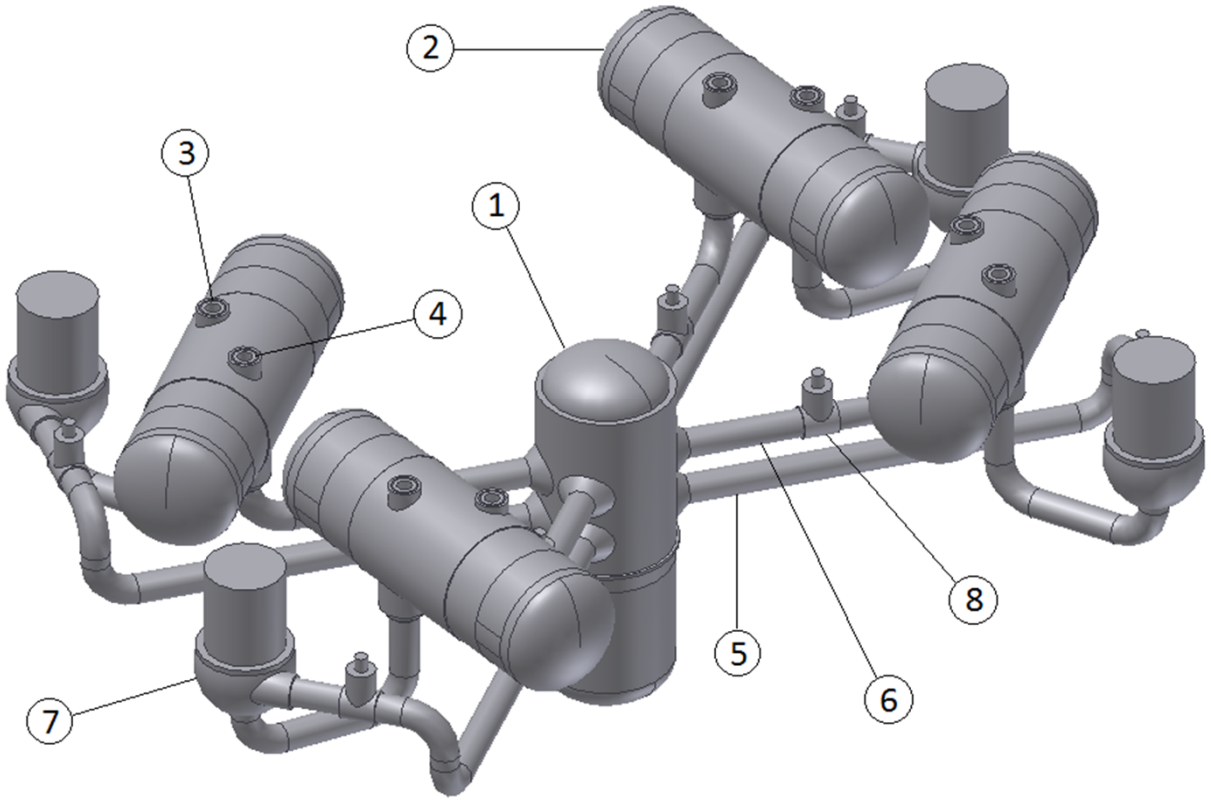
Удосконалено **методологію розрахунку на опір руйнуванню** елементів обладнання **І-го контуру АЕС** при моделюванні експлуатаційних та аварійних режимів навантаження. Сформульовано методичні засади та загальну схему розрахунку кінетики НДС та опору руйнуванню; запропоновано розрахункові підходи до оцінки залишкової технологічної напруженості та дефектності при пружно-пластичному моделюванні; розроблено тривимірні моделі МСЕ з включенням постульованих дефектів в розрахункову модель, що відповідає рекомендаціям МАГАТЕ; створено спеціалізоване програмне забезпечення, включене в перелік розрахункових кодів для обґрунтування безпеки ядерних енергетичних установок; розроблено галузевий нормативний документ для оцінки міцності і ресурсу корпусів реакторів ВВЕР під час експлуатації.

Встановлено **чинники**, що впливають на розрахункову оцінку **опору руйнуванню** (історія термосилового навантаження; неоднорідність нагрівання та охолодження; неоднорідність фізико-механічних властивостей і їх залежність від температури; пружно-пластичне деформування; просторовий характер НДС; поля залишкових напружень і деформацій; тривимірність розрахункових моделей з вбудованими дефектами; регулярність і щільність скінченно-елементних поділів; концепція обчислення параметрів руйнування в дискретних моделях МСЕ; жорсткість/податливість конструкцій приєднаного обладнання; повторне статичне навантаження).

# Розрахунковий аналіз опору руйнування корпусів реакторів і парогенераторів АЕС

Розроблені методи використані при виконанні **державної експертизи** результатів робіт з розрахункового **обґрунтування міцності і опору руйнуванню** корпусів реакторів ВВЕР-1000 згідно договорів з ДНТЦ ЯРБ Державної інспекції ядерного регулювання України, за результатами яких приймалося рішення про **продовження термінів експлуатації енергоблоків** № 1 Хмельницької, № 1 Південно-Української, № 1 та № 2 Запорізької, № 3 Рівненської АЕС.

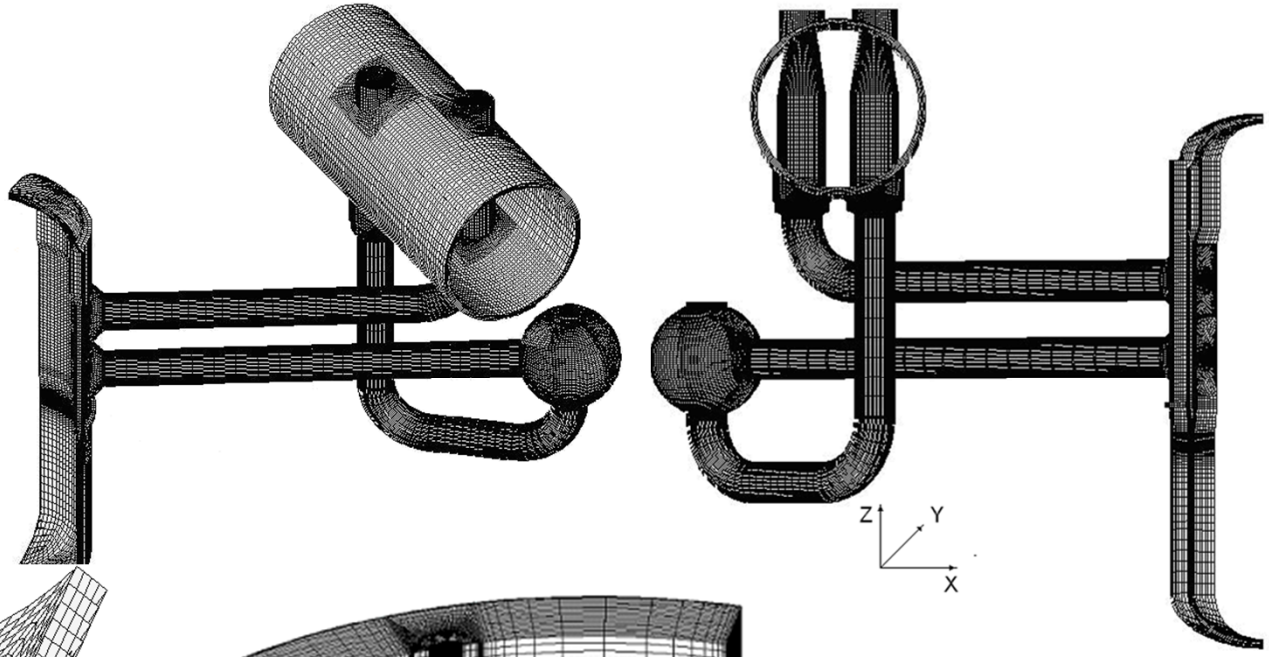
Схематизована модель реакторної установки ВВЭР-1000

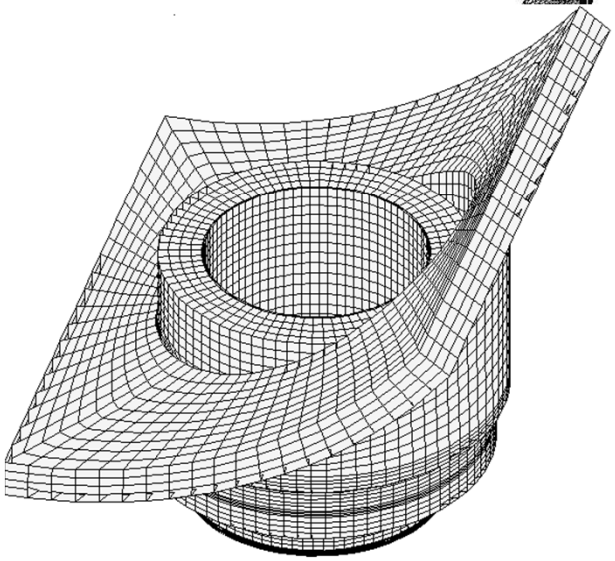


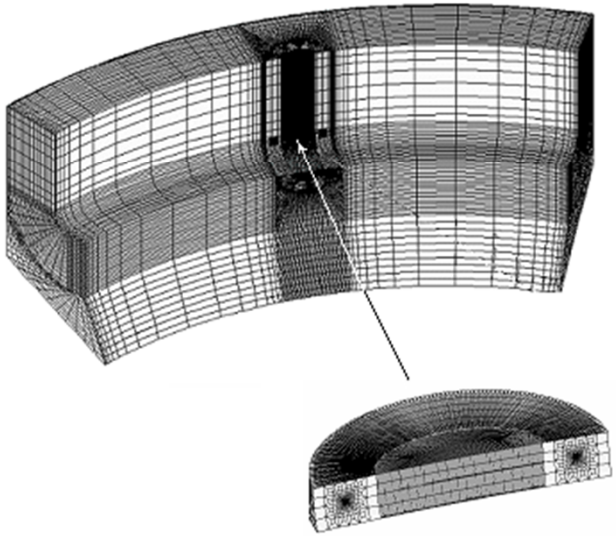

1 – корпус реактора, 2 – ПГ, 3 – «холодный» коллектор ПГ, 4 – «горячий» коллектор ПГ, 5 – «холодная» нитка ГЦТ, 6 – «горячая» нитка ГЦТ, 7 – ГЦН, 8 – главная запорная задвижка

## Скінченно-елементна модель петлі 1-го контуру реакторної установки ВВЕР-1000

Найпроблемніший елемент конструкції – вузол приварки колектора до корпусу парогенератора





Поглиблений розрахунок на опір руйнуванню вузла приварки виконано для фрагментів з вбудованою поверхневою тріщиною

а) повна модель; б) модель циліндричної частини; в) ½ частина фрагменту з вбудованою тріщиною

# Математичні моделі визначення напружень і деформацій конструкцій при зварюванні, термообробці та експлуатаційному навантаженні, в тому числі, радіаційному опромінюванні

## Комбіноване використання методів термопластичності та функції усадки

**1. Визначення** локальних напружень і пластичних деформації від одного зварного шва.

⇩

**2.** Загальні деформації зварної конструкції прогнозуються з використанням наближеного **методу функції усадки**.

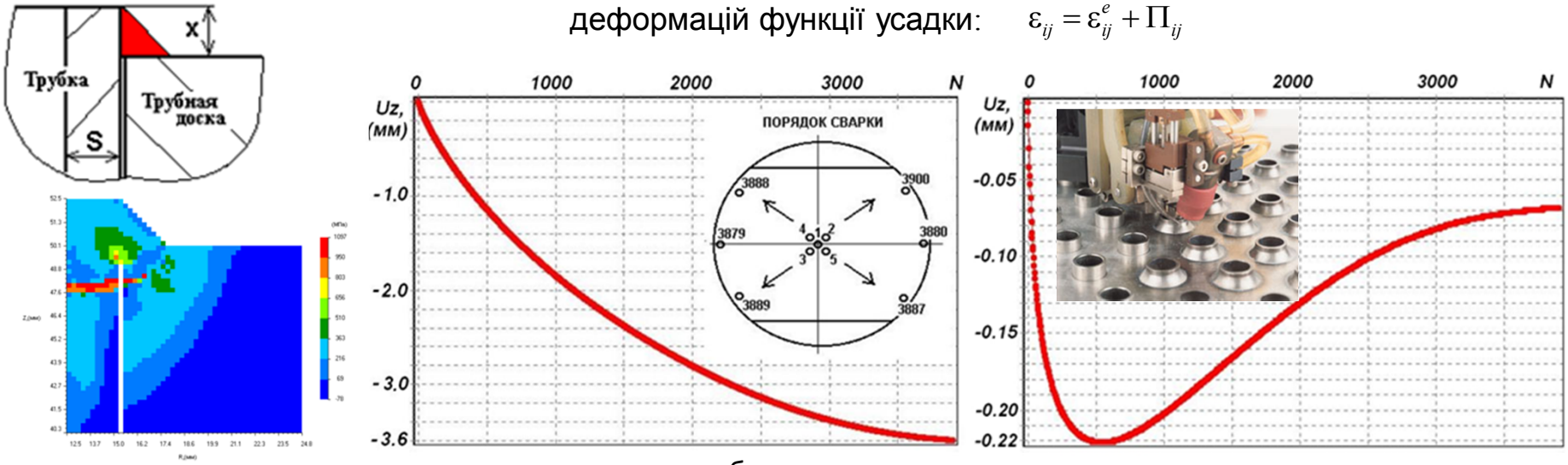
Для тонкостінних елементів **функція усадки** від зварного шва:

$$\Pi_{ij}(x,y,z)=\begin{Vmatrix} \left[\Delta_x(x)+\beta_x(x)\cdot z\right]\delta(y-y_w) & 0 & 0 \\ 0 & \left[\Delta_y(x)+\beta_y(x)\cdot z\right]\delta(y-y_w) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{Vmatrix}$$

де $\Delta_x(x)$, $\Delta_y(x)$, $\beta_x(x)$ і $\beta_y(x)$ є параметрами функції усадки,

$\delta(y-y_w)$ - дельта функція Дірака.

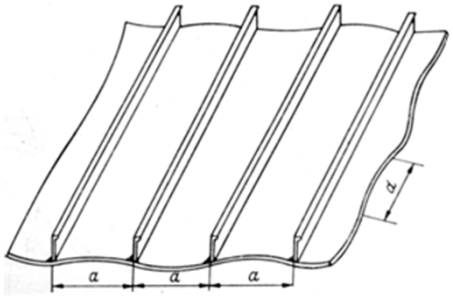
Повна деформація конструкції є сума пружних деформацій і деформацій функції усадки: $\varepsilon_{ij}=\varepsilon_{ij}^{e}+\Pi_{ij}$




а б в

Моделювання зварного з'єднання трубки до трубної дошки теплообмінника (а), кінетика прогину трубної дошки у процесі приварювання кожної з 3900 трубок теплообмінника з однією трубною дошкою (б) і з двома (в)

# Розрахункове прогнозування деформацій зварних конструкцій за термічного правлення багаточисельними локальними нагрівами з метою оптимізації та автоматизації технологічного процесу




Деформації жолоблення:
a – відстань між набором;
d – довжина половини хвилі

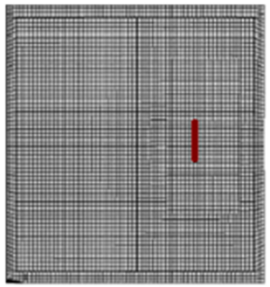
Величина „зайвої” площі листа, яку потрібно прибрати при термічному правленні в зоні бухтиноватості *0< x< a, 0< y< b:*

$$F = \frac{1}{2}\int_0^a\int_0^b \left[\left(\frac{dU_Z}{dx}\right)^2 + \left(\frac{dU_Z}{dy}\right)^2\right] dxdy$$

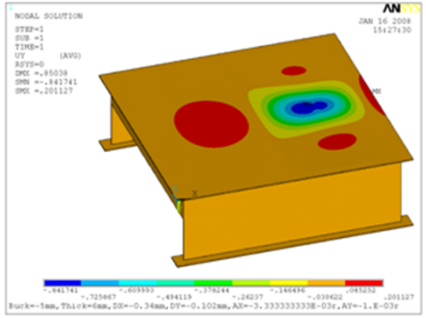
Термічне правлення:
1 – лист металу до правлення;
2 – зона нагріву;
3 – лист металу у процесі нагріву;
4 – після охолодження

Площина залишкових пластичних деформацій у площині листа металу від локального нагріву:

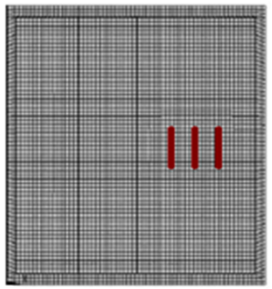
$$F_{пл.деф.} = \int_B^A \varepsilon_{XX}\varepsilon_{YY} dxdy,$$



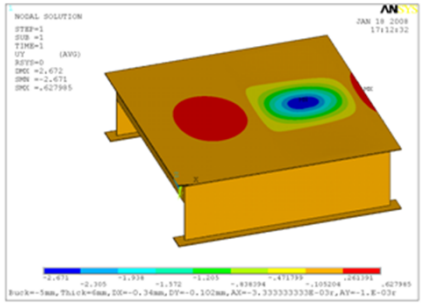
*а*



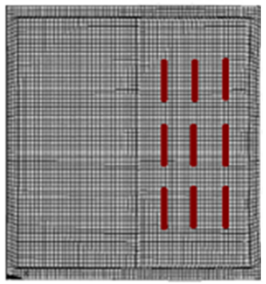
*б*



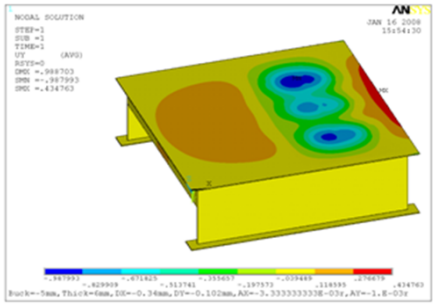
*в*



*г*



*д*



*е*

Переміщення з площини листа обшивки (зменшення величини бухтиноватості) від нагріву смуг довжиною 150 мм. Початкова величина деформації - 5 мм

Деформації жолоблення судових корпусних конструкцій

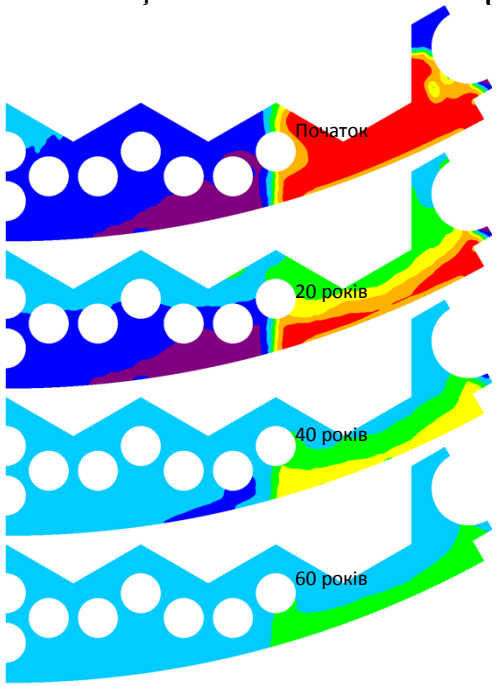
# Моделювання кінетики напружень і деформацій внутрішньо-корпусних пристроїв енергетичних реакторів ВВЕР-1000 в процесі експлуатації під дією радіаційного випромінювання

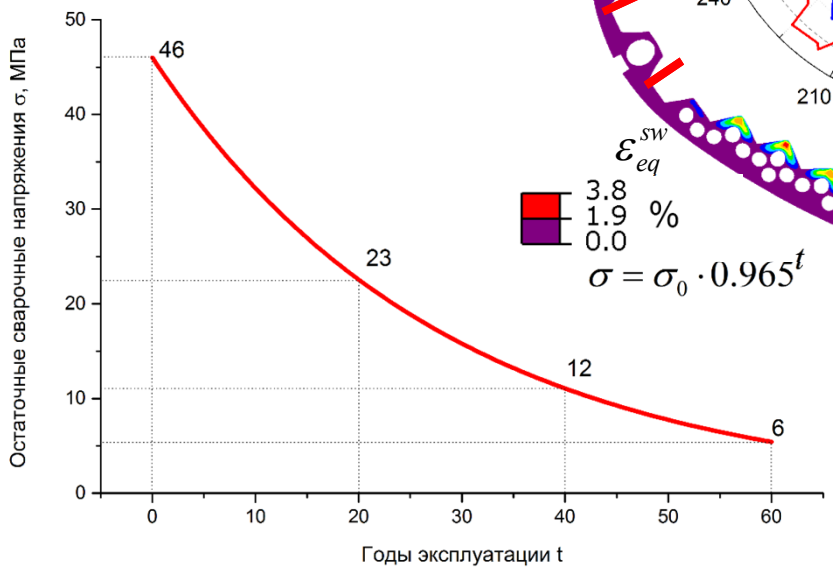
Радіаційне розпухання та радіаційна повзучість зварної вигородки (08Х18Н10Т) в умовах неоднорідного поля температури *T* і флюенсу *D*:

$$\frac{d\varepsilon_{eq}^{sw}}{dt} = C_D \cdot n \cdot D(t)^{n-1} \cdot f_1(T) \cdot f_2(\sigma_m, \sigma_{eq}) \cdot f_3(æ) \cdot \frac{dD}{dt}$$

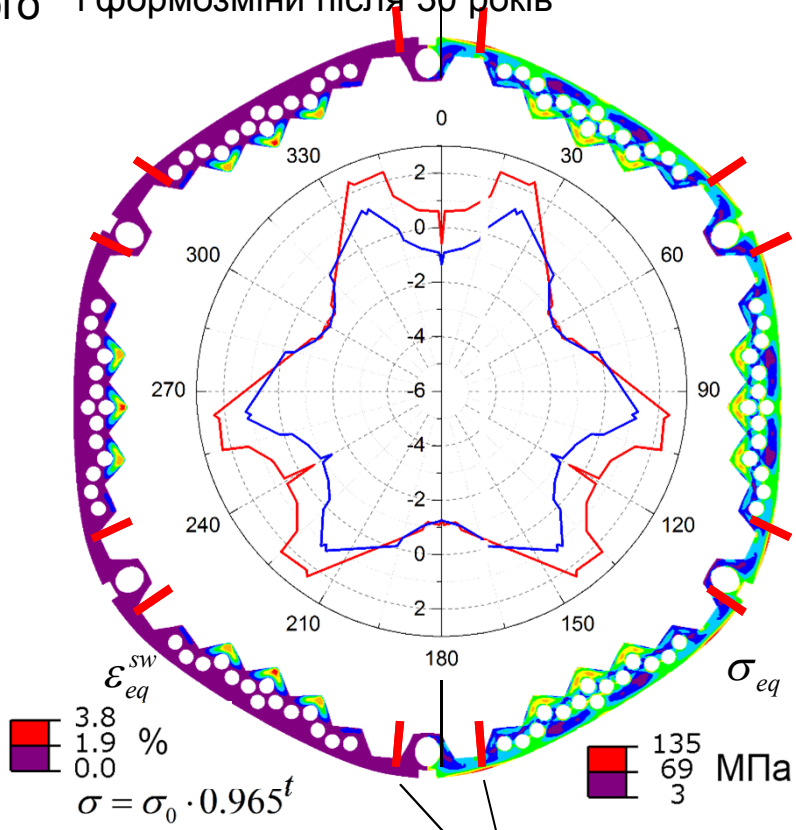
$$\frac{d\varepsilon_{eq}^{c}}{dt} = \left( B_0 \frac{dD}{dt} + \omega \frac{dS}{dt} \right) \sigma_{eq}, \quad d\varepsilon_{eq}^{c} > 0, \quad \varepsilon_{eq}^{c}\Big|_{t=0} = 0$$

Релаксація залишкових зварювальних напружень:




Деформації розпухання, напружений стан і формозміни після 30 років




Розташування зварних з'єднань