

На здобуття Державної премії України в галузі науки і техніки за 2016 рік

Цикл наукових праць

**“НАПРУЖЕНИЙ СТАН СТРУКТУРНО-НЕОДНОРІДНИХ ТІЛ,
СПРИЧИНЕНИЙ ДІЄЮ ПОЛІВ РІЗНОЇ ФІЗИЧНОЇ ПРИРОДИ”**



Представлений Інститутом прикладних проблем
механіки і математики ім. Я.С. Підстригача НАН України

Автори:



***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 імені О.Є. Патона НАН України

(Махненко О.В., д-р техн. наук)



Дніпропетровський національний університет імені Олеся Гончара

(Лобода В.В., д-р фіз.-мат. наук)

Загальна характеристика праць

Цикл наукових праць складається із 12 монографій; 5 розділів монографій, 139 наукових статей; 11 патентів України; національного нормативного документу; довідникового посібника; 4 енциклопедичних статей видавництва “Springer”.

Монографії:

1. **Гачкевич А.Р.** Термомеханіка електропровідних тел при впливі квазіустановившихся електромагнітних полів. – 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 багатоконпонентних 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. *Модельювання 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.: Ін-т пробл. прочності ім. Г.С.Писаренко НАН України, 2003. – 250 с.

10. **Gaczkiewicz A., Kasperski Z.** Modele i metody matematyczne w zagadnieniach brzegowych termo-mechaniki ciał 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., Rozyinka 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, а саме 117, опубліковано у провідних міжнародних виданнях, які містяться у базах даних SCOPUS. Загальна кількість посилань на публікації авторів складає за даними SCOPUS – 742 (h-індекс = 14), а за даними Google Scholar – 1980 (h-індекс = 19). За тематикою циклу праць захищено 12 докторських та 14 кандидатських дисертацій.

Загальна характеристика праць



- Int. J. Solids and Structures (імпакт фактор – 2.25) – 8 статей
- Archive of Applied Mechanics (1.44) та Thermal Stresses (1.27) – по 4 статті
- International J. of Fracture (1.35) та Mech. Res. Commun (1.69) – по 3 статті,
- Acta Mechanica (1.27) та Engineering Mathematics – по 2 статті,
- Mechanics of Materials (2.57),
- Theor. and Appl. Fracture Mech. (1.18),
- International J. Eng. Sciences (2.21),
- International J. Heat and Mass Transfer (2.95),
- J. of Engineering Mathematics (1.08),
- European J. Mechanics A/Solids (2.34) ...

Volume 62, No. 1, June 2014
Journal of Engineering Mathematics



Цикл наукових праць містить наступні розділи:

- 1. Моделі термомеханіки багатокomпонентних деформівних твердих тіл низької електропровідності при електромагнітному опроміненні;***
- 2. Моделі термомеханіки 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. Вдосконалення 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.***

Моделі термомеханіки багатокомпонентних деформівних твердих тіл низької електропровідності при електромагнітному опроміненні

ОБ'ЄКТ ДОСЛІДЖЕННЯ: неметалічні тверді 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 провідністю)
 $10^2 \text{ Ом}^{-1} \text{ м}^{-1}$ – тіла низької електропровідності (ТНЕ)

НАВАНТАЖЕННЯ: механічні, теплові, дифузійні й електромагнітні, зокрема квазіусталене електромагнітне випромінювання (ЕМВ) від радіочастот (10^{11} Гц) до світлових (10^{11} - 10^{15} Гц)

ДОСЛІДЖУВАНІ ПРОЦЕСИ: електромагнітні, теплові, механічні, дифузійні

ДОСЛІДЖУВАНІ ПАРАМЕТРИ: характеристики ЕМВ і напруженого стану, температура, концентрації компонент

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

Засади побудови моделей

Теорія сумішей, зокрема механіка сумішей та нерівноважна термодинаміка сумішей; модельне описання взаємодії ЕМВ з тілом (статистичний підхід); теоретично-практичний підхід до побудови визначальних рівнянь (рівняння стану та кінетичні співвідношення). Наближення електродинамічної теорії (квазістаціонарне та геометричної оптики). Феноменологічна теорія випромінювання.

Схема побудови моделей

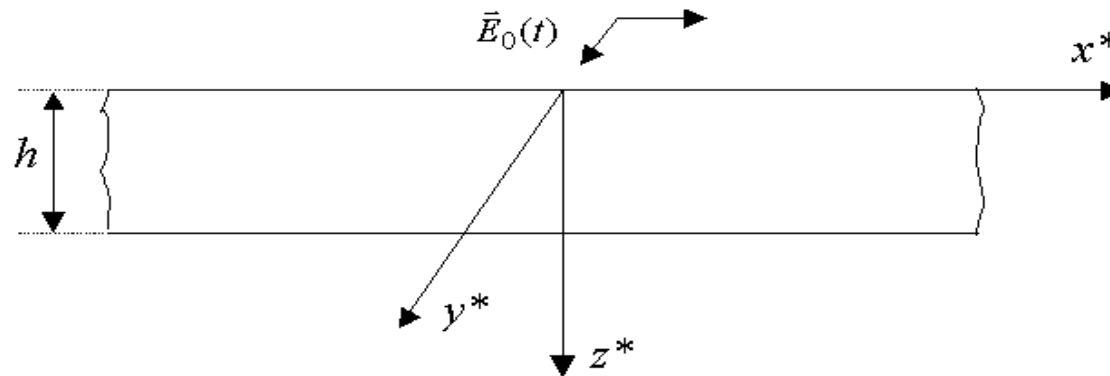
- А). Балансові рівняння механіки для сумішей (вплив ЕМВ через чинники дії на окремі компоненти густини пондеромоторних сил, моментів та притоку енергії) → наближення слабкого твердого розчину (СТР) → рівняння енергетичного стану домішкових компонент;
- В). СТР: нерівність росту ентропії (нерівність Клаузіуса-Дюгема), А). і Б). → зведена дисипативна нерівність;
- В). Модель взаємодії ЕМВ з багатокомпонентним тілом → рівняння ЕМВ в тілі, чинники дії ЕМВ на тіло;
- 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.

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 частинок 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 та характеристиками домішкових компонент.

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.

ШАР З ДОМІШКОЮ, ЯКА ПОЛЯРИЗУЄТЬСЯ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ НВЧ-ОПРОМІНЕННІ

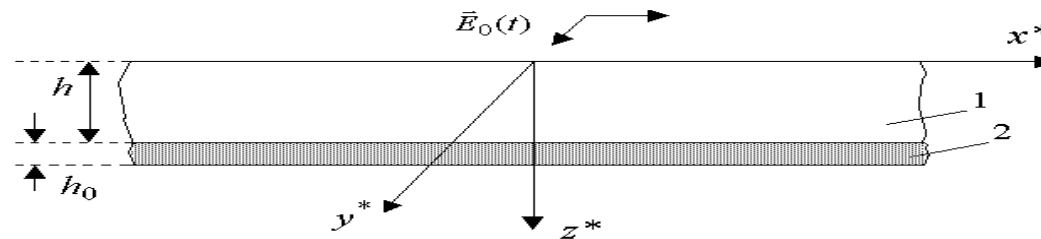


ТЕ-хвиля: $\dot{\vec{E}}_0(0, t) = \dot{\vec{E}}_0(t) = \{E_{0x}, E_{0y}, 0\}$

Отримано

- 1) залежність характеру розподілу тепловиділень, температури та напружень в шарі і їх рівнів від співвідношення між довжиною електромагнітної хвилі l_* і товщиною шару h ;
- 2) залежність швидкості дифузії домішок від їх поляризаційних характеристик та параметрів TEM-хвилі;
- 3) глибинний характер стимуляції дифузії домішок в шарі (зокрема, води в околах обох основ шару);
- 4) зростання максимальних рівнів розтягуючих напружень в шарі зі зменшенням довжини хвилі НВЧ опромінення;
- 5) хвильовий характер розподілу напружень в шарі при $l_* < h$.

ШАР З ДОМІШКОЮ, ЯКА ПОЛЯРИЗУЄТЬСЯ В ПОЛІ СТОЯЧОЇ ХВИЛІ

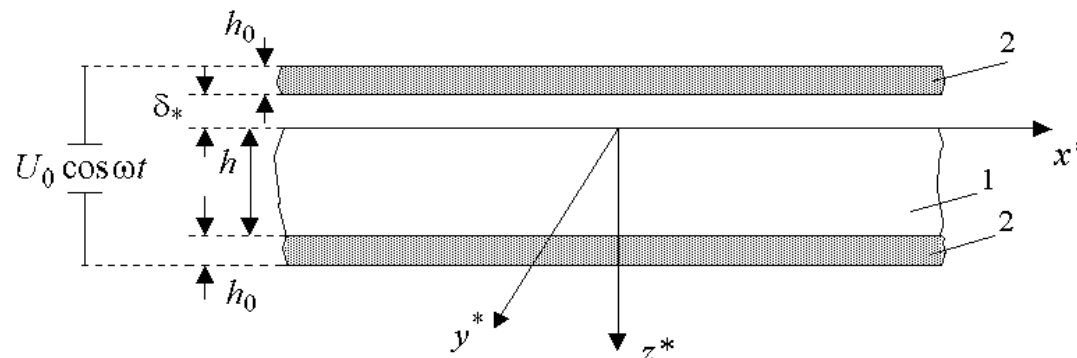


Умова повного відбивання ТЕ-хвилі на межі ГНЕ - метал

$$Z^{(2)} \ll Z^{(1)}, \quad Z^{(n)} = \dot{E}_x^{(n)} / \dot{H}_y^{(n)} = -\dot{E}_y^{(n)} / \dot{H}_x^{(n)}, \quad (n=1,2).$$

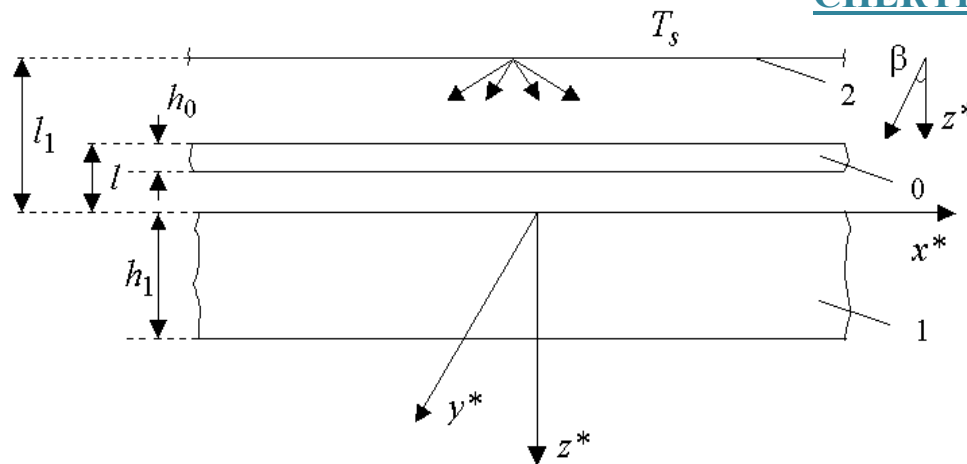
- 1) зростання рівнів тепловиділень та швидкості дифузії домішок при утворенні стоячої хвилі (яка визначається з умови $ml^* \gg h$, $m=1, 2, \dots$);
- 2) нижчі рівні максимальних розтягуючих напружень в шарі при дії НВЧ випромінювання міліметрового діапазону, ніж сантиметрового.

ШАР З ДОМІШКОЮ, ЯКА ПОЛЯРИЗУЄТЬСЯ В ПОЛІ ПЛОСКОГО КОНДЕНСАТОРА



- 1) рівномірність нагріву шару при незначних рівнях напружень;
- 2) зростання швидкості дифузії домішок з підвищенням напруги на обкладках конденсатора чи частоти поля;
- 3) значне зростання рівня напружень в околах певних ("резонансних") частот ЕМП.

ЧАСТКОВО-ПРОЗОРИЙ ШАР З ГАЗОВИМИ ДОМІШКАМИ ПІД ДІЄЮ ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА ТЕПЛООВОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ З КОРИГОВАНИМ СПЕКТРОМ



Випромінювання поверхні 2

$$I_{l \text{ sou}} = \bar{k} \frac{2\rho\bar{c}_1}{l^5 \exp(\bar{c}_2 / l T_s - 1)}, \quad \bar{k} = \text{const.}$$

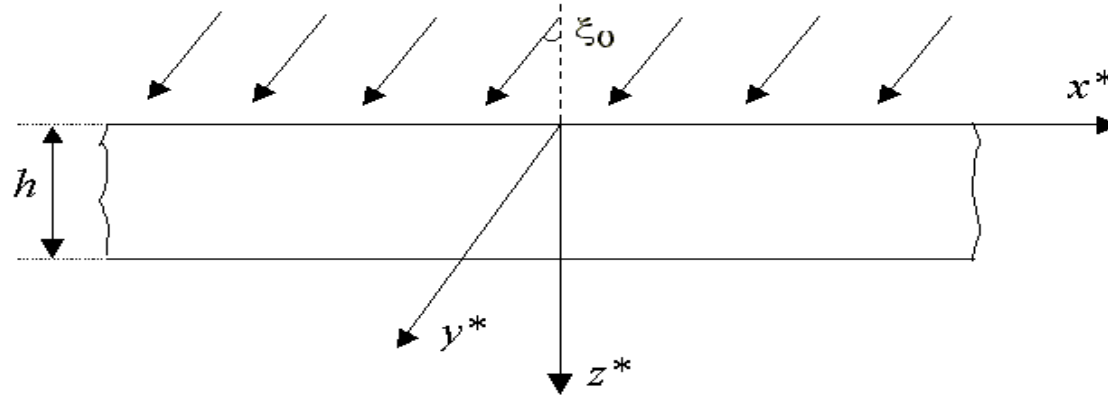
-за теплового опромінення (шар 0 відсутній):

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

- за теплового опромінення з коригованим спектром (наявний частково прозорий шар 0):

- 1) рівномірність прогріву шару при низьких рівнях напружень (порівняно з нагрівом тепловим випромінюванням);
- 2) інтенсифікація дифузії домішок в шарі при низьких рівнях температури і напружень (порівняно з дифузією під дією теплового випромінювання);
- 3) можливість стимуляції дифузії окремих видів домішок.

ЧАСТКОВО-ПРОЗОРИЙ ШАР З ГАЗОВОЮ ДОМІШКОЮ ПРИ ПОМІРНОМУ ЛАЗЕРНОМУ ОПРОМІНЕННІ



Випромінювання джерела

$$I_{|n}^{+(e)} = kI_{|n}^{av} d(x - x_0), \quad 0 \leq x \leq \frac{\rho}{2}; \quad I_{|n}^{av} < \frac{(n_{|n})^2}{ka[1 - R_{|n}(x_0)]}; \quad n = \overline{1, M}$$

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

Моделі та методи розрахунку кусково-однорідних тіл з міжфазними тріщинами під дією, механічних

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

Представлення електромеханічних факторів через кусково-аналітичні функції

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

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

$$\mathbf{V} = [u_1, u_3, j]^T \quad \mathbf{t} = [s_{13}, s_{33}, D_3]^T$$

Комбінована крайова задача Діріхле-Рімана

$$\begin{cases} \Re F_1^+(x_1) + g F_1^-(x_1) = 0, & x_1 \in a_1, a_2 \\ \Im F_1^\pm(x_1) = 0, & x_1 \in b_1, a_1 \cup a_2, b_2 \end{cases} \text{ - точний розв'язок}$$

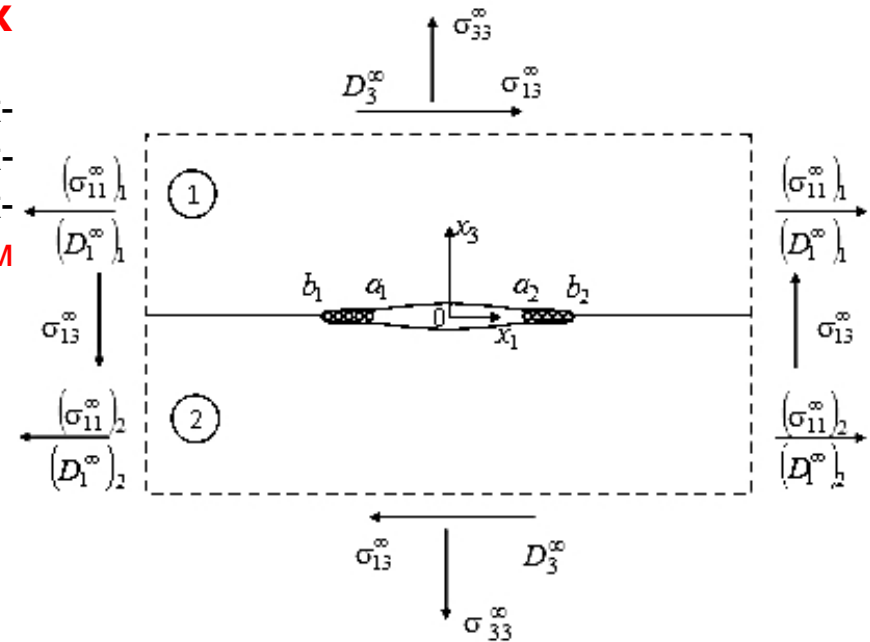


Рис. 1

Вперше:

- показана важливість використання контактної моделі;
- проаналізовано вплив спряжених механічних і електричних полів на довжини зон контакту та параметри руйнування;
- 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

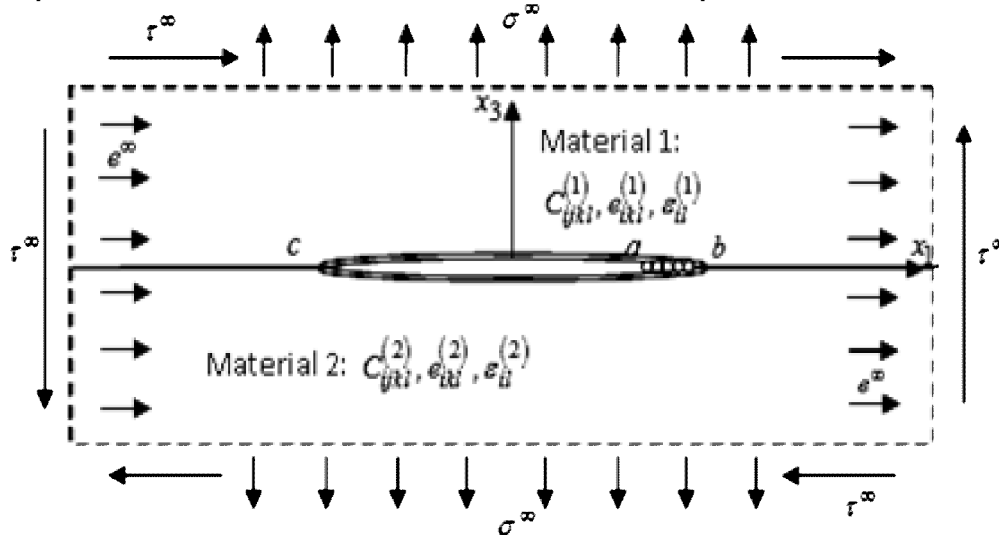


Рис. 2

Пріоритетні дослідження **тріщин із зонами кон-такту** між двома матеріалами під дією комбінованого механічного навантаження, електрично-го та **теплого потоків**:

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

Електричні граничні умови для частково електропроникної тріщини

$$D_3(u_3^+ - u_3^-) = -\epsilon_a(j^+ - j^-)$$

ϵ_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.

- **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 при-роди

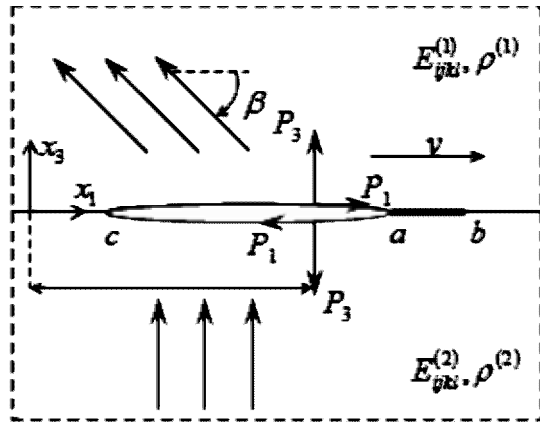
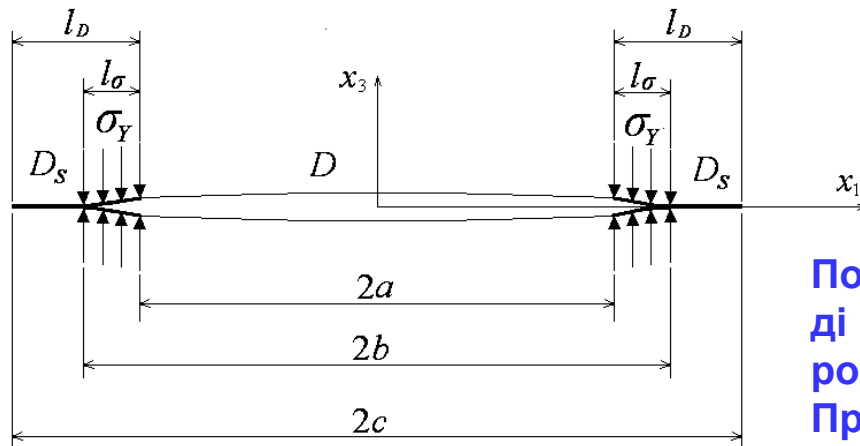


Рис. 3

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.



$l_s = b - a$ - 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 роз-ривними 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

Здійснено формулювання задач термопружності ізотропного термочутливого тіла за нехтування перетворенням механічної енергії у теплову. Їх розв'язування складається з двох етапів: знаходження температурного поля; визначення компонент його напружено-деформованого стану. Для **визначення неусталеного температурного поля** t , наприклад, у декартовій системі координат, маємо рівняння теплопровідності

$$\operatorname{div}(l_t(t) \operatorname{grad} t) = c_v(t) \dot{W}, \quad M \hat{=} D$$

та крайові умови

$$t|_s = t_s \quad \text{або} \quad \left(l_t(t) \frac{\partial t}{\partial n} \right)_s = q_s \quad M \hat{=} S, \quad t|_{t=0} = t_p \quad M \hat{=} D.$$

У випадку конвективно-променевого теплообміну на поверхні S тіла, що займає область D , гранична умова має вигляд

$$\frac{\partial}{\partial t} \left(l_t(t) \frac{\partial t}{\partial n} + a(t - t_c) + \epsilon s (t^4 - t_c^4) \right) \dot{U}_s = 0.$$

Тут $l(t)$, $c_v(t)$, $a(t)$, $\epsilon(t)$ – відповідно залежні від температури коефіцієнт теплопровідності, об'ємна теплоємність, коефіцієнт теплообміну з поверхні s і ступінь чорноти даної поверхні; W – густина джерел тепла; n – зовнішня нормаль до поверхні S ; t_s , q_s – задані температура і тепловий потік на S ; t_p – початкова температура тіла, за якої воно перебуває у природному стані (при $t = t_p$ і компонентах тензора деформації $e_{ij} = 0$ всі компоненти тензора напружень $s_{ij} = 0$ ($i, j = 1, 2, 3$)); t_c – температура зовнішнього середовища, що омиває поверхню S ; s – стала Стефана-Больцмана; M – точка тіла; крапкою зверху позначено диференціювання за часом t .

За умов ідеального теплового контакту тіл на межі їх поділу S_1 виконується рівність температур та теплових потоків

$$t_1 = t_2, \quad l_{t1}(t_1) \frac{\partial t_1}{\partial n} = l_{t2}(t_2) \frac{\partial t_2}{\partial n} \quad M \hat{=} S_1.$$

Для визначення компонент напружено-деформованого стану тіла маємо:

– співвідношення між компонентами e_{ij} тензора деформацій і переміщеннями u_i (геометричні співвідношення)

$$e_{ij} = \frac{1}{2}(u_{i,j} + u_{j,i});$$

– співвідношення Дюгамеля-Неймана між компонентами s_{ij} і e_{ij} тензорів напружень і деформацій (фізичні співвідношення)

$$s_{ij} = 2m(t) e_{ij} + [l(t) e_{kk} - b(t) F(t)] d_{ij} \quad (b(t) = 3l(t) + 2m(t)),$$

або

$$e_{ij} = \frac{1}{2m(t)} [s_{ij} - \frac{l(t)}{b(t)} s_{kk} d_{ij}] + F(t) d_{ij} \quad \begin{matrix} \text{æ} \\ \text{ç} \\ \text{ç} \\ \text{ç} \\ \text{è} \end{matrix} F(t) = \int_{t_p}^t \dot{a}_t(t) dt \quad \begin{matrix} \ddot{} \\ \dot{} \\ \\ \dot{} \\ \ddot{} \end{matrix}$$

– рівняння руху у напруженнях

$$s_{ij,j} = r(t) \delta_j - F_i$$

чи переміщеннях

$$m(t) u_{i,kk} + (l(t) + m(t)) u_{k,ki} + m_{,k}(u_{i,k} + u_{k,i}) + l_{,i} u_{kk} - (b(t) F(t))_{,j} = r(t) \delta_j - F_i;$$

– умови сумісності деформацій

$$e_{ijl} e_{kmn} e_{lm,jn} = 0.$$

Тут $m(t) = G(t) = \frac{E(t)}{2(1+n(t))}$, $l(t) = \frac{n(t)E(t)}{(1+n(t))(1-2n(t))}$ – виражені через модуль пружності $E(t)$ і коефіцієнт Пуассона $n(t)$ параметри Ляме; $G(t)$ – модуль зсуву; $a_t(t)$ – температурний коефіцієнт лінійного розширення; $r(t)$ – густина матеріалу тіла; F_i – компоненти вектора масових сил; $F(t)$ – суто тепла деформація; $d_{ij} = \{1, i=j; 0, i \neq j\}$ – символ Кронекера, e_{kk} – відносна зміна об'єму тіла; s_{kk} – сумарне напруження; величина e_{ijl} дорівнює $+1(-1)$, якщо i, j, l утворюють парну (непарну) перестановку чисел 1, 2, 3; комою з одночасним індексним означенням змінної позначено диференціювання за координатою, а підсумовування здійснюється за індексами, що повторюються.

Характерні особливості: крайові задачі теплопровідності – нелінійні, термопружності – лінійні зі змінними коефіцієнтами.

Пріоритетні результати в теорії теплопровідності.

Запропоновані, обґрунтовані та апробовані методи визначення та дослідження температурних полів у термочутливих елементах конструкцій за умов складного теплообміну:

Метод поетапної лінеаризації розв'язування двовимірних стаціонарних і одновимірних нестаціонарних задач теплопровідності для термочутливих елементів конструкцій, на поверхнях яких відбувається конвективний, променевий чи конвективно-променевий теплообмін, а коефіцієнти теплообміну і ступені чорноти цих поверхонь залежать від температури.

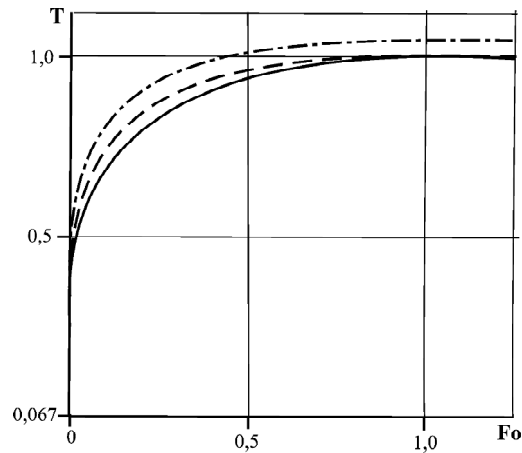


Рис. 4. Зміна з часом безрозмірної температури $T = t/t_0$ поверхні кулі ($t_p = 293 \text{ K}$, $t_0 = t_c = 573 \text{ K}$ – температура гріючого середовища, а отже, безрозмірна його температура $T_c = 1$)

На рис.4. суцільні лінії відповідають розподілу температури в термочутливій кулі, знайденому методом поетапної лінеаризації, штрихові – у нетермочутливій кулі, теплові характеристики якої сталі і дорівнюють опорним значенням термочутливої, штрих-пунктирні, коли згадану нелінійну умову лінеаризували відомою заміною $T(q)$ на q . Помітно, що така лінеаризація приводить не лише до істотного завищення температури, а й до фізично некоректного результату. Адже, як видно з графіка у деякий час температура поверхні кулі стає вищою за температуру середовища, що її нагріває.

Доволі простий і зручний у використанні метод лінеаризувальних параметрів.

Методика побудови числових розв'язків нестационарних задач теплопровідності термочутливого тіла, на поверхні якого відбувається складний теплообмін з оточуючим середовищем.

Варіант методу послідовних наближень розв'язування задач теплопровідності термочутливих елементів конструкцій простої геометричної форми, що знаходяться в умовах складного теплообміну з оточуючим середовищем.

Пріоритетні результати термомеханіки.

- **Метод гомотопних збурень**, який зводить проблему визначення компонент напружено-деформованого стану елементів конструкцій, математичною моделлю якої є крайова задача для системи диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами до рекурентної послідовності крайових задач для систем диференціальних рівнянь зі сталими коефіцієнтами.
- **Зведення задач термопружності до інтегральних рівнянь Вольтери та методи побудови їх розв'язків, який передбачає:**
 - формулювання задач термопружності термочутливих однорідних чи кусково-однорідних тіл у напруженнях та вибір за визначальні окремих компонент тензора напружень або їх комбінацій, наприклад, сумарних напружень;
 - шляхом безпосереднього інтегрування рівнянь рівноваги та суцільності (записаних через вибрані визначальні величини) з використанням крайових умов, а у випадку кусково-однорідного тіла і умов контакту сусідніх складових, задачу зводимо до інтегральних рівнянь Вольтери 2-го роду та інтегральних умов відносно вибраних визначальних величин;
 - за знайденими розв'язками отриманих інтегральних рівнянь запропонованими методами визначаємо всі інші компоненти тензорів напружень, деформацій та переміщень.
- **Розроблені методи визначення компонент термопружного стану однорідних конструктивних елементів, адаптовано для визначення температурних полів і напружень у достатньо поширених в інженерній практиці кусково-однорідних елементах конструкцій простої геометричної форми.**
- **Запропонована методика визначення компонент термонапруженого стану конструкційних елементів, які моделюють тілами класичної форми з усіма залежними від температури тепловими і механічними характеристиками при асимптотичному тепловому режимі.**

Пріоритетні прикладні результати.

Температурні поля і напруження елементів конструкцій при зварюванні.

Одним із основних факторів, який істотно впливає на якість виробництва зварних конструкцій є температурне поле, викликане дією зварної дуги. Водночас температурним полем, яке є неминучим наслідком процесу зварки, можна керувати, знижуючи до мінімуму шкідливі його наслідки. Тому дуже важливо вміти правильно і точно розрахувати температурне поле зварної конструкції чи її елемента з урахуванням всіх основних чинників, що впливають на нього. Безумовно, в першу чергу такими є залежності теплофізичних характеристик від температури.

На основі математичних моделей, що враховують залежність теплофізичних характеристик матеріалу від температури і конвективний теплообмін з довкіллям через обмежувальні поверхні, методом лінеаризувальних параметрів побудовані зручні для користування вирази температурних полів елементів конструкцій при зварюванні. Ці елементи моделюються товстими та тонкими пластинами і стрижнями, а їх нагрівання точковими та лінійними джерелами тепла, що діють миттєво чи впродовж скінченного проміжку часу, точковими джерелами тепла змінної з часом потужності, які рухаються по довільній плоскій кривій.

Актуальні загальнотеоретичні висновки.

Апробація опрацьованих моделей та методів на прикладах визначення термопружного стану основних типів елементів конструкцій і, як наслідок, з'ясування кількісних та якісних закономірностей розподілів температури та компонент напружено-деформованого стану, дослідження впливу на ці розподіли термочутливості матеріалу, а саме встановлення, що:

- навіть за лінійного розподілу температури у вільних від навантажень термочувливих тілах наявний напружений стан, коли в нетермочувливих він відсутній;
- на основі спрощених (внаслідок нехтування температурною залежністю окремих характеристик) математичних моделей можна отримати розподіли температури та напружень, які істотно відрізняються від істинних;
- необґрунтована лінеаризація задач теплопровідності при побудові їх розв'язків може привести не тільки до кількісних розбіжностей, але й фізично некоректних результатів;
- наприклад, для елементів конструкцій зі сталі в діапазоні температур 273 - 673°K розбіжності між розподілами температур при урахуванні термочувливості і без такого урахування перебувають в межах 10%, між переміщеннями – 20-40%, між напруженнями – 25-30%. Підчас променевого нагрівання та в кусково-однорідних тілах ці розбіжності ще істотніші.

Використання зв'язності теплових і деформаційних полів для визначення (ідентифікації) термонапруженого стану тіл за неповної інформації про теплове навантаження

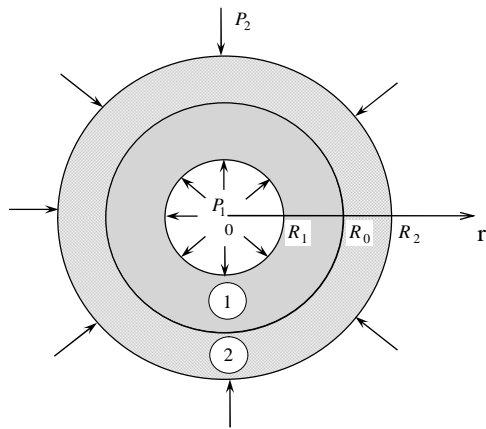


Рис. 1

Побудовано нові математичні моделі визначення одно- та двовимірних нестационарних температурних полів та термонапружень в кусково-однорідних, неоднорідних і термочутливих тілах канонічної форми за температурою та додатково відомими переміщеннями однієї 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 неklasичних квазістатичних задач термопружності до обернених задач термопружності, які описуються інтегральними рівняннями першого роду, або до задач теплопровідності з неklasичними 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 нестационарними 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

$$U_1(x, t) \leq u(x, t) \leq U_2(x, t), \quad \max_{x, \bar{V}} \{S(T), G_p(T)\} \leq R(T, t),$$

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.

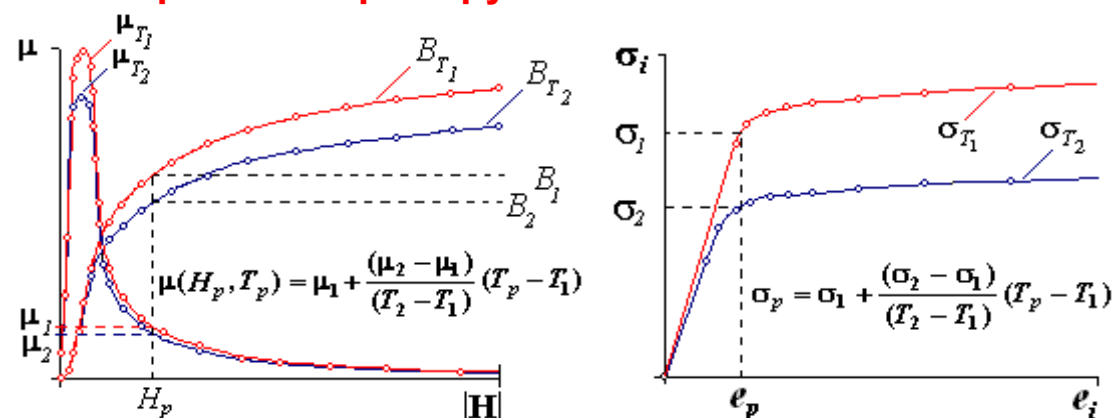
Знайдені оптимальні температурні режими дають змогу:

- підвищити продуктивність процесу термообробки;
- зменшити енергозатрати.

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

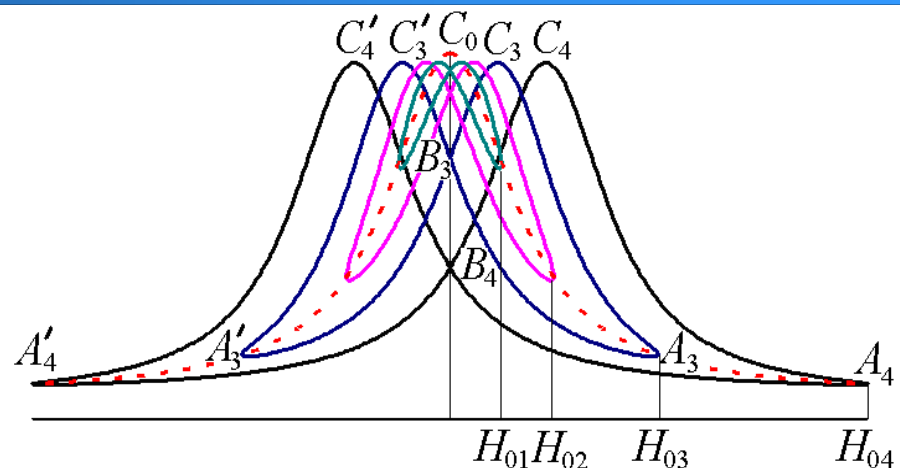
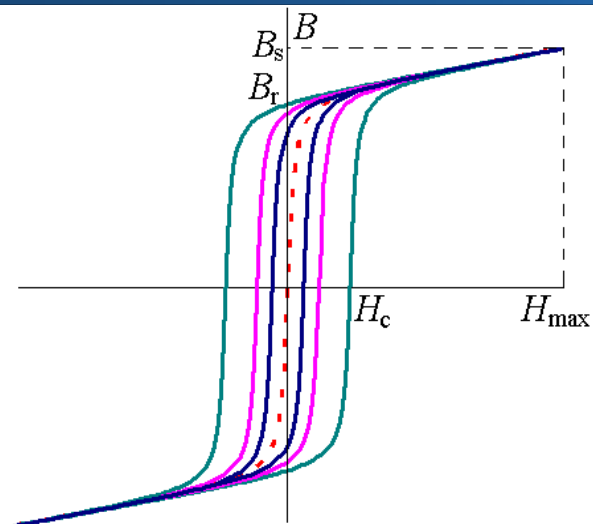
Запропоновано варіант теорії кількісного опису термомеханічних процесів в електропровідних тілах за дії комплексних (силових, температурних та електромагнітних) навантажень з урахуванням **температурної залежності** властивостей матеріалів, **пружно-пластичного** характеру **деформування** і **нелінійності** залежностей індукцій електричного та магнітного полів від відповідних напруженостей і температури. Модель базується на **теорії взаємодії** електромагнітного поля (**ЕМП**) і матеріального **континууму** (в якій вплив поля враховано через пондеромоторні сили та об'ємні тепловиділення, як джоулеві, так і пов'язані з перемагнічуванням і переполяризацією), рівняннях **Максвелла** для здатних до намагнічування і поляризації тіл, залежностях теорії **теплопровідності** та **неізотермічної термопружнопластичності**.

Побудовано з використанням методу скінченних елементів (МСЕ) і родини однокрокових багатопараметричних різнице-вих 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 експериментальних кривих, що описують поведінку матеріалів у широкому температурному діапазоні за дії ЕМП.

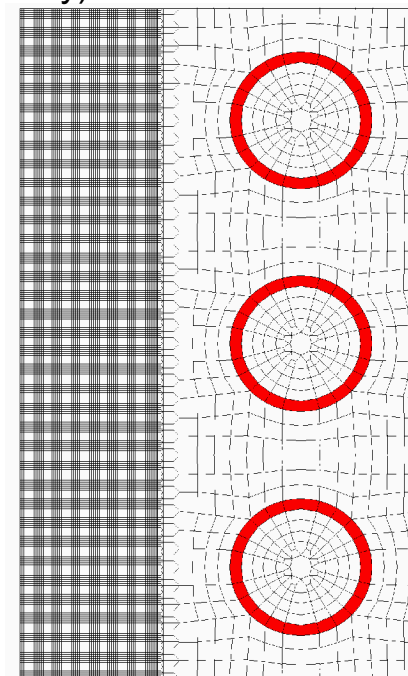


Апроксимації кривої намагнічування та залежності магнітної проникності від напруженості поля для магнітотвердих матеріалів (з урахуванням петлі гістерезису)

Розроблено відповідне **програмне забезпечення**.

Отримано розв'язки важливих класів задач про визначення електромагнітних, температурних і механічних полів у конкретних феромагнітних тілах (в тому числі і складної геометричної форми) за високотемпературної індукційної обробки (нагрівання і наступного охолодження). Виявлено **низку нових закономірностей** термомеханічної поведінки таких тіл, зокрема, пов'язаних з еволюцією параметрів термомеханічного стану тіл у зв'язку із змінами температурно залежних властивостей матеріалів, втратою матеріалом феромагнітних властивостей в околі температури Кюрі, а також пружно-пластичним деформуванням.

Побудовано оптимальні **режими** високотемпературної індукційної обробки елементів конструкцій (за частотою струму, умовами охолодження, геометричними розмірами та формами індукторів (областей розподілу джерел струму у навколишньому середовищі), залишковими напруженнями, тривалістю термообробки).



Врахування геометрії індуктора

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 покрово-ітераційні алгоритми змішаного МСЕ для квазістатичних задач термопластичності.

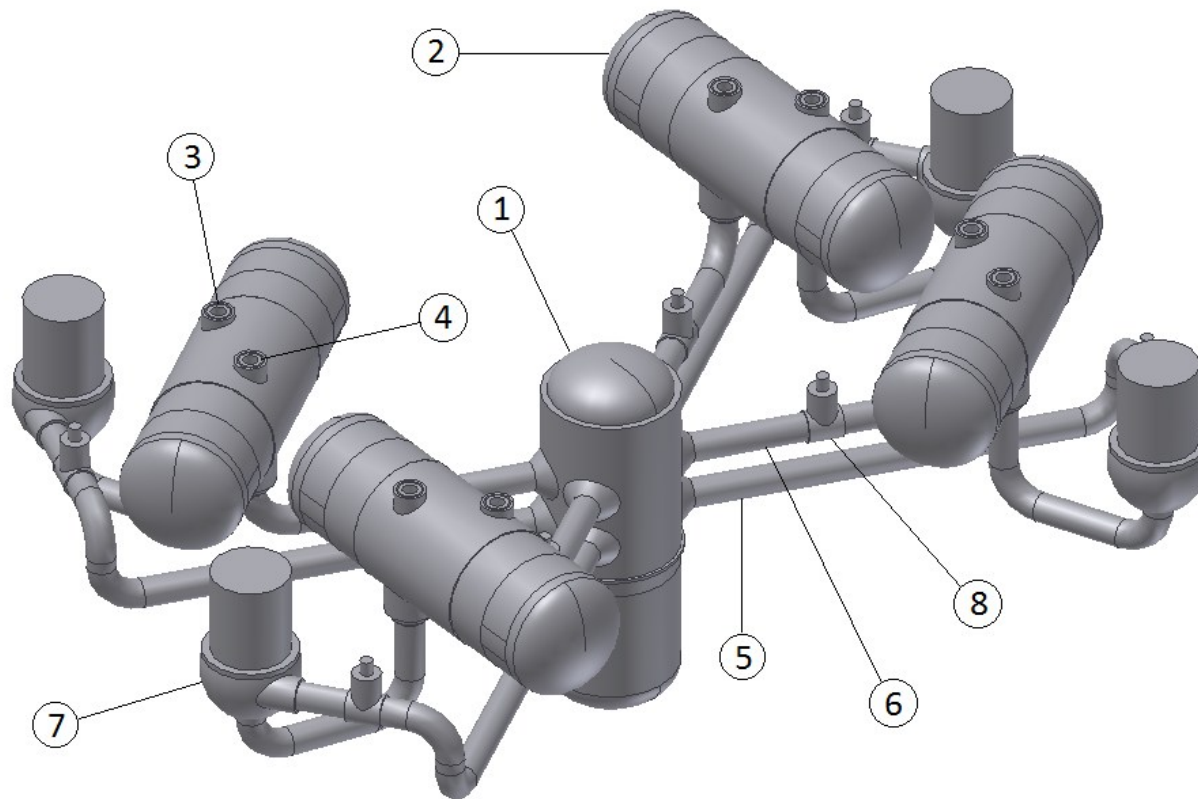
Удосконалено **методологію розрахунку на опір руйнуванню** елементів обладнання **I-го контуру АЕС** при моделюванні експлуатаційних та аварійних режимів навантаження. Сформульовано методичні засади та загальну схему розрахунку кінетики НДС та опору руйнуванню; запропоновано розрахункові підходи до оцінки 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

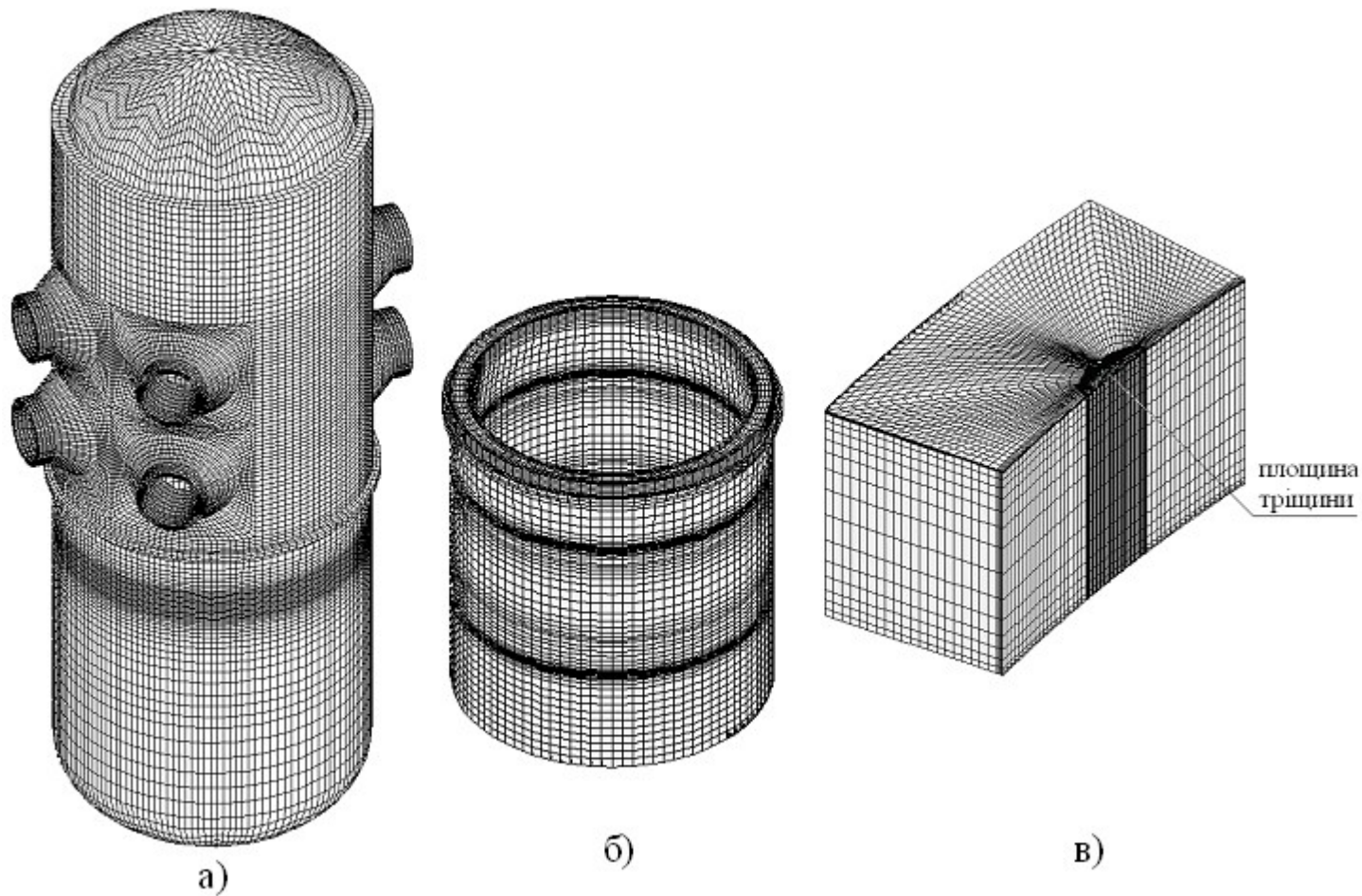
Розроблені методи використані при виконанні **державної експертизи** результатів робіт з розрахункового **обґрунтування міцності і опору руйнуванню** корпусів реакторів ВВЕР-1000 згідно договорів з ДНТЦ ЯРБ Державної інспекції ядерного регулювання України, за результатами яких приймалося рішення про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

Схематизована модель реакторної установки ВВЕР-1000



1 – корпус реактора, 2 – ПГ, 3 – «холодний» колектор ПГ, 4 – «гарячий» колектор ПГ, 5 – «холодна» нитка ГЦТ, 6 – «гаряча» нитка ГЦТ, 7 – ГЦН, 8 – головна запірна засувка

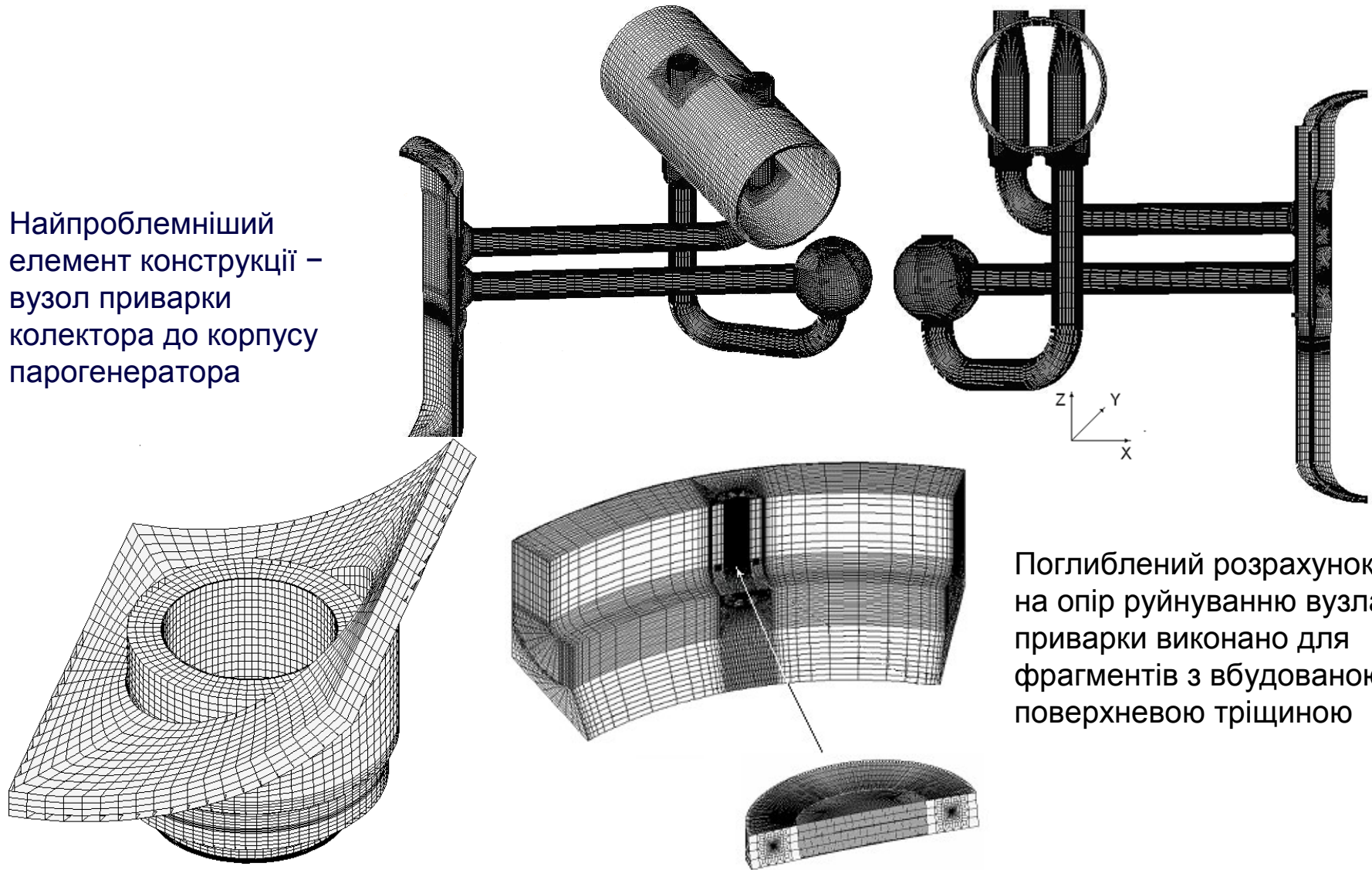
Розрахункові моделі корпусу реактора ВВЕР-1000



а) повна модель; б) модель циліндричної частини; в) $\frac{1}{2}$ частина фрагменту із вбудованою тріщиною

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

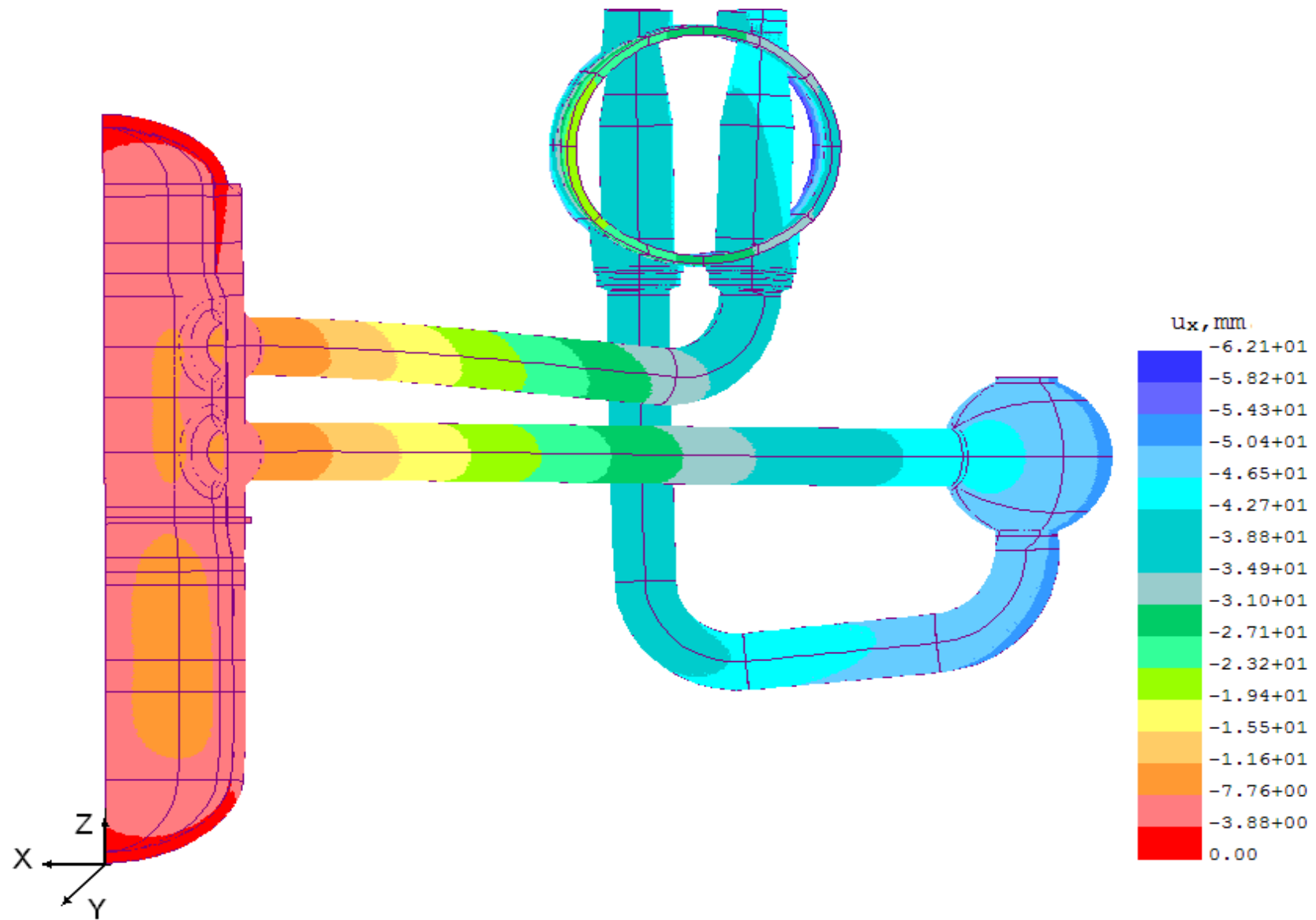
Найпроблемніший
елемент конструкції –
вузол приварки
колектора до корпусу
парогенератора



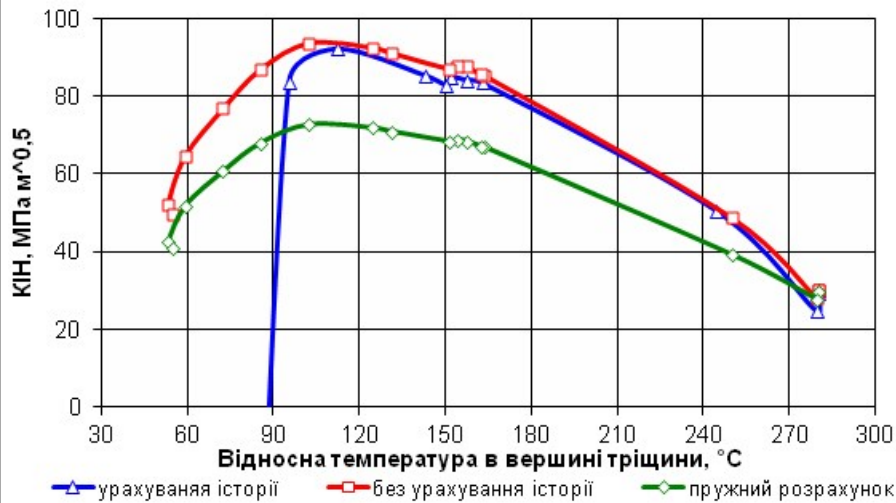
Поглиблений розрахунок
на опір руйнуванню вузла
приварки виконано для
фрагментів з вбудованою
поверхневою тріщиною

а) повна модель; б) модель циліндричної частини; в) $\frac{1}{2}$ частина фрагменту із вбудованою тріщиною

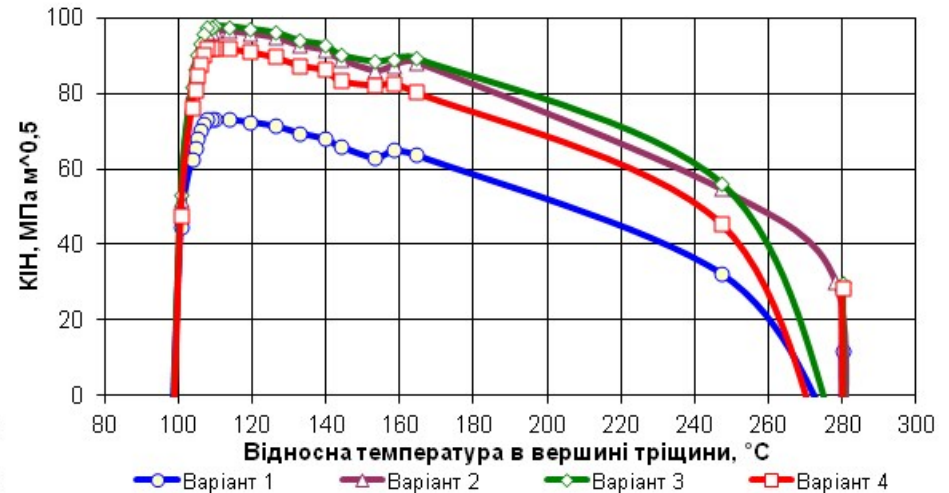
Деформований стан петлі 1-го контуру реакторної установки ВВЕР-1000 для режиму нормальних умов експлуатації



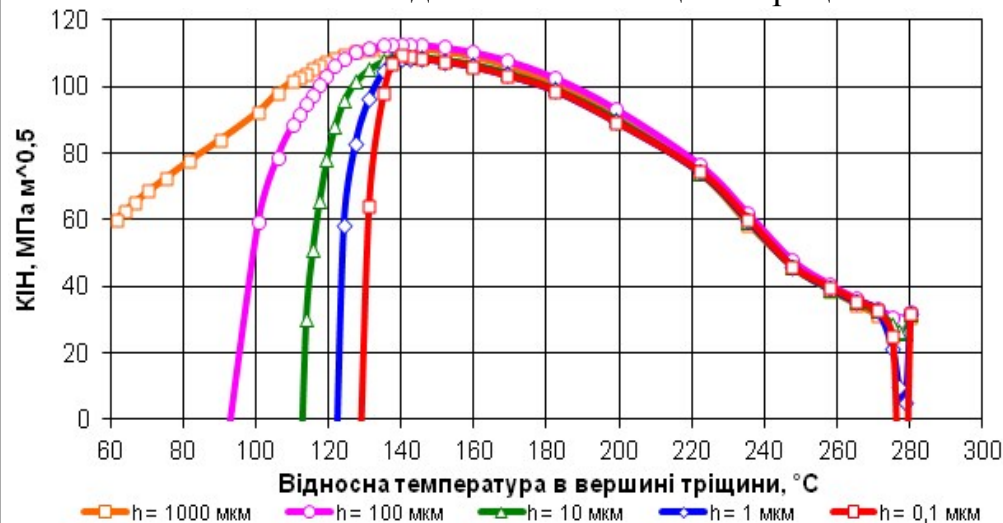
Вплив історії навантаження на визначення температурної залежності КІН для піднаплавної окружної напівеліптичної тріщини



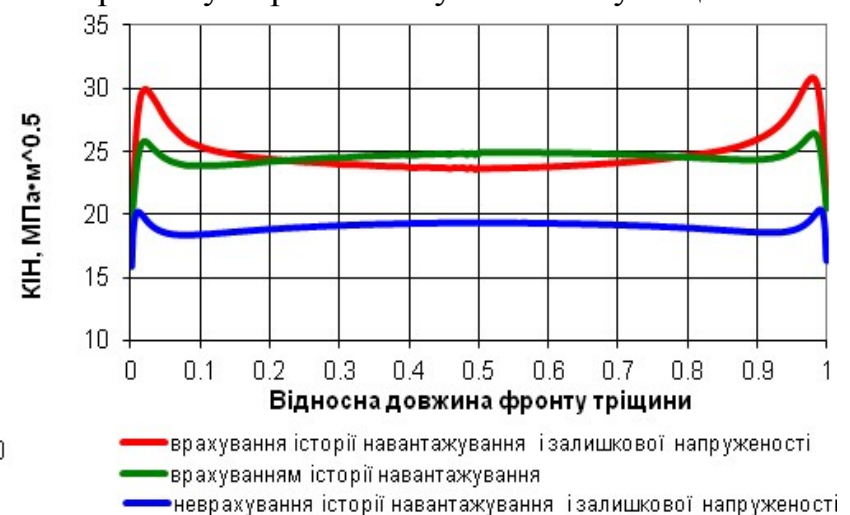
Вплив різних варіантів врахування полів залишкових напружень, що застосовуються у міжнародній практиці, на визначення температурної залежності КІН для піднаплавної кільцевої тріщини



Вплив густини скінченно-елементного поділу (h) на розрахунок температурної залежності КІН для найглибшої точки піднаплавної кільцевої тріщини



Вплив історії навантаження на визначення КІН для поверхневої колової тріщини у вузлі приварки для режиму нормальних умов експлуатації



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

Модель зварювального джерела нагріву:

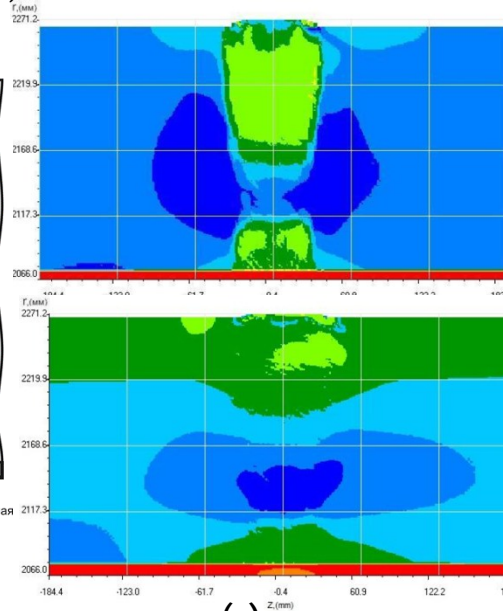
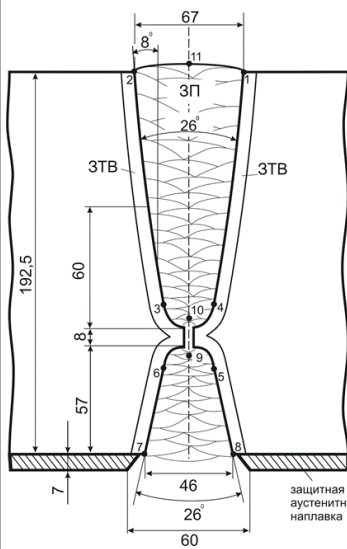
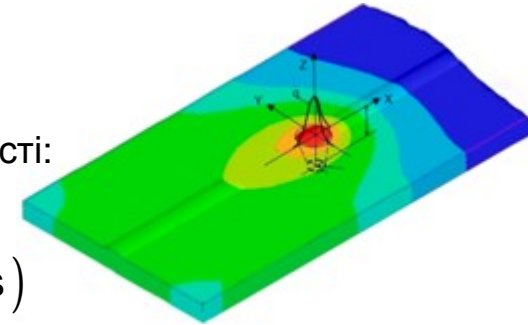
$$W(x, y, z, t) = W_0(t) \exp [- K_x(x-x_0)^2 - K_y(y-y_0)^2 - K_z(z-z_0)^2]$$

Тензор деформацій є сумою пружних, пластичних і деформацій повзучості:

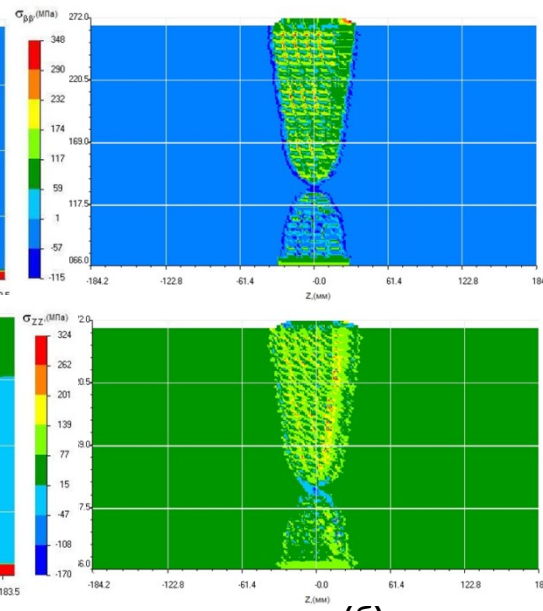
$$de_{ij} = de_{ij}^e + de_{ij}^p + de_{ij}^c$$

$$de_{ij} = d \frac{\dot{\epsilon} s_{ij} - d_{ij} \dot{s}}{\dot{\epsilon}} + d_{ij} (Ks + j) \frac{\dot{u}}{\dot{u}} + dl (s_{ij} - d_{ij} s) T + dt W(s_{eq}, T) (s_{ij} - d_{ij} s)$$

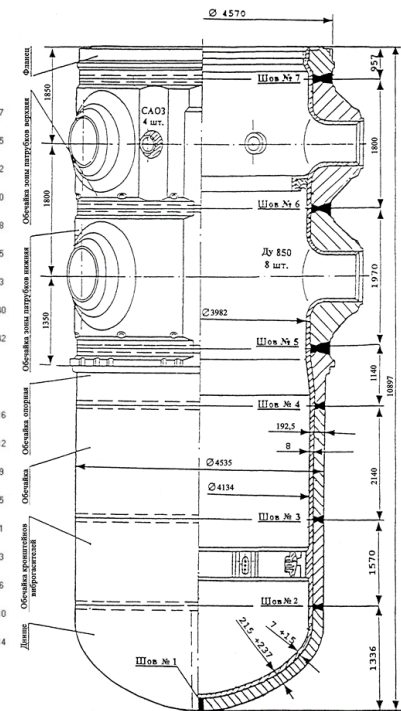
$$(i, j = r, b, z)$$



(a)



(б)



Розподіли залишкових напружень колових і осьових (а) і відповідних пластичних деформацій (б) в зоні зварних стикових з'єднань №2, 3, 4 обичайки корпусу реактора ВВЕР-1000

Математичне моделювання деформацій великогабаритних конструкцій з великою кількістю зварних з'єднань на основі комбінованого використання методів термопластичності та функції усадки

1. Методами термопластичності визначаються локальні напруження і пластичні деформації від одного зварного шва.



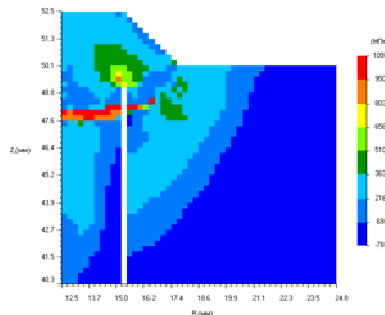
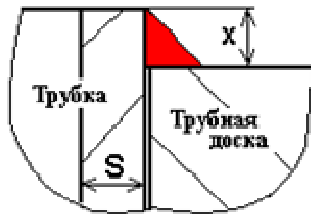
2. Загальні деформації зварної конструкції прогнозуються з використанням наближеного **методу функції усадки**.

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

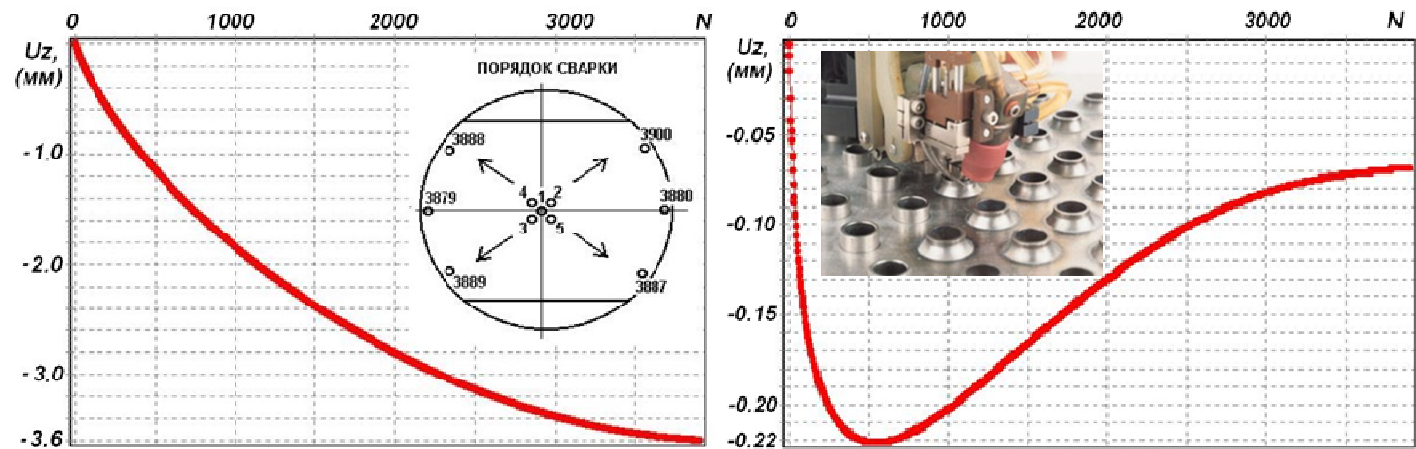
$$P_{ij}(x, y, z) = \begin{pmatrix} \epsilon D_x(x) + b_x(x) \times \frac{1}{2} d(y - y_w) & 0 & 0 \\ 0 & \epsilon D_y(x) + b_y(x) \times \frac{1}{2} d(y - y_w) & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix}$$

де поперечна $\Delta_x(x)$ і повздовжня усадки $\Delta_y(x)$, відповідні кутові деформації $\beta_x(x)$, $\beta_y(x)$ є параметрами функції усадки, $d(y - y_w)$ - дельта функція Дірака визначає, що вся деформація усадки сконцентрована у центрі зварного шва.

Повна деформація конструкції є сума пружних деформацій і деформацій функції усадки: $e_{ij} = e_{ij}^e + P_{ij}$



а

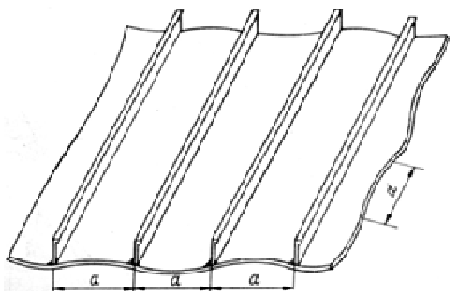


б

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 нагрівми з метою оптимізації та автоматизації технологічного процесу



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

$$F = \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \frac{\partial^2 U_z}{\partial x^2} dx dy + \frac{1}{2} \int_0^a \int_0^b \frac{\partial^2 U_z}{\partial y^2} dx dy$$

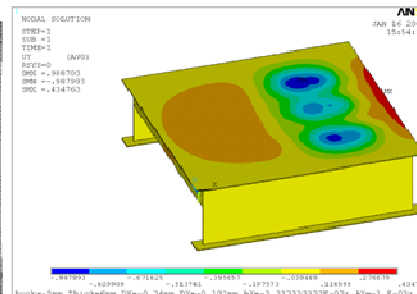
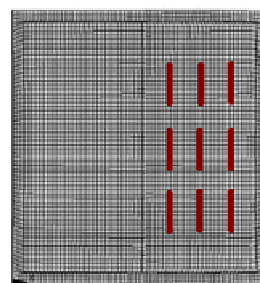
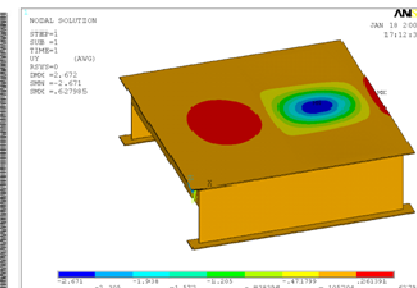
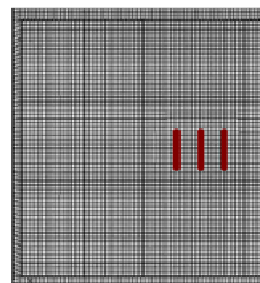
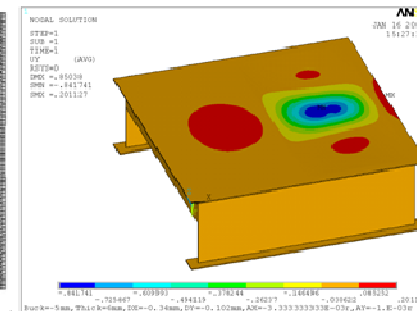
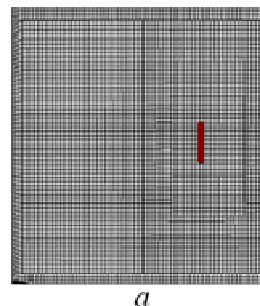
Деформації жолоблення:
 a – відстань між набором;
 d – довжина половини хвилі



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:

$$F_{пл.деф.} = \int_A^B \int_C^D \epsilon_{xx} \epsilon_{yy} dx dy,$$



Деформації жолоблення судових корпусних конструкцій

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

Моделювання кінетики напружень і деформацій внутрішньо-корпусних пристроїв енергетичних реакторів ВВЕР-1000

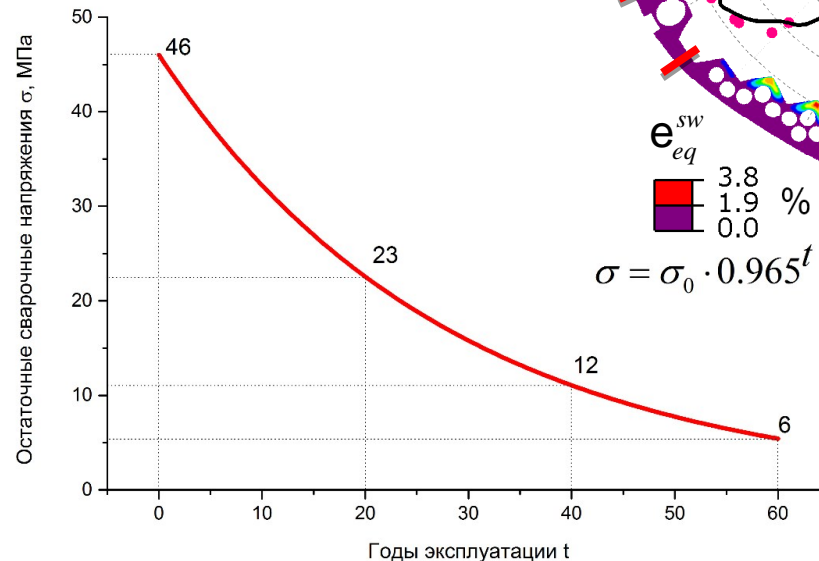
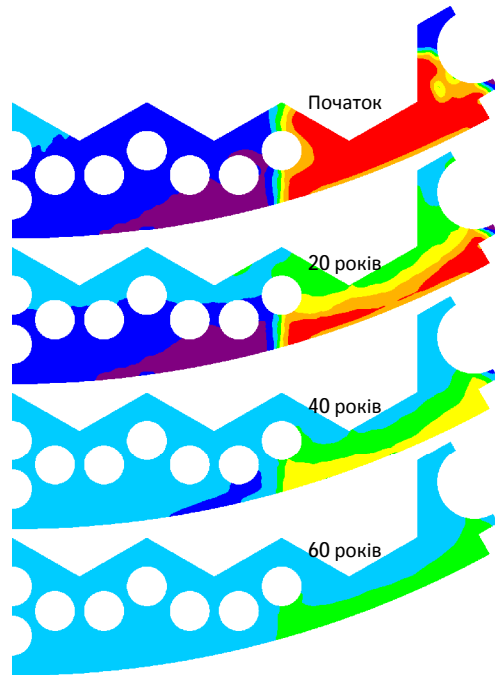
в процесі експлуатації під дією радіаційного випромінювання

Радіаційне розбухання та радіаційна повзучість зварної вигородки (08X18H10T) за умов неоднорідного поля температури T і флюєнсу D :

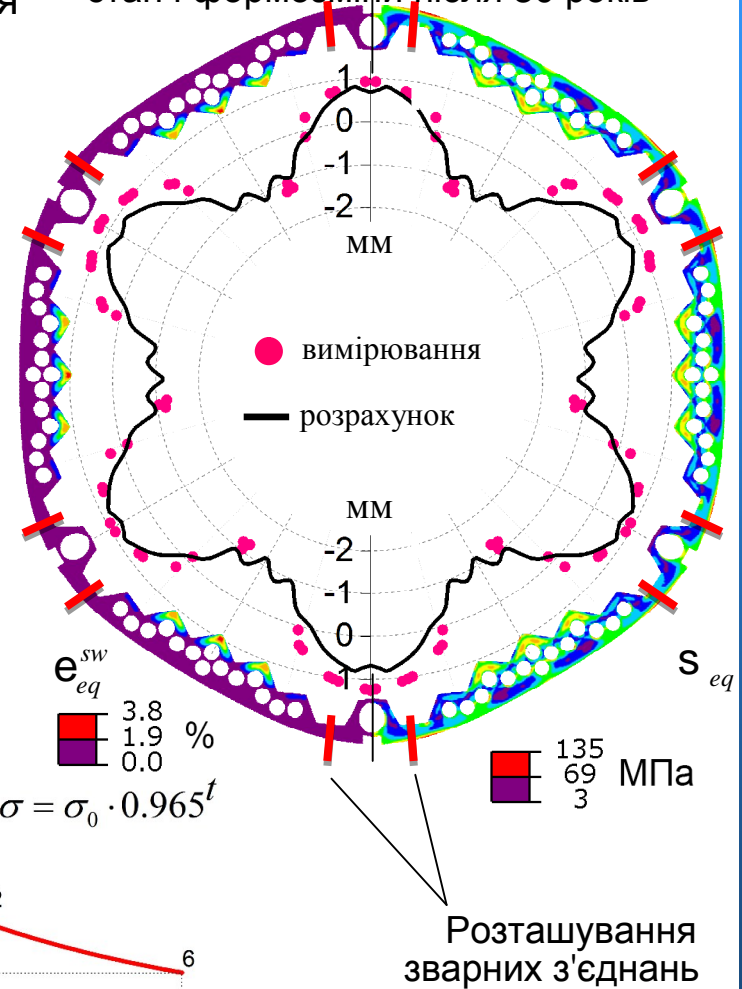
$$\frac{de_{eq}^{sw}}{dt} = C_D \times n \times D(t)^{n-1} \times f_1(T) \times f_2(s_m, s_{eq}) \times f_3(\alpha) \times \frac{dD}{dt}$$

$$\frac{de_{eq}^c}{dt} = \frac{\alpha}{\epsilon} B_0 \frac{dD}{dt} + w \frac{dS}{dt} \ddot{s}_{eq}, \quad de_{eq}^c > 0, \quad e_{eq}^c|_{t=0} = 0$$

Релаксація залишкових зварювальних напружень:



Деформації розпухання, напружений стан і формозміни після 30 років



Основні впровадження та економічна ефективність:

- моделі термомеханіки тіл за електромагнітного опромінення використано при удосконаленні існуючих і створенні нових технологій термообробки елементів конструкцій і приладів з використанням електромагнітного випромінювання та розробці функціональних покривів приладів із заданими радіаційними властивостями в світловому діапазоні спектру;
- методики розрахунків фізико-механічних параметрів на основі моделей термочутливого тіла використано при: опрацюванні методики визначення напруженого стану багат шарових циліндричних конструкцій, яка впроваджена у Харківському конструкторському бюро з машинобудування ім. О.О. Морозова; побудові температурних полів і напружень в елементах зварних конструкцій, які впроваджено у відділі міцності зварних конструкцій Інституту електрозварювання ім. Є. Патона НАН України; дослідженнях термонапруженого станів металокерамічних багат шарових циліндричних конструкцій, що моделюють первинні термоелектричні перетворювачі температури за заданих умов експлуатації, з метою вибору їх оптимальних конструктивних параметрів, які впроваджені на НВО „Термоприлад“.
- на основі методики визначення НДС енергетичного обладнання отримано кількісні оцінки придатності конкретних елементів енергоблоків до експлуатації понад парковий ресурс на ТЕС ДТЕК "Західенерго" та ВП "Запорізька АЕС". Запропонована методика, на відміну від існуючої в енергетичній галузі, дає можливість виявити ділянки найбільш ймовірної появи дефектів і з'ясувати причини їх виникнення. Розроблене програмне забезпечення для комп'ютерного моделювання процесів деформування елементів діючого енергообладнання з урахуванням деградації матеріалу, експлуатаційних пошкоджень та ремонтних втручань передані ТЕС ДТЕК "Західенерго". З його використанням, зокрема, визначено оптимальні за напруженнями форми технологічних вибірок металу в околах зон з пошкодженнями в трьох барабанах діючих енергоблоків на ТЕС ДТЕК "Західенерго", а також оцінено залишковий ресурс цих барабанів на постремонтній стадії, внаслідок чого продовжено час їх експлуатації на визначені терміни. При цьому отримано значний економічний ефект (вартість нового котла енергоблоку потужністю 200 МВт, основною частиною якого є барабан, становить близько 250 млн. дол. США).

- розроблені методи розрахункового аналізу напруженого стану та опору руйнування критичних елементів корпусів реакторів та обладнання АЕС з ВВЕР використано при виконанні регіональних міжнародних проектів ТАРЕГ з оцінки радіаційного окрихчення та цілісності корпусів реакторів АЕС з ВВЕР, отримувачем результатів яких був НАЕК «Енергоатом» України; міжнародних договорів між ІПМіц НАН України та головним конструктором реакторних установок АЕС з ВВЕР - ДКБ «Гідропрес» з аналізу НДС вузлів приварювання колекторів до корпусу парогенератора ПГВ-1000 у процесі експлуатації з урахуванням залишкової технологічної спадковості після термообробки; 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 енергоблоку №1 Хмельницької, енергоблоку №1 Південно-Української, енергоблоків №1 та №2 Запорізької та енергоблоку №3 Рівненської АЕС. Також результати великого комплексу робіт з розрахунково-експериментального обґрунтування працездатності парогенераторів після ремонту зварних з'єднань, аналізу їх напруженого та граничного стану з використанням вищезазначених підходів та методів дозволили продовжити експлуатацію енергоблоку №1 Південно-Української АЕС упродовж 2001-2002 років без тривалої зупинки для заміни парогенераторів, що дало можливість не допустити недовиробітку електроенергії в обсязі 2,2 млрд. Квт*годин, вартість якої на той час була 80,5 млн. грн.;

- розроблені на основі математичних моделей термічного правлення розрахункові алгоритми та програмне забезпечення пройшло апробацію на суднобудівному заводі «Ленінська кузня» (м.Київ, Україна) та на фірмах SLV Halle GmbH та IMG GmbH (ФРН) для впровадження на вагоно- та суднобудівних підприємствах. Проведене числове дослідження впливу параметрів нагріву на ефективність термічного правлення тонкостінних конструкцій і встановлено, що за допомогою сучасних джерел нагріву можливо підвищити ефективність термічного правлення у 2-3 рази у порівнянні з традиційними технологіями. При цьому можна отримати значну економію енергетичних та трудових ресурсів;

- на основі моделювання розрахунку та оптимізації НДС тіл за наявності полів різної фізичної природи, що виникають в технологіях зварювання, виконано дослідження для атомної енергетики України по визначенню максимальних величин випробувального тиску при гідропневматичних випробуваннях герметичності парогенераторів ПГВ-1000М ядерних енергетичних блоків ВВЕР-1000 з метою збереження цілісності зварних з'єднань теплообмінних трубок до колектора; залишкових технологічних напружень в зоні вузлів приварювання колекторів до патрубків ДУ1200 парогенераторів ПГВ-1000, залишкових напружень у зоні зварних з'єднань корпусу реактора ВВЕР-1000 і обґрунтування можливості подальшої експлуатації парогенераторів з виявленими дефектами несцільності матеріалу в зоні зварного з'єднання