

Модельний опис фазових перетворень і залишкових напружень в елементах конструкцій при термічному навантаженні

Олександр Гачкевич¹, Богдан Дробенко², Володимир Асташкін³, Степан Будз⁴, Ігор Будз⁵, Ігор Чупик⁶

¹д. ф.-м. н., проф., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

²д. ф.-м. н., пров.с., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

³к. ф.-м. н., ст.н.с., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

⁴к. ф.-м. н., ст.н.с., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

⁵к. ф.-м. н., доц., НУ «Львівська політехніка», вул. С.Бандери, 12, Львів, e-mail: ihorbudz@gmail.com.com

⁶математик II кат., Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я. С. Підстригача НАН України, вул. Наукова, 3б, Львів, e-mail: dept13@iapmm.lviv.ua

На основі методу Хука-Джівса і методу скінченних елементів і розроблено числову методичку оптимізації локального поля нагріву осесиметричної оболонки, яка виготовлена із титанового сплаву. Враховано явище поліморфного перетворення при зміні температури.

Ключові слова: фазові перетворення, залишкові напруження, оптимізація, термомеханічні процеси.

Вступ. Елементи і вузли багатьох сучасних машин і споруд виготовляють з матеріалів, які під впливом температурних або силових навантажень можуть зазнавати фазових перетворень. При цьому в області фазових перетворень змінюються механічні та фізичні властивості матеріалу. В результаті структурної неоднорідності можуть виникати значної величини внутрішні напруження, що в загальному випадку приводить до пониження параметрів міцності і жорсткості елементів конструкцій. Клас матеріалів, у яких відбуваються вказані явища є досить широкий — це більшість титанових сплавів, низько легованих мало-вуглецевих сталей, багато природних і штучно створених матеріалів різні сорти скла. З огляду на це важливо є проблема кількісного опису деформації твердих тіл із таких матеріалів у зв'язку з процесами теплопровідності. Окремого розгляду вимагає проблема оптимізації структури, напруженого стану та умов отримання матеріалів згідно із сформульованими умовами оптимізації.

Такі дослідження становлять теоретичну базу розрахунків і оптимізації режимів термічної, термомеханічної обробки елементів конструкцій скерованих

на забезпечення заданих властивостей матеріалу, його структури, фізико-механічного стану.

Кількісний опис механічних процесів у твердих тілах складної структури у взаємозв'язку з іншими фізико-хімічними процесами можна виконувати з використанням методів механіки суспільного середовища і нерівноважної термодинаміки. При цьому модельний опис процесів деформування має бути узгоджений з відомими у цій галузі емпіричними даними і теоретичними законами фізики, фізики металів і матеріалознавства. Найчастіше застосованим матеріалом у машинобудуванні є сталі і титанові сплави.

Завдяки поєднанню таких цінних властивостей титану, як висока міцність, корозійна стійкість, зварюваність та ін., вироби з титанових сплавів широко використовують у різних галузях народного господарства. При їх виготовленні часто застосовують технології локального нагріву, внаслідок чого у матеріалі відбуваються поліморфні (фазові) перетворення і, відповідно, змінюється фазовий склад, що у свою чергу спричиняє появу залишкових напружень. Зміна фазового складу додатково впливає на напружений стан конструкцій і може поглинати частину їх міцнісного ресурсу. Тому при побудові раціональних режимів термообробки виробів з титанових сплавів потрібно враховувати фазові перетворення, які відбуваються в ньому при зміні температури.

Оптимізацію напруженого стану при локальній термообробці можна здійснювати, як вибором теплового режиму, так і оптимізацією поля підогріву локальної зони. У роботі [4] показано, що при застосуванні неоптимального поля підогріву, ефективність локальної термообробки є невисокою. Математична теорія оптимального локального нагріву викладена у роботах [1,4,5,7,9,15]. Ця теорія побудована для матеріалів і режимів нагріву без врахування структурних перетворень у матеріалі. Питанням дослідження фазового складу титанових сплавів присвячені роботи [6,7]. Переважна більшість цих праць — експериментальні. При цьому системи рівнянь для визначення напружено-деформованого стану тіла з врахуванням фазових поліморфних перетворень є нелінійною і аналітичні методи її розв'язку не розроблені [3].

У даній роботі розглядається задача оптимізації локального температурного поля витримки (локального нагріву), який часто використовується в інженерній практиці при відпалі, для тонкостінної титанової оболонки обертання, де до уваги прийнято, що в матеріалі мають місце фазові перетворення при нагріві, а після охолодження фіксується неоднорідний фазовий склад. При цьому рівні напружень, які виникають від нагрівання і фазових змін повинні бути мінімальні. Приймається також, що локальне температурне поле під час термообробки не викликає пластичних деформацій (причиною виникнення залишкових напружень вважаємо лише нерівномірний розподіл фаз, який встановлюється в оболонці після її охолодження). Зазначимо, що розглядувані структурні напруження є залишковими в тому розумінні, що вони існують в тілі без зовнішніх термомеханічних навантажень і в багатьох випадках тривалість існування таких напружень збігається з часом експлуатації виробу [18,19,20].

1. Постановка задачі

Розглянемо вільну від силового навантаження скінченну осесиметричну оболонку з α - β титанового сплаву, яка займає область $\Omega \in E^3$ Евклідового простору із неперервною за Ліпшицем поверхнею Γ , за умов локального кільцевого осесиметричного температурного поля.

У відомих працях по оптимізації поля витримки задача розв'язується за припущення, що після припинення нагріву у матеріалі оболонки не відбувається ніяких структурних змін [7]. При наявності структурних перетворень локальне поле підогріву з одного боку створює умови для релаксації попередньо наведених у тілі залишкових напружень, а з другого — само може бути причиною їх виникнення, особливо за умов швидкого некерованого охолодження після завершення операції локального відпалу. У даній роботі приймається до уваги, що після завершення локального поля витримки у тілі фіксується деякий просторово неоднорідний нерівноважний фазовий склад, який є причиною виникнення залишкових (структурних) напружень. При цьому ставиться задача знаходження такого розподілу фаз в оболонці, при якому відповідні йому напруження є мінімальними. По знайденому оптимальному розподілу фаз, на основі емпірично встановлених залежностей (Рис. 2, крива 2), знаходимо температурне поле, яке формує цей фазовий склад.

Приймаємо, що в зоні локального поля температурної витримки температура змінюється по твірній циліндра і є однорідною по товщині оболонки [4].

$$t = \begin{cases} t_1 \left(1 - 3z^2 + 2|z^3| \right), & |z| \leq z_0 \\ t_0, & |z| > z_0 \end{cases} \quad (1)$$

де, t_0 температура навколишнього середовища, t_1 максимальна температура в центрі зони локального поля температурної витримки, z_0 півширина локальної зони поля температурної витримки, z_1 півдовжина оболонки).

Ставиться задача оптимізації локального температурного поля витримки для оболонки обертання із врахуванням фазових перетворень, при якому в оболонці виникають мінімальні залишкові (структурні) напруження.

У рівноважному стані при кімнатній температурі t_0 структура α - β титанових сплавів складається із α -фази (з гексагональною щільноупакованою граткою) і β -фази (з об'ємноцентрованою кубічною граткою). Під час нагріву тіла з титанового сплаву від кімнатної температури t_0 до температури початку фазових перетворень t_{f0} у ньому не відбувається фазових перетворень, а за нагріву від температури початку фазових перетворень t_{f0} до температури завершення фазових перетворень t_{f1} відбуваються фазові

перетворення, а саме, α - фаза поступово переходить у β - фазу. При досягненні температури завершення фазових перетворень t_{f1} кількість β - фази у такому тілі становить 100 % (α - фаза повністю переходить у β - фазу). При цьому різниця питомих об'ємів α і β фаз (питомий об'єм α - фази є більшим від β - фази) істотно впливає на розподіл і величину як тимчасових напружень під час термообробки, так і залишкових (структурних) напружень, які зумовлені неоднорідним розподілом фаз після завершення термообробки [5].

Задачу оптимізації локального температурного поля витримки формулюємо за два етапи. На першому — визначаємо тимчасовий (під час температурної витримки) і залишковий (після охолодження) напружений стан оболонки обертання. Для цього записуємо співвідношення, що окреслюють процес деформування оболонки у квазіусталеній постановці за припущення, що на етапі температурної витримки у кожній точці у кожний момент часу встановлюється рівноважний фазовий склад, а після охолодження в оболонці фіксується неоднорідний розподіл фаз. На другому етапі знаходимо оптимальне температурне поле (методом Джівса-Хука), яке зумовлює мінімальні залишкові напруження.

2. Основні співвідношення

При формулюванні задачі першого етапу приймаємо, що відсотковий вміст β - фази у титановому сплаві оболонки при нагріві визначається функцією повноти фазових перетворень [8]:

$$\xi(t) = \begin{cases} \xi_0, & t < t_{f0} \\ \frac{\xi_1 - \xi_0}{t_{f1} - t_{f0}} t + \frac{\xi_0 t_{f1} - \xi_1 t_{f0}}{t_{f1} - t_{f0}}, & t_{f0} \leq t < t_{f1} \\ \xi_1, & t \geq t_{f1} \end{cases}, \quad (2)$$

де ξ_0 - відсотковий вміст β - фази у титановому сплаві у температурному діапазоні $t < t_{f0}$, ξ_1 - стовідсотковий вміст β - фази у титановому сплаві у температурному діапазоні $t \geq t_{f1}$.

При нагріві сумарна зміна об'єму титанового сплаву оболонки складається з двох частин - теплової $d\varepsilon^t$ і структурної $d\varepsilon^\xi$:

$$d\varepsilon^{(T)} = d\varepsilon^t + d\varepsilon^\xi, \quad (3)$$

де $d\varepsilon^t = 3\alpha_t dt$, $d\varepsilon^\xi = 3\beta_\xi d\xi$, α_t - лінійний коефіцієнт теплового розширення, β_ξ - лінійний коефіцієнт структурної дилатації (дилатація, що обумовлена зміною питомого об'єму матеріалу при поліморфному перетворенні).

У загальному випадку коефіцієнти α_t і β_ξ є функціями температури. При постійній за товщиною температурі коефіцієнт β_ξ можна прийняти константою і визначити із співвідношення:

$$\beta_\xi = (V_1 - V_0) / V_0, \quad (4)$$

де V_0 - питомий об'єм сплаву при температурі t_{f0} , V_1 - питомий об'єм сплаву при температурі t_{f1} .

Зауважимо, що в діапазоні температур фазового перетворення титанового сплаву температурна компонента зміни об'єму $d\varepsilon^t$ зі зростанням температури збільшується, а структурна $d\varepsilon^\xi$ - зменшується [8].

При дуже повільному (стаціонарному нагріві) в кожній точці матеріалу встановлюється фазовий склад, який залежить від температури у цій точці. Повну відносну зміну об'єму у даному випадку можна визначити із рівняння [8]:

$$\varepsilon^{(T)} = 3 \int_{t_0}^{t_1} \alpha_t^*(t) dt, \quad (5)$$

де $\alpha_t^*(t)$ - узагальнений лінійний коефіцієнт теплового розширення, який враховує температурну і структурну дилатацію у титановій оболонці при нагріві [23]:

$$\alpha_t^*(t) = \begin{cases} \alpha_{t_{f0}}, & t < t_{f0} \\ (\alpha_{t_{f0}} + \alpha_{t_{f1}}) / 2 + \beta_\xi d\xi / dt, & t_{f0} \leq t < t_{f1}, \\ \alpha_{t_{f1}}, & t \geq t_{f1} \end{cases} \quad (6)$$

де $\alpha_{t_{f0}}$ і $\alpha_{t_{f1}}$ - лінійні коефіцієнти теплового розширення у температурних діапазонах $t < t_{f0}$ та $t \geq t_{f1}$ відповідно.

Після охолодження в оболонці фіксується неоднорідний фазовий розподіл, який створює деякий залишковий напружений стан. Залишковий відсотковий вміст β - фази у титановому сплаві оболонки після охолодження описуємо формулою [8]:

$$\xi(t) = \begin{cases} \xi_0, & t < t_{f0} \\ \frac{\xi_{res_1} - \xi_0}{t_{f1} - t_{f0}} t + \frac{\xi_0 t_{f1} - \xi_{res_1} t_{f0}}{t_{f1} - t_{f0}}, & t_{f0} \leq t < t_{f1}, \\ \xi_{res_1}, & t \geq t_{f1} \end{cases} \quad (7)$$

де ξ_{res_1} - залишковий відсотковий вміст β - фази у титановому сплаві при температурі завершення фазових перетворень t_{f1} . У цьому випадку, зміну об'єму визначають так [5]:

$$\varepsilon^{(\Xi)} = 3 \int_{\xi_0}^{\xi_{res_1}} \beta_{\xi} d\xi, \quad (8)$$

де ξ_{res_1} - залишковий відсотковий вміст β - фази у титановому сплаві, який відповідає максимальній температурі локального поля температурної витримки t_1 .

З урахуванням виписаних вище положень для визначення тимчасового і залишкового напружено-деформованого стану осесиметричної титанової оболонки використовуємо математичну постановку статичної задачі теорії пружності у вигляді варіаційного принципу Лагранжа в зручній для чисельної реалізації матрично-векторній формі [11,14,25,26]. З цією метою введемо вектори переміщень $\{u\} = (u_r, u_z)^T$, деформацій $\{\varepsilon\} = (\varepsilon_r, \varepsilon_{\varphi}, \varepsilon_z, 2\varepsilon_{rz})^T$ та напружень $\{\sigma\} = (\sigma_r, \sigma_{\varphi}, \sigma_z, \sigma_{rz})^T$. Тоді запишемо співвідношення Коші:

$$\{\varepsilon\} = [B]\{u\}, \quad (9)$$

рівняння рівноваги:

$$[B]^T \{\sigma\} = 0, \quad (10)$$

рівняння стану:

$$\{\sigma\} = [D](\{\varepsilon\} - \{\varepsilon^{(V)}\}), \quad (11)$$

і крайові умови:

$$[A]^T \{\sigma\} = 0, \text{ при } (r = r_1, z \in [z_0, z_1]), (r \in [r_0, r_1], z = z_1), \quad (12)$$

де $V = T, \Xi, -$ індекси для тимчасових (температурних) і залишкових (структурних) деформацій відповідно [2],

$$[B] = \begin{bmatrix} \frac{\partial}{\partial r} & \frac{1}{r} & 0 & \frac{\partial}{\partial z} \\ 0 & 0 & \frac{\partial}{\partial z} & \frac{\partial}{\partial r} \end{bmatrix}^T, \quad (13)$$

матриця геометричних співвідношень;

$$[D] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & \nu \\ \nu & \nu & 1-\nu & \nu \\ 0 & 0 & 0 & (1-2\nu)/2 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

матриця пружних сталих;

$$\Omega_2 = \left\{ \{u\} = \{u_r, u_z\}^T; (u_r = 0, r = 0, z \in [z_0, z_1]), (u_z = 0, r \in [r_0, r_1], z = 0) \right\}$$

$$[A] = \begin{bmatrix} n_r & 0 & 0 & n_z \\ 0 & 0 & n_z & n_r \end{bmatrix}^T, \quad (15)$$

матриця напрямних косинусів, записані з урахуванням осьової симетрії задачі.

Згідно варіаційного принципу Лагранжа [14] переміщення, які відповідають стану рівноваги, визначаються з умови мінімуму функціоналу

$$L(u) = \pi \int_{\Omega_2} \{u\}^T [B]^T [D] [B] \{u\} r dr - 2\pi \int_{\Omega_2} [B]^T [D] \{\epsilon^{(V)}\} r dr, \quad (16)$$

на множині:

$$\Omega_2 = \left\{ \{u\} = \{u_r, u_z\}^T; (u_r = 0, r = 0, z \in [z_0, z_1]), (u_z = 0, r \in [r_0, r_1], z = 0) \right\}, \quad (17)$$

За відомими переміщеннями деформації і напруження в кожній точці оболонки визначаємо за співвідношеннями (9) та (11).

При визначенні оптимального за напруженнями осесиметричного поля температурної витримки титанової оболонки обертання у діапазоні температур фазового переходу матеріалу, за критерій оптимізації приймаємо мінімум функціоналу енергії залишкових пружних деформацій оболонки [4]:

$$F = \frac{1}{2E} \int_{\Omega_2} (\sigma_z^2 + \sigma_\varphi^2 - 2\nu\sigma_z\sigma_\varphi) d\Omega, \quad (18)$$

Приймається, що залишкові напруження, що утворюються в оболонці після охолодження, визначаються неоднорідним фазовим розподілом. Тому ми оптимізуємо фазовий розподіл в оболонці, а потім визначаємо із (7) температурне поле, що викликає цей фазовий розподіл. У такий спосіб ставиться задача про визначення оптимального фазового розподілу у матеріалі, що відповідає локальному однорідному по товщині поля температурної витримки. Задача розв'язується з наступними граничними умовами:

$$\xi(\pm z_0) = \xi_{f0}, \quad \xi(0) = \xi_{rest1}, \quad \frac{d\xi(\pm z_0)}{dz} = 0, \quad (19)$$

Оптимальний фазовий розподіл є розв'язком задачі про визначення екстремуму функціоналу пружної енергії (18), що задовольняє умовам (19).

3. Методика розв'язування

В основу методики покладено підхід, який ґрунтується використанні методу скінченних елементів для апроксимації шуканих розв'язків за просторовими змінними [19].

На першому етапі внаслідок використання стандартної процедури методу скінчених елементів задачу визначення тимчасового і залишкового напруженого стану (9)- (12) зводимо до системи лінійних алгебраїчних рівнянь

$$[R]\{u_h\} = \{b\}, \quad (20)$$

відносно значень переміщень $\{u_h\}$ у вузлах скінчено-елементного поділу області, де матриця реакцій $[R]$ і вектор навантаження $\{b\}$ визначають шляхом сумування відповідних матричних характеристик

$$[R^{(e)}] = \int_{\Omega_2^{(e)}} [N]^T [B]^T [D] [B] [N] d\Omega, \quad (21)$$

$$\{b^{(e)}\} = \int_{\Omega_2^{(e)}} [N] [B]^T [D] \{\varepsilon^{(V)}\} d\Omega \quad (22)$$

окремих скінченних елементів, де $[N]$ - матриці функцій форми, $\Omega_2^{(e)}$ - область скінченого елемента.

На основі запропонованої методики створено відповідне програмне забезпечення і розв'язано низку конкретних задач.

4. Числові дослідження

Як приклад розглянемо вільну від силового навантаження циліндричну оболонку з титанового сплаву ВТ - 22 за дії локального кільцевого осесиметричного поля температурної витримки. Максимальна температура t_1 у центрі зони температурної витримки становить 720°C , температура навколишнього середовища $t_0 = 20^\circ\text{C}$. Даний сплав має такий хімічний склад: Al -5,4%, Mo -1,9%, V -4,7%, Cr -1,2%, Fe -0,5%, Ti -86,3%. У рівноважному стані при температурі $t_0 = 20^\circ\text{C}$, сплав містить 80% α -фази (гексагональна щільноупакована гратка) і 20% β -фази (об'ємноцентрована кубічна гратка). Як показано в [8,9], різниця питомих об'ємів між α і β фазами є приблизно 2,5%, що значно впливає на розподіл і величину тимчасових і залишкових напружень.

Числові дослідження проводили для параметрів [21]: $r_0 = 0,024$ м; $r_1 = 0,025$ м; $z_0 = 0,028$ м; $z_1 = 0,05$ м; $c = 0,523^\circ\text{Дж}/(\text{К моль})$; $\rho = 4540^\circ\text{кг}/\text{м}^3$; $t_{f0} = 520^\circ\text{C}$, $t_{f1} = 920^\circ\text{C}$, $t_1 = 720^\circ\text{C}$, $E = 106$ МПа; $\nu = 0,3$, $\alpha_{t_{f0}} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, $\alpha_{t_{f1}} = 0,8 \cdot 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$; $\beta_\xi = -0,013$; $\xi_{rest_1} = 38\%$; $\xi_{res_1} = 60\%$.

На рис. 1 зображено графік лінеаризованої функції повноти фазових перетворень $\xi(t)$ при рівномірному нагріві (крива 1) і експериментально визначена залежність відносного вмісту залишкової β - фази в матеріалі після охолодження (крива 2).

Рис. 2 ілюструє початковий розподіл температури в оболонці (крива 1) і розподіл температури, який відповідає оптимальному розподілу фаз (крива 2).

На рис. 3 подано залишковий розподіл β - фази, який відповідає початковому розподілу температури в оболонці (крива 1) і оптимальний залишковий розподіл β - фази після охолодження (крива 2) відповідно.

На рис. 4 зображено розподіл тимчасових осьових напружень, який відповідає початковому розподілу температури в оболонці і залишкових осьових напружень після охолодження (крива 2).

На рис. 5 зображено розподіл оптимальних тимчасових осьових напружень під час температурної витримки (крива 1) і оптимальних залишкових осьових напружень після охолодження (крива 2).

Задача оптимізації розв'язувалась методом Хука-Джівса [21]. Залишковий фазовий розподіл, який зображений на рис. 5, крива 1, був прийнятий за початкове наближення для визначення оптимального, який спричиняє мінімальні залишкові напруження. Мінімізація функціоналу (21) здійснювалася шляхом варіювання залишкового фазового розподілу. Мінімізація проводилася доти, поки його n -те наближення не відрізнялося більш ніж на 1 % від попереднього.

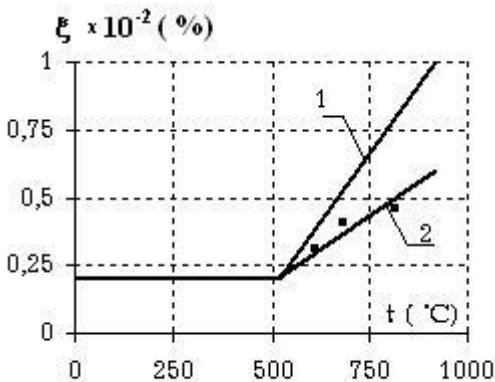


Рис. 1

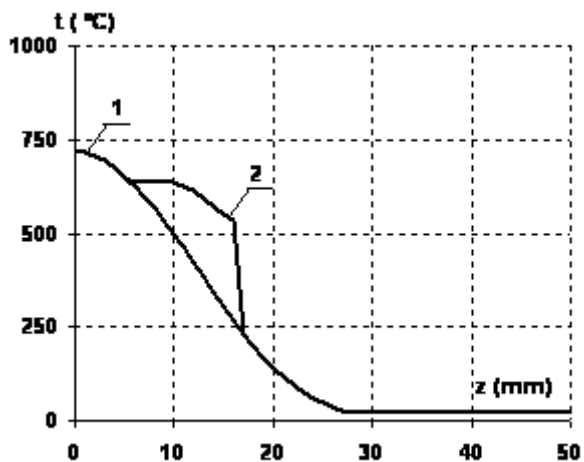


Рис. 2

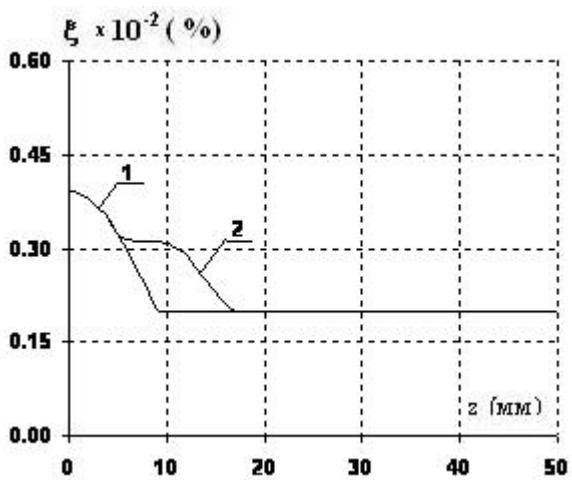


Рис. 3

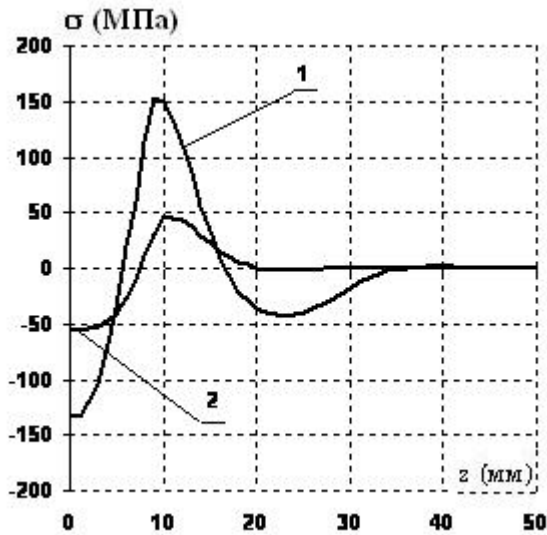


Рис. 4

При оптимізації функціоналу (21) за залишковими напруженнями, початкове значення функціоналу було визначено при допомозі залишкового фазового розподілу (рис. 3, крива 1), який виник після температурної витримки температурним полем (рис. 2, крива 1). Оптимальний залишковий фазовий розподіл (рис. 3, крива 2) було визначено методом Хука-Джівса. Залишкові осьові напруження на зовнішній поверхні оболонки (криві 2 на рис. 4) відповідають цьому оптимальному фазовому розподілу. Режим температурної витримки (рис. 2, крива 2), що створює цей фазовий розподіл, був визначений при допомозі залежності $\xi = \xi(t)$, яка зображена на рис. 2, крива 2. Знайдене тут температурне поле мінімізує залишкові напруження у циліндрі, які появляються після цього режиму температурної витримки.

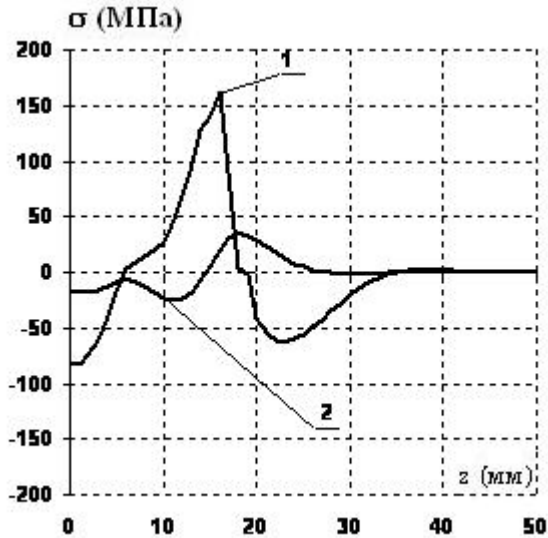


Рис. 5

Висновки. Розроблено методику розв'язання задач визначення і оптимізації фазового складу і залишкового структурного напруженого стану титанових сплавів за умов локального поля температурної витримки на основі методу скінчених елементів.

В рамках запропонованої методики здійснено розрахунок і оптимізацію тимчасових і залишкових (структурних) напружень в осесиметричній оболонці за умов локального поля температурної витримки.

Запропонована методика може бути застосована для розрахунку режимів обробки виробів із сталі і титанових сплавів, що мають кілька центрів локалізації, різні розподіли потоків нагріву та додаткового підігріву. Даний підхід може бути застосований до скляних тіл при наявності явища силування [22]

Література

- [1] Бурак Я.И., Григолоук Э.И., Подстригач Я.С. О применении методов вариационного исчисления к решению задач об оптимальном нагреве тонких оболочек. В кн.: Тр. VII Всесоюз. конф. по теории оболочек и пластин. М. Наука, 1970, С. 100-108.
- [2] Беленов Ф. С. Кинетика закалки и определение временных закалочных напряжений // ЖТФ, т. 22, вып. 1, — 1952. — С. 111 — 120.
- [3] Гачкевич О.Р., Асташкін В.І. Математичне моделювання і аналіз термомеханічної поведінки твердих тіл в умовах фазових перетворень // Прикладні проблеми механіки і математики, Львів, 2003, №1, с.68-72
- [4] Григолоук Э.И., Подстригач Я.С., Бурак Я.И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин. Киев, Наукова думка, 1979. - 364 с.
- [5] Ильин А.А., Коллеров М.Ю., Засыткин В.В., Майстров В.И. Объемные изменения, происходящие в (α-β) титановых сплавах при полиморфном превращении. Металловедение и термическая обработка, 1986, №1, С.52-55.

- [6] Ильин А.А. Механизм и кинетика фазовых и структурных превращений в титановых сплавах. –М.: Наука, 1994.-304 с.Беленов Ф. С. Кинетика закалки и определение временных закалочных напряжений // ЖТФ, т. 22, вып. 1, — 1952. — С. 111 — 120.
- [7] П. Зайффарт, О.Г. Касаткин Расчетные модели для оценки механических свойств металла ЗТВ при сварке низколегированных сталей // Микроструктура и свойства, 2002, — № 2, — С. 103-106.
- [8] Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. — Москва: Мир, 1986. — 319 с.
- [9] Коваленко А.Д. Основы термоупругости. -Киев: Наук. думка, 1970. - 307 с.
- [10] Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел — М.: Наука, 1970. — 175 с.
- [11] Метод конечных элементов в механике твердых тел./Под ред. Сахарова А.С., Альтенбаха И. — Киев: Вища школа, 1982. — 480с.
- [12] Подстригач Я.С., Горячева З.И., Бурак Я.И., Беседина Л.П., Козакова Л.А., Каныгин В.А. О влиянии профиля температурного поля на релаксацию остаточных напряжений при локальном нагреве кольцевых сварных швов. Физ.-хим. механика материалов,1970, №1, С. 42-45.
- [13] Подстригач Я.С., Ломакин В.А., Коляно Ю.М. Термоупругость тел неоднородной структуры. — М.: Наука. — 1984. — 368 с
- [14] Таблицы физических величин. (Под ред. И.К. Кикоина). -М. Атомиздат, 1976.-1006 с.
- [15] Monkawa M., Nagaki S. and Inine T. Analyses of structural and stress changes during quenching and low-temperature-tempering of steels. The Journal of Society Material Science, Japan, 1980, v.29. N 327, p.1173-1179.
- [16] Budz S., Astashkin W., Budz I. and Chupyk I. Optimization of local heating for a spherical shell made of titanium alloy BT-23. Archives of mechanics, Warszawa, 1998, v.50. N 1, p.113-126.
- [17] Hachkevych A., Drobenko B., Kourmyts'kyi T. A mathematical simulation of high temperature induction heating of electroconductive solids// International Journal of Heat and Mass Transfer, 50 (2007) 616 –624.
- [18] Zienkiewicz O. C., Taylor R. L. *Finite Element Method: V. 1. The Basis*. — London: Butterworth Heinemann, 2000. — 689 p.
- [19] Zienkiewicz O. C., Wood W. L., Nine N. W. A unified set of single step algorithm. Part 1: General formulation and applications // Int. J. Numer. Meth. Eng. — 1984. 20. — P. 1529–1552.
- [20] Ю.Н. Коваль, В.А. Лободюк Деформационные и релаксационные явления при превращениях мартенситного типа. Киев «Наукова думка» 2010 287 с.
- [21] Химмельблау. Прикладное нелинейное программирование, -М.: Мир, 1975. -532 с.
- [22] Будз С., Гачкевич О., Гачкевич М., Триц Б., Касперський З. Методика розрахунку режимів гартування скляних елементів машин і конструкцій. Машинознавство. 2002, №2 (56). –С.3-6

Modelling of phase transition and residual stresses in construction elements subjected to thermal loading

Oleksandr Hachkevych, Bohdan Drobenko, Volodymyr Astashkin, Stepan Budz, Ihor Budz, Ihor Chupyk

Numerical optimization method of local temperature curing for axis-symmetric shells made of titanium alloy based on Huke-Jives and finite element method is developed. The phenomena of polymorphic transition during temperature changing is taken into account.

Олександр Гачкевич, Богдан Дробенко, Володимир Асташкін, Степан Будз, Ігор Будз, ...
Модельний опис фазових перетворень і залишкових напружень в елементах конструкцій...

Модельное описание фазовых превращений и остаточных напряжений в элементах конструкции при термической нагрузке

Александр Гачкевич, Богдан Дробенко, Владимир Асташкин, Степан Будз,
Игорь Будз, Игорь Чупик

На основании метода Хука-Дживса и метода конечных элементов разработано числовую методику оптимизации локального поля нагрева осесимметричной оболочки, которая изготовлена из титанового сплава. Учтено явление полиморфного превращения при изменении температуры.

Отримано 26.12.2017