

УДК 539.377

НАПРУЖЕНИЙ СТАН ТИТАНОВОЇ ОБОЛОНКИ ОБЕРТАННЯ ПРИ ЛОКАЛЬНОМУ НАГРІВІ З ВРАХУВАННЯМ ФАЗОВИХ ПЕРЕТВОРЕНЬ

Олександр ГАЧКЕВИЧ^{1,2}, Богдан ДРОБЕНКО¹, Володимир
АСТАШКІН¹, Степан БУДЗ¹, Ігор ЧУПИК¹

¹Інститут прикладних проблем механіки і математики ім. Я.С.
Підстригача НАН України, вул. Наукова, 36, 79053 Львів, Україна

²Політехніка Опольська,
вул. Станіслава Миколайчука, 5, 45-271 Ополе, Польща

Розроблено числову методику визначення напруженого стану локально нагрітої оболонки обертання, яка виготовлена з титанового сплаву. Враховано ефект зміни об'єму при фазовому переході.

Ключові слова: фазові перетворення, залишкові напруження.

Для підвищення міцності і надійності конструкційних елементів із титанових сплавів широко використовують технології обробки, які ґрунтуються на локальному нагріві. При такому нагріві в локальних областях змінюється фазовий склад, що приводить до появи залишкових напружень і може бути причиною руйнування виробів. Внаслідок перетворень у конструкції можуть формуватися напруження, які додатково впливають на її напружений стан. Тому актуальним є формулювання і розв'язування задачі визначення напруженого стану й оптимізації режимів локального нагріву тонких оболонок в діапазоні температур фазового перетворення в матеріалі. Рівні таких напружень потрібні також для оцінки різних функціональних і екологічних параметрів відповідних елементів конструкцій і приладів [1].

Математична теорія оптимального локального нагріву викладена в [2-3]. Ця теорія побудована для матеріалів і режимів нагріву без структурних перетворень. Наша мета - розв'язати задачу визначення тимчасових і залишкових напружень у титановій оболонці обертання з врахуванням фазових перетворень.

У загальному випадку задача кількісної оцінки фазового складу титанових сплавів і зумовлених ними залишкових (структурних) напружень вимагає побудови кінетичних рівнянь, які описують еволюцію фазового складу з врахуванням впливу на неї температури, напруження та часу. Для виробів з титанових сплавів, які піддаються монотонному охолодженню, можна використовувати моделі, які ґрунтуються на використанні експериментальних даних про вплив умов нагрівання-охолодження на фазовий склад сплаву. Визначений на підставі цієї моделі фазовий склад може бути використаний для прогнозування властивостей

виробу і кількісної оцінки, які виникають у залишкових (структурних) напруженнях, які вносять значний вклад у величину сумарних експлуатаційних напружень [4,5].

Мета нашої праці - математичне моделювання і дослідження напруженого стану оболонки обертання, внутрішнього та зовнішнього радіуса r_0 , r_1 , яка виготовлена з титанового сплаву ВТ-23 при локальному кільцевому осесиметричному нагріванні (рис.1). Приймаємо, що оболонка механічно не навантажена. Температура нагрівання оболонки змінюється уздовж осі циліндра і набуває вигляду

$$t = t(t_0, t_1, z_0, z, r, \tau), \quad (1)$$

де t_0 - температура навколишнього середовища; t_1 - максимальна температура в центрі зони нагрівання, z_0 - півширина локальної зони нагрівання; z_1 - довжина оболонки; z - осьова координата; r - радіальна координата; τ - час.

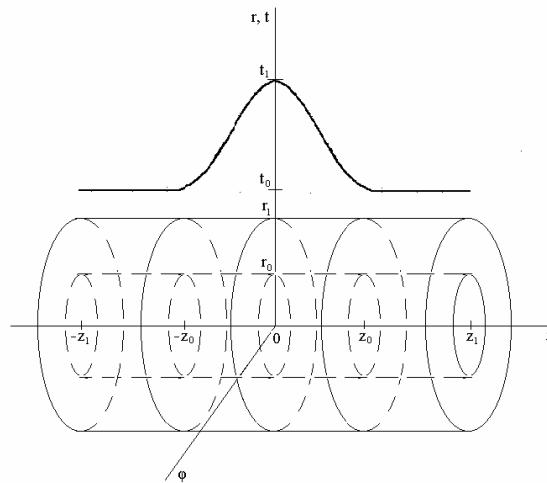


Рис.1. Локальне нагрівання оболонки

У рівноважному стані при температурі $t_0 = 20^\circ\text{C}$ титановий сплав ВТ-23 має 80% α -фази (гексагональна щільноупакована ґратка) і 20% β -фази (об'ємноцентрована кубічна ґратка). Під час нагрівання сплаву від температури початку фазових перетворень $t_{f0} = 520^\circ\text{C}$ до температури завершення фазових перетворень $t_{f1} = 920^\circ\text{C}$, кількість β -фази в ньому збільшується до 100%. Різниця питомих об'ємів α і β фаз становить приблизно 2,5%, що суттєво впливає на розподіл і величину напружень, які зумовлені нагріванням і неоднорідним розподілом фаз після його завершення [4].

На рис. 2 зображено графік лінійної апроксимації експериментально визначеної залежності кількості β -фази (Ξ) від температури t при рівномірному нагріванні (крива 1) і експериментально визначеного відносного вмісту залишкової β -фази в матеріалі під час охолодження (крива 2) [5].

Методика чисельного моделювання фізико-механічних процесів у локально нагрітій титановій оболонці з врахуванням фазових перетворень побудована з використанням методу скінченних елементів (МСЕ). У цьому разі для апроксимації температурно-залежних властивостей матеріалу запропоновано інтерполяційні сплайни, які побудовані по точках кривих, що описують поведінку матеріалу у широкому температурному діапазоні (такий підхід допомагає описувати реальні криві практично довільної складності).

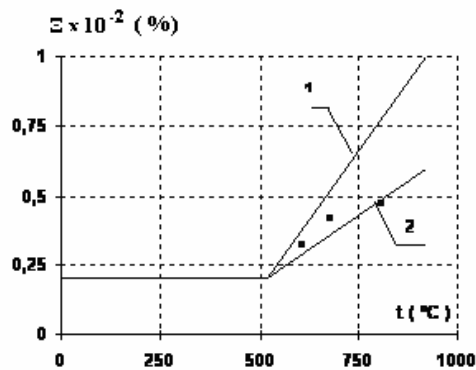


Рис. 2. Лінійна апроксимація залежності кількості β -фази (Ξ) від температури

Розв'язок сформульованої математичної задачі виконуємо у два етапи. На першому нестационарну температурну задачу (внаслідок проведення стандартної процедури кінцево-елементної дискретизації варіанту методу зважених залишків) зводимо до системи звичайних диференціальних рівнянь стосовно невідомих значень температури у вузлах кінцевого елемента. Розв'язок отриманої задачі Коші знаходимо за допомогою простих однокрокових алгоритмів, які допомагають обчислювати зі змінним кроком і порядком. Визначений на цьому етапі розподіл температури є вхідним параметром для задачі другого етапу: визначення тимчасових і залишкових (структурних) напружень.

На першому етапі формулюється і розв'язується задача теплопровідності. Якщо сформульовані припущення, то розподіл температури в оболонці описується рівнянням теплопровідності

$$\mathbf{c} \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{t}} = \frac{1}{\mathbf{r}} \frac{\partial}{\partial \mathbf{r}} \left(\lambda \mathbf{r} \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{r}} \right) + \frac{\partial}{\partial \mathbf{z}} \left(\lambda \frac{\partial \Gamma}{\partial \mathbf{z}} \right) \quad (2)$$

при таких граничних і початкових умовах:

$$\frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{0} \text{ при } \mathbf{r} = \mathbf{r}_0, \quad \lambda \frac{\partial \mathbf{t}}{\partial \mathbf{r}} = \mathbf{k}(\mathbf{t} - \mathbf{t}_0) \text{ при } \mathbf{r} = \mathbf{r}_1, \quad (3)$$

$$\mathbf{t}(\mathbf{r}, \tau) = \mathbf{t}_0 \text{ при } \tau = 0, \quad (4)$$

де λ - коефіцієнт теплопровідності; \mathbf{c} - питома теплоємність; ρ - густина матеріалу; \mathbf{k} - коефіцієнт теплообміну; \mathbf{t}_0 - початкова температура.

Приймаємо, що зміна фазового складу матеріалу під час нагрівання впливає на рівень тимчасових напружень, а залишкові напруження є наслідком фіксації неоднорідного фазового складу матеріалу при охолодженні.

Під час нагрівання сумарна зміна об'єму матеріалу оболонки складається з двох частин - теплової $d\mathbf{e}_t$ і структурної $d\mathbf{e}_\xi$

$$d\mathbf{e}_T = d\mathbf{e}_t + d\mathbf{e}_\xi. \quad (5)$$

Тут $d\mathbf{e}_t = 3\alpha_t d\mathbf{t}$, $d\mathbf{e}_\xi = 3\beta_t d\Xi$, α_t - лінійний коефіцієнт теплового розширення, β_t - лінійний коефіцієнт структурної дилатації під час нагрівання (дилатація, яка залежить від відносного вмісту фаз). У загальному випадку коефіцієнти α_t і β_t є функціями температури. Варто зауважити, що в діапазоні температур фазового перетворення титанового сплаву температурна компонента зміни об'єму $d\mathbf{e}_t$ зі збільшенням температури збільшується, а структурна $d\mathbf{e}_\xi$, зменшується [5].

Якщо дуже повільне або стаціонарне нагрівання, то в кожній точці матеріалу усталюється деякий фазовий склад, який залежить від температури в цій точці (ступінь повноти фазового перетворення Ξ є функцією лише температури \mathbf{t}). Повну відносну зміну об'єму тут можна визначити з рівняння [5]

$$d\mathbf{e}_T = 3\alpha^*(\mathbf{t}) d\mathbf{t}, \quad (6)$$

де $\alpha^*(\mathbf{t}) = \alpha_t + \beta_t d\Xi/d\mathbf{t}$ - узагальнений лінійний коефіцієнт теплового розширення, який залежить від усіх змін об'єму, що відбулись в оболонці під час нагрівання (рис.3).

Після охолодження неоднорідний розподіл фаз приводить до залишкового (структурного) напруженого стану. У цьому випадку зміну об'єму визначаємо на підставі співвідношення [6]

$$d\mathbf{e}_{\Xi} = 3\beta_{\xi} d\Xi, \quad (7)$$

де β_{ξ} лінійний коефіцієнт структурної дилатації після охолодження титанового славу.

На другому етапі тимчасові та залишкові напруження знаходимо за допомогою формули [7]

$$d\sigma_{ij} = \frac{E}{1+\nu} \left(d\mathbf{e}_{ij} + \frac{1}{1-2\nu} [\nu d\mathbf{e} - (1+\nu)d\mathbf{e}_a] \delta_{ij} \right). \quad (8)$$

Тут $d\sigma_{ij}$ - прирости компонент тензора напружень; $d\mathbf{e}_{ij}$ - прирости компонент тензора деформацій; E - модуль Юнга; ν - коефіцієнт Пуассона; $\mathbf{e} = \mathbf{e}_{11} + \mathbf{e}_{22} + \mathbf{e}_{33}$; δ_{ij} - символи Кронекера; $\mathbf{a} = \mathbf{T}, \Xi$, $\mathbf{i}, \mathbf{j} = (1, 2, 3)$.

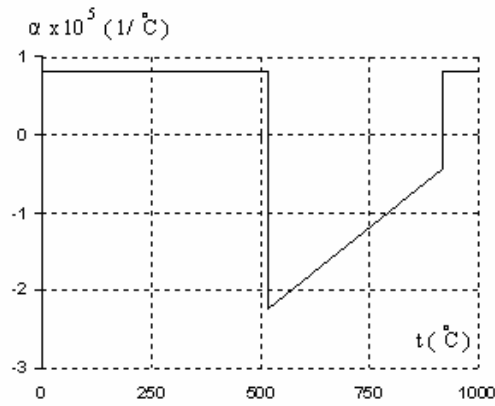


Рис. 3. Узагальнений лінійний коефіцієнт теплового розширення

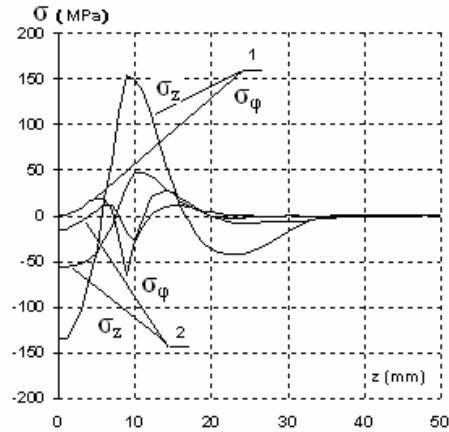


Рис. 4. Тимчасові та залишкові напруження

На рис. 4 зображено графіки розподілу тимчасових (крива 1) і залишкових (крива 2) осьових σ_z і кільцевих σ_φ напружень оболонки. Обчислення проводили за такими геометричними та фізичними параметрами: $z_0=0,028$ м, $z_1=0,05$ м, $r_0=0,024$ м, $r_1=0,025$ м, $t_0=20^\circ\text{C}$, $t_1=720^\circ\text{C}$, $E=106^\circ\text{МПа}$, $\nu=0,3$, $k=10^{-2}\text{КВт}/(\text{м К})$, $\lambda=21,9^\circ\text{Вт}/(\text{м К})$, $\rho=4540^\circ\text{кг}/\text{м}^3$, $c=0,523^\circ\text{Дж}/(\text{К моль})$. Тимчасові напруження відповідають моменту часу, коли було досягнуто розподіл температури (1).

Із отриманих результатів випливає, що при локальному нагріванні тимчасові напруження приблизно втричі перевищують залишкові в тих самих точках тіла. На величину і розподіл тимчасових і залишкових напружень можна впливати шляхом вибору поля локального нагрівання.

-
1. Аспекты социальной политики в области безопасности производственной среды/ М. Гаек, Н. Иванова, И. Мулицка, С Рябов, Л. Шварцбург. – Москва; Ополе, 2005.
 2. Григолюк Э.И., Подстригач Я.С., Бурак Я.И. Оптимизация нагрева оболочек и пластин. К., 1979.
 3. Коваленко А.Д. Основы термоупругости. – К., 1970.
 4. Ломакин В.А. Статистические задачи механики твердых деформируемых тел – М., 1970.
 5. Ильин А.А., Коллеров М.Ю., Засыпкин В.В., Майстров В.И. Объемные изменения, происходящие в титановых сплавах при полиморфном превращении // Металловедение и термическая обработка. 1986. №1. С.52-55.
 6. 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. Vol.29. N 327. P.1173-1179.
 7. 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. Vol.50. N 1. P.113-126.

**НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ ТИТАНОВЫХ ОБОЛОЧЕК ПРИ
ЛОКАЛЬНОМ НАГРЕВЕ С УЧЕТОМ ФАЗОВЫХ ПРЕОБРАЗОВАНИЙ****Александр ГАЧКЕВИЧ^{1,2}, Богдан ДРОБЕНКО¹, Владимир АСТАШКИН¹,
Степан БУДЗ¹, Игорь ЧУПИК¹**

¹*Институт прикладных проблем механики и математики
им. Я.С Подстригача НАН Украины, ул. Научная, 3б 79053 Львов, Украина*

²*Политехника Опольская,
ул. Станислава Николайчука, 5 45-271 Ополе, Польша*

Разработана численная методика определения напряженного состояния локально нагретой оболочки вращения, изготовленной из титанового сплава. Учтен эффект изменения объема при фазовом переходе.

Ключевые слова: фазовые превращения, остаточные напряжения, термомеханические процессы.

**STRESS STATE OF TITANIUM CIRCULAR SHELL DURING LOCAL
HEATING TAKING INTO ACCOUNT PHASE TRANSITION****Oleksandr HACHKEVYCH^{1,2}, Bogdan DROBENKO¹, Volodymyr
ASTASHKIN¹, Stepan BUDZ¹, Ihor CHUPYK¹**

¹*Pidstryhach Institute for Applied Problems of Mechanics and Mathematics,
Naukova Str., 3b, 79053 Lviv, Ukraine*

²*Technical University of Opole,
Stanislawa Mikolajchuka Str., 5, 45-271 Opole, Poland*

The problem of numerical modelling for stress state of local heating for circular shell made of titanium alloy is posed and solved. The effect of the volume changes occurring during phase transition is taken into account.

Key words: phase transitions, residual stresses, thermo-mechanical processes.

Стаття надійшла до редколегії 10.11.2009

Прийнята до друку 22.12.2010