

УДК 621.78

Д.Г. ШЕРСТЮК¹, Г.Г. ШЕРСТЮК¹, А.А. ФОКІН², Є.А. СОШНІКОВ², О.В. КУЛИК³¹ Дніпропетровський національний університет імені імені О. Гончара, Україна² ВАТ «Український НДІ технології машинобудування», Дніпропетровськ³ Національний центр аерокосмічної освіти молоді ім. О. Макарова, Дніпропетровськ

РОЗРАХУНКОВО-АНАЛІТИЧНЕ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ПРОЦЕСУ ТЕРМОМЕХАНІЧНОГО КАЛІБРУВАННЯ ВЕЛИКОГАБАРИТНИХ ОБИЧАЙОК З ВНУТРІШНІМИ ФУНКЦІОНАЛЬНИМИ ЕЛЕМЕНТАМИ

Проведено аналітичний огляд існуючих методик розрахунку параметрів процесів термомеханічної обробки. Використовуючи основні положення напівбезмоментної та моментної теорій оболонок для великогабаритних металевих обичайок і технологічних оправок, проаналізовано напружено-деформований стан в системі обичайка-оправка та теоретико-аналітичним методом встановлено універсальні співвідношення основних параметрів процесу термомеханічного калібрування. Отримані параметри – зусилля, що діє на оправку (зусилля механічного калібрування), висота та радіус оправки є основними параметрами процесу термомеханічного калібрування та дозволяють забезпечити достатню міру точності обичайки.

Ключові слова: термомеханічне калібрування, аналітичний метод, ключові параметри процесу.

Вступ

У процесі термомеханічного калібрування зварних металевих обичайок з внутрішніми функціональними елементами, що притаманні корпусам аеродинамічним обтічникам, матеріал останніх знаходиться у напружено-деформованому стані, який наближається до критичного і призводить до небажаних деформацій функціональних елементів або вафельного фону. Визначення оптимального методу розрахунку параметрів процесу термомеханічного калібрування дозволить розробити ефективний методу термомеханічного калібрування. Вирішення проблеми вимагає урахування всіх можливих зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на процес термомеханічного калібрування, та встановлення їх взаємозалежності в універсальній формулі при аналітичному рішенні.

Для визначення стійкості пружних, ізотропних, тонкостінних циліндричних оболонок з малими початковими неправильностями форми, що перебувають під дією зовнішнього тиску в статті Е.О. Лопаніцина [1] використовуються рівняння, ідентичні рівнянням Маргерра для пологої циліндричної оболонки. Рішення будується методом Релея-Рітца з апроксимацією переміщень точок серединної поверхні оболонки подвійними функціональними сумами за тригонометричними і балковими функціями. В результаті система, отриманих нелінійних алгебраїчних рівнянь, вирішується «методами продовження». У якості початкових неправильностей оболонки

використовуються її прогини із граничних точок закритичних областей її траєкторії навантаження.

У дисертаційній роботі [2] проводиться дослідження стійкості тонких кругових циліндричних оболонок середньої довжини в межах пружності при спільній дії тиску й локальних поверхневих навантажень або моментів. Навантаження й моменти на оболонку передаються через тверді приварені або прикручені болтами накладки. З конструктивних міркувань накладки, як і ребра підкріплення, розташовуються із зовнішньої або внутрішньої поверхні оболонки.

Теоретико-експериментальний метод професора А.В. Саченкова, заснований на теорії подоби й розмірностей, дозволяє на основі попереднього теоретичного аналізу встановити параметри, що визначають функціональні залежності й побудувати структурні формули, які описують характерні риси поведіння пластин і оболонок з точністю до постійних і функцій, обумовлених надалі на підставі експериментальних даних [2].

У статті Н.Н. Столярова [3] показані результати досліджень підкріпленої циліндричної оболонки. Отримано диференціальні рівняння, що описують деформування для радіального переміщення й кутового повороту при термосиловому навантаженні. Запропоновано рівняння спільності деформацій для багатозв'язаної тонкостінної конструкції в місцях стиків оболонок між собою.

Теоретичний метод розрахунку основних параметрів термомеханічного калібрування проводився в

«Українському науково-дослідному інституті технології машинобудування». Для вирішення основної проблеми були виведені універсальні співвідношення для знаходження геометричних параметрів та зусилля, що діє на технологічне оснащення [4].

Розроблені методики розрахунку враховують лише загальні механічні параметри та використовують велику кількість припущень без застосування окремих теоретичних моделей поведінки по відношенню в системі обичайка-оправка.

Постановка проблеми

Аналітичним методом визначити геометричні параметри технологічної оправки та параметри напружено-деформованого стану в системі обичайка-оправка, як основних параметрів процесу термомеханічного калібрування.

Викладення основного матеріалу

Розрахунок оправки для термомеханічного калібрування проводиться з умови, що при нагріванні до певної температури (Т) діаметр оснащення та діаметр деталі стануть однаковими.

Умову спільності переміщень оправки й обичайки можна записати у вигляді:

$$\delta_{об} = \delta_{оп} + \delta_3, \quad (1)$$

де $\delta_{об}$ – повне радіальне переміщення поверхні обичайки по зовнішньому діаметру, що складається з позитивного температурного переміщення $\delta_{об}^T$ й негативного силового переміщення $\delta_{об}^c$ в результаті силового впливу із сторони оснащення;

$\delta_{оп}$ – повне радіальне переміщення внутрішньої поверхні оснащення, що складається з позитивного температурного переміщення $\delta_{оп}^T$ й позитивного силового переміщення $\delta_{оп}^c$ в результаті силового впливу з боку оснащення;

δ_3 – величина технологічного зазору між обичайкою та оправкою.

Приймаючи до уваги складові повних радіальних переміщень обичайки й оправки, умова спільності переміщень (1) приймає вигляд:

$$\delta_{об}^T - \delta_{об}^c = \delta_{оп}^T + \delta_{оп}^c + \delta_3. \quad (2)$$

Температурні переміщення обичайки та оправки мають вид:

$$\begin{aligned} \delta_{об}^T &= R_{об} (1 + \alpha \Delta T); \\ \delta_{оп}^T &= R_{оп} (1 + \alpha \Delta T), \end{aligned} \quad (3)$$

де α – коефіцієнт лінійного температурного розширення.

Величина технологічного зазору між обичайкою та оправкою

$$\delta_3 = R_{оп} - R_{об}, \quad (4)$$

де $R_{об}$ – радіус обичайки;

$R_{оп}$ – радіус технологічної оправки.

Силове переміщення обичайки знаходимо з рівнянь напівбезмоментної теорії оболонки. Ця теорія є найбільш повною для розрахунків та досліджень, при навантаженнях, що швидко змінюються вздовж окружної координати. Для даної теорії базується на трьох гіпотезах:

1. Статичній. Припускаючи рівність нулю поздовжніх сил, згинальних на закручувальних моментів.

2. Кінематичній. Вважаючи незначною окружну деформацію та деформацію зсуву, прирівнюють їх до нуля.

3. Фізичній. При побудові рівнянь не приймається до уваги коефіцієнт Пуассона.

Всі три види гіпотез добре узгоджені з реальними умовами термомеханічного калібрування, де по відношенню до обичайки можна вважати відсутніми поздовжні сили та згинальні моменти. Деформації, що відбуваються у процесі термомеханічного калібрування проходять у пружній області для технологічної оправки та складають $\epsilon = 0,009$ для обичайки. Фізична гіпотеза – нехтування коефіцієнтом Пуассона, компенсується впливом температурних переміщень, де коефіцієнт лінійного температурного розширення враховує особливість матеріалу.

Елемент оболонки з усіма силами, що впливають на нього представлено на рис. 1.

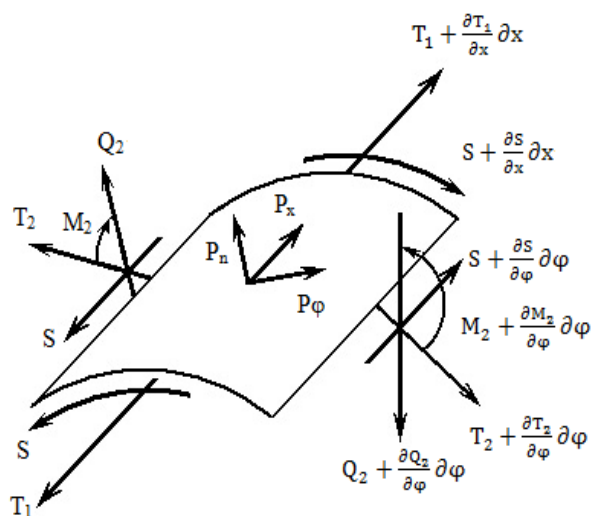


Рис. 1. Елемент оболонки та фактори зовнішнього впливу

Основні рівняння напівбезмоментної теорії [5]:

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial x^2} + \frac{D}{R^6} \left(\frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + 2 \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} + \frac{\partial^2 w}{\partial \varphi^2} \right) - \frac{\partial^2 p_n}{R \partial \varphi^2} - \frac{\partial^3 p_\varphi}{\partial \varphi} + \frac{\partial p_x}{\partial x} = 0; \quad (5)$$

$$\frac{\partial^2 T_1}{\partial \varphi^2} - BR \frac{\partial^2 w}{\partial x^2} = 0. \quad (6)$$

Після диференціювання рівняння (5) два рази по φ та виразу (6) по x , відкидаючи T_1 отримуємо рівняння радіального переміщення w :

$$\frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{D}{BR^6} \left(\frac{\partial^8 w}{\partial \varphi^8} + 2 \frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) = \frac{1}{BR^2} \left(\frac{\partial^4 p_n}{\partial \varphi^4} + \frac{\partial^3 p_\varphi}{\partial \varphi^6} - R \frac{\partial^3 p_x}{\partial x \partial \varphi^2} \right). \quad (7)$$

Для циліндричної оболонки однорідне рівняння стійкості можна отримати з припущення

$$p_x = 0, p_\varphi = 0, p_n = -pR \aleph_2 + T_{10} \aleph_1 + 2S_0 \aleph_{12},$$

тоді:

$$B_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{D_2}{R^6} \left(\frac{\partial^8 w}{\partial \varphi^8} + 2 \frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) + \frac{\partial^4}{R^2 \partial \varphi^4} (T_{20} \aleph_2 - T_{10} \aleph_1 - 2S_0 \aleph_{12}) = 0, \quad (8)$$

де B_1 – погона жорсткості оболонки на розтягнення у поздовжньому напрямленні;

D_2 – погона жорсткості оболонки на згинання у площині в окружному напрямленні;

\aleph – зміна кривизни серединної поверхні оболонки.

Початкові умови для оболонки під внутрішнім тиском та закріпленій основі можна записати як:

$$T_{10} = 0; T_{20} = -pR, S_0 = 0.$$

Однорідне рівняння стійкості виходячи з початкових умов приймає вигляд:

$$B_1 \frac{\partial^4 w}{\partial x^4} + \frac{D_2}{R^6} \left(\frac{\partial^8 w}{\partial \varphi^8} + 2 \frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) + \frac{p}{R^3} \left(\frac{\partial^6 w}{\partial \varphi^6} + \frac{\partial^4 w}{\partial \varphi^4} \right) = 0. \quad (9)$$

Записавши $w = X \times \sin n\varphi$, після перетворень та переходу до диференційного рівняння з постійними коефіцієнтами маємо:

$$X^{IV} - \left(\frac{\lambda}{R}\right)^4 X = 0, \quad (10)$$

$$\text{де } \lambda^4 = \frac{Rn^4(n^2-1)}{B_1} \left[p - \frac{D_2(n^2-1)}{R^3} \right].$$

Вирішення наведеного рівняння використовуючи найбільш суттєвий корінь рівняння λ_1 , який записується як $\lambda_1 = \frac{\pi R}{l}$, отримуємо:

$$p_{кр} = 4 \frac{\pi R}{l} \left(\frac{B_1}{R} \right)^{\frac{1}{4}} \left(\frac{D_2}{R^3} \right)^{\frac{3}{4}}. \quad (11)$$

Критичне стискальне окружне напруження має вигляд:

$$\sigma_{кр} = \frac{0,92ER}{l} \left(\frac{h}{R} \right)^{\frac{3}{2}}, \quad (12)$$

де h – товщина оболонки, мм;

l – висота (довжина) оболонки, мм.

Для оправлення під час процесу термомеханічного калібрування ключовим параметром є збереження геометричних розмірів, що дозволяють багаторазове її використання без переточування.

Критичним напруженням, що змінює геометрію оправлення можна прийняти межу текучості, що розраховується з умови $\sigma_r = (0,75-0,85)\sigma_B$ [5] та із узагальненого закону Гука ($\sigma = \varepsilon E$) одержуємо:

$$\varepsilon E = 0,8 \left[\frac{0,92ER}{l} \left(\frac{h}{R_{об}} \right)^{\frac{3}{2}} \right]. \quad (13)$$

Звідки знаходимо відносне силове переміщення обичайки

$$\varepsilon = \frac{0,736R}{l} \left(\frac{h}{R_{об}} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (14)$$

Абсолютне силове переміщення обичайки має кінцевий вигляд:

$$\delta_{об}^c = \varepsilon R_{об} = \frac{0,736R_{об}^2}{l} \left(\frac{h_{об}}{R_{об}} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (15)$$

Силове переміщення оправки під внутрішнім тиском знаходимо з рівнянь моментної теорії оболонок, яка дозволяє детально розглянути випадок вісесиметричного навантаження [6].

Елемент оправки під зовнішнім тиском, з усіма силами, що впливають на нього представлено на рис. 2.

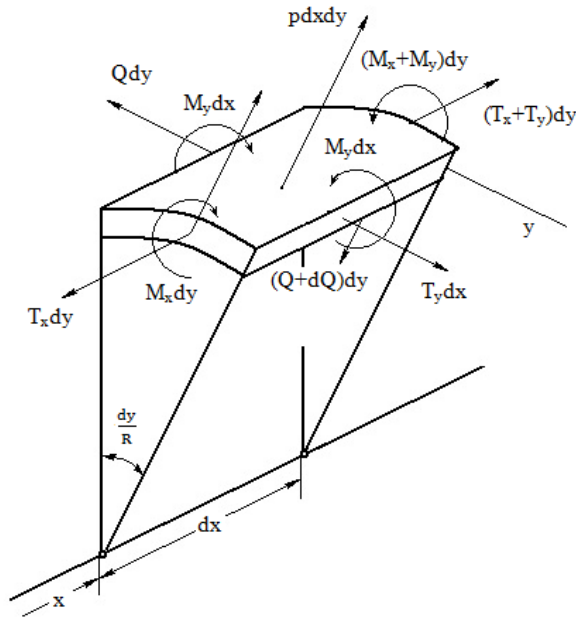


Рис. 2. Элемент оправки под внутренним давлением

Рівняння рівноваги елемента оболонки розміром $h(dx=R_1d\phi, dy=R_2d\phi)$ по осях x, y та z мають вигляд:

$dNR_2\sin\phi d\phi=0; NR_2\sin\phi dx=dMR_2\sin\phi,$
звідки

$$N = \frac{dM}{dx}; -TR_1d\phi-dNR+pR_1d\phi R=0. \quad (16)$$

Співвідношення для радіального переміщення δ та кута нахилу дотичної до утворюючої θ :

$$\frac{d\delta}{dx} = \theta. \quad (17)$$

Повному подовженню елемента оболонки $\epsilon_x = \epsilon_0 + z \frac{d\theta}{dx}$ та подовженню в окружному напрямку $\epsilon_y = \frac{\delta}{R}$ відповідають напруження:

$$\sigma_s = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\epsilon_0 + \mu \frac{\delta}{R} + z \frac{d\theta}{dx} \right), \quad (18)$$

$$\sigma_t = \frac{E}{1-\mu^2} \left(\epsilon_0 + \frac{\delta}{R} + \mu \frac{d\theta}{dx} \right), \quad (19)$$

де ϵ_0 – загальна деформація оболонки.

З формул (17), (18) та (19) виводяться співвідношення для рівнодіючих сил по меридіану та паралелі T та S відповідно, і моментів M та K :

$$T = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\mu\epsilon_0 + \frac{\delta}{R} \right); S = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\epsilon_0 + \mu \frac{\delta}{R} \right), \quad (20)$$

$$M = \frac{Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{d^2\delta}{dx^2}; K = \frac{\mu Eh^3}{12(1-\mu^2)} \frac{d^2\delta}{dx^2}. \quad (21)$$

Виключаючи з рівняння (20) ϵ_0 , а з рівнянь (16) поперечну силу N отримуємо:

$$T = \frac{Eh}{R} \delta + \mu S, \quad \frac{d^2M}{dx^2} = p - \frac{T}{R}. \quad (22)$$

Виключивши з рівнянь (22) T :

$$\frac{d^2M}{dx^2} = p - \frac{Eh}{R^2} \delta - \frac{\mu}{R} S. \quad (23)$$

Продовжуючи перетворення, виключивши згинальний момент M , отримуємо рівняння відносно невідомого переміщення δ :

$$\frac{d^4\delta}{dx^4} + \frac{12(1-\mu^2)\delta}{E^2h^2} = \frac{12(1-\mu^2)p}{Eh^3} - \frac{12(1-\mu^2)S}{Eh^3R}. \quad (24)$$

Рішення рівняння (24) має вигляд:

$$\delta = e^{-kx} (C_1 \sin kx + C_2 \cos kx) + e^{kx} (C_3 \sin kx + C_4 \cos kx) + \delta_0. \quad (25)$$

В рівнянні (25) C_1, C_2, C_3, C_4 – постійні інтегрування, δ_0 – частне рішення рівняння при постійному внутрішньому тиску $p=\text{const}$:

$$\delta_0 = \frac{pR^2}{hE} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right). \quad (26)$$

Таким чином, абсолютне силове переміщення оправки має кінцевий вигляд:

$$\delta_0 = \delta_{00}^c = \frac{pR_{оп}^2}{h_{оп}E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right), \quad (27)$$

де p – тиск матеріалу обичайки на внутрішню поверхню оправки.

При розрахунку конструкцій апаратів високого тиску в інтервалі 10-100 МПа, допустимий тиск приймають рівним $[p] = 0,6\sigma_T$ [7].

Припустимий тиск матеріалу обичайки (АМГ6) для оправлення (СЧ-15) складе $[p] = 122,4$ МПа.

Підставляючи (3), (4), (15), (27) – умова спільності переміщень приймає вигляд:

$$R_{об} (1 + \alpha\Delta T) - \frac{0,736R_{об}^2}{1} \left(\frac{h_{об}}{R_{об}} \right)^{\frac{3}{2}} = R_{оп} (1 + \alpha\Delta T) + \frac{pR_{об}^2}{h_{оп}E} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right) + R_{оп} - R_{об}. \quad (30)$$

Після перетворень одержуємо:

$$R_{оп} = \frac{R_{об}}{(2 + \alpha_{чугун} \Delta T)} \times \left[(2 + \alpha_{алюм} \Delta T) - \frac{0,736 R_{об}}{l_{об}} \left(\frac{h_{об}}{R_{об}} \right)^2 - \frac{P_{алюм} R_{об}}{h_{оп} E_{чавун}} \left(1 - \frac{\mu_{чавун}}{2} \right) \right] \quad (31)$$

Формула (31) є загальним співвідношенням для визначення внутрішнього радіуса оправки у інженерних або дослідницьких розрахунках. Взятши для розрахунку числові значення з таблиці 1 та прийнявши

$$\Delta T = 310^{\circ}C, l_{об} = 1250 \text{ мм},$$

$$h_{об} = 300 \text{ мм}, R_{об} = 2000 \text{ мм},$$

можна визначити внутрішній радіус технологічної оправки для циліндричної обичайки:

$$R_{оп} = 2003 \text{ (мм)}.$$

Таблиця 1

Механіко-фізичні властивості сплаву АМг6 і литого чавуну СЧ-15 [8,9,10]

| Марка сплаву | σ_p , МПа | $E \cdot 10^4$, МПа | α , $10^{-6}/C$ | μ |
|--------------|------------------|----------------------|------------------------|-----------|
| АМг6 | 130-145 | 7,1 | 24,7 | 0,32-0,36 |
| СЧ24 | 220 | 8,5-12 | 10-11 | 0,28-0,29 |

Примітка: σ_p – межа пропорційності;
 σ_B – межа міцності

Величина ΔT визначається, як різниця між температурою у цеху – $20C^0$ та допустимою межею нагрівання – $330C^0$ для спалів типу АМг6, в яких при більш високій температурі нагрівання проходить фазове перетворення, що знижує корозійну стійкість сплаву.

Погонне зусилля, що діє на технічне оправлення циліндричної обичайки в поперечному напрямку отримуємо із співвідношення [11]:

$$N = T \times \cos\theta + S \times \sin\theta. \quad (32)$$

Підставивши (26) у (20) отримуємо погонне зусилля, що діє на технічне оправлення зі сторони циліндричної обичайки в поперечному напрямку отримуємо:

$$T = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\mu\varepsilon_0 + \frac{pR_{оп} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)}{Eh_{об}} \right), \quad (33)$$

$$S = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\varepsilon_0 + \frac{\mu R_{оп} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)}{Eh_{об}} \right). \quad (34)$$

Урахуванням окрім силової взаємодії фактора термічного впливу дає формули [12]:

$$T = \frac{Eh_{об}}{1-\mu^2} \left(\mu\varepsilon_0 + \frac{pR_{оп} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)}{Eh_{об}} \right) + \frac{Eh_{об}}{1-\mu} \alpha \Delta T;$$

$$S = \frac{Eh}{1-\mu^2} \left(\varepsilon_0 + \frac{\mu R_{оп} \left(1 - \frac{\mu}{2} \right)}{Eh_{об}} \right) \times \frac{Eh_{об}}{1-\mu} \alpha \Delta T. \quad (36)$$

Підставляючи знайдений радіус технологічної оправки та

$$\varepsilon_0 = \frac{D_1 - D_2}{D_2} = \frac{4090 - 4054,5}{4054,5} = 0,0088,$$

θ – кут між віссю обертання та нормаллю до оболонки, $\theta=90^0$ у формулу (32) маємо:

$$N_{циліндр.} = T \cos\theta + S \sin\theta = 18,43 \text{ (МН/м)}.$$

Висоту технологічної оправки найбільш доцільно визначити через максимальне термічне подовження при нагріванні алюмінієвої обичайки, тобто:

$$H_{циліндр.опр.} = H_{об} (1 + \alpha \Delta T). \quad (37)$$

Висота технологічної оправки для циліндричної обичайки $H_{об} = 1250$ мм:

$$H_{циліндр.опр.} = 1260 \text{ мм}.$$

Розрахункові формули для розрахунку радіуса у випадку конічної обичайки залишаються незмінними, але розраховується нижній і верхній радіус технологічної оправки за формулою (31) при $R_{об}^{верх} = 1763$ мм, $R_{об}^{нижн.} = 2000$ мм, $l_{об} = 1031$ мм:

$$R_{\text{оп}}^{\text{нижн}} = 2003 \text{ мм},$$

$$R_{\text{оп}}^{\text{верх}} = 1766 \text{ мм}.$$

Погонне зусилля, що діє на технологічну оправку зі сторони конічної обичайки, можна визначити за допомогою формули (32) при $\theta = 15^\circ$:

$$N_{\text{коніч.}} = T \times \cos\theta + S \times \sin\theta = 9,787 \text{ (МН/м)}.$$

Висоту технологічної оправки для конічної обичайки можна визначити підставляючи замість $H_{\text{об}}$ довжину утворюючої конуса, тобто:

$$H_{\text{опр}} = l_{\text{об}} (1 + \alpha \Delta T), \quad (38)$$

$$H_{\text{коніч. опр.}} = 1040 \text{ мм}.$$

Отримані величини добре узгоджуються з результатами подібних розрахунків [4].

В той же час виведені формули більш повно описують процес термомеханічного калібрування для розрахунку радіуса технологічної оправки та мають більш універсальний характер для визначення висоти оправки та зусилля, що діє на неї зі сторони обичайки.

Висновки

На основі аналітичного огляду існуючих методик розрахунку напружено-деформованого стану оболонок під внутрішнім та зовнішнім тиском або при термічно-силовому навантаженні виявлені характерні співвідношення та ключові фактори для розрахунку геометричних та силових параметрів технологічної оправки для процесу термомеханічного калібрування. Загальні положення та рівняння моментної та напівмоментної теорій оболонок після перетворень та урахування особливостей термічного калібрування обичайок зведені в універсальних формулах.

Отримані параметри – зусилля, що діє на оправку (зусилля механічного калібрування), висота та радіус оправки є основними параметрами процесу термомеханічного калібрування та дозволяють забезпечити достатню міру точності обичайки.

Перевагами наведеної методики є велика кількість факторів, що включені до розрахункових формул та застосування різних моделей поведінки оправки та обичайки, що в комплексі забезпечує наближення до реального процесу.

Література

1. Лопаницын, Е.А. О возможности теоретического подтверждения экспериментальных значений внешнего критического давления тонкостенных цилиндрических оболочек [Текст] / Е.А. Лопаницын, Е.А. Матвеев // Прикладная математика и механика. – 2011. – № 5. – С. 830 – 842.
2. Казанцев, В.А. Устойчивость круговых цилиндрических оболочек при совместном действии давления и локальных поверхностных нагрузок [Текст]: автореф. дис. ... канд. техн. наук: 01.02.04 / Казанцев Валерий Анатольевич; Казан. гос. ун-т. – Казань, 1984. – 27 с.
3. Столяров, Н.Н. Оптимизация цилиндрических оболочек при термосиловом нагружении [Текст] / Н.Н. Столяров, Н.И. Дедов // Вест. СамГУ. – 1999. – №2. – С. 120 – 126.
4. Расчетно-аналитическая оценка схем термокалибровки и отжига цилиндрических и конических обечаек головного обтекателя РН «Циклон-4» [Текст]: техн. отчет / УкрНИИТМ; рук. Желтов П.Н., исполн. Фокин А.А. – Днепропетровск, 2007. – 37 с.
5. Балабух, Л.И. Строительная механика ракет [Текст]: учеб. для машиностроительных спец. Вузов / Л.И. Балабух, Н.А. Алфутов. - М.: Высш. шк., 1984. – 391 с.
6. Перельгин, О.А. Оболочки и пластины [Текст]: метод. указания / О.А. Перельгин, С.И. Поникаров, В.А. Булкин; Казанский гос. ун-т. – Казань: Изд-во Каз. ун-та, 2000. – 48 с.
7. Миронов, В.М. Конструирование и расчет элементов химического оборудования [Текст]: учеб. пос. / В.М. Миронов, В.М. Беляев. – Томск, 2003. – 112 с.
8. Мир сварки [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://weldworld.ru/index.php?pid=682> – 1.06.2012 г.
9. Характеристика материала АМгб [Электронный ресурс]. – Режим доступа: http://www.splav.kharkov.com/mat_start.php?name_id=1422. – 1.06.2012 г.
10. Mechanical properties of gray cast iron [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.stainless-steel-tube.org/Mechanical-Properties-of-Gray-Cast-Iron.htm>. - 1.06.2012 г.
11. Справочник по чугуному литью [Текст] / под ред. д-ра техн. наук Н.Г. Гиришвича. – 3-е изд. – Л.: Машиностроение, 1978. – 758 с.
12. Богданович, А.У. НДС конической оболочки для некоторых случаев нагружения и подкреплений [Текст]: моногр. / А.У. Богданович, Л.У. Бахтиева. – Казань, 1984. – 180 с.

Надійшла до редакції 8.06.2012

Рецензент: д-р техн. наук, проф., проф. каф. кафедри технології виробництва А.Ф. Санін, Дніпропетровський національний університет ім. О. Гончара, Дніпропетровськ.

**РАСЧЕТНО-АНАЛИТИЧЕСКОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА
ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО КАЛИБРОВАНИЯ КРУПНОГАБАРИТНЫХ ОБЕЧАЕК
С ВНУТРЕННИМИ ФУНКЦИОНАЛЬНЫМИ ЭЛЕМЕНТАМИ**

Д.Г. Шерстюк, Г.Г. Шерстюк, А.А. Фокин, Е.А. Сошников, А.В. Кулик

Проведен аналитический обзор существующих методик расчета параметров процессов термомеханической обработки. Используя основные положения полубезмоментной и моментной теорий оболочек для крупногабаритных металлических обечаек и технологических оправок, проанализированы напряженно-деформированное состояние в системе обечайка-оправка и теоретико-аналитическим методом установлено универсальные соотношения основных параметров процесса термомеханического калибровки. Полученные параметры - усилия, действующего на оправку (усилие механического калибрования), высота и радиус оправки являются основными параметрами процесса термомеханического калибровки и позволяют обеспечить достаточную степень точности обечайки.

Ключевые слова: термомеханическое калибрование, аналитический метод, ключевые параметры процесса.

**SETTLEMENT AND ANALYTICAL DETERMINATION PROCESS PARAMETERS
OF THE THERMOMECHANICAL CALIBRATION OF LARGE SHELLS
WITH INTERNAL FUNCTIONAL ELEMENTS**

D.G. Sherstyuk, G.G. Sherstyuk, A.A. Fokin, E.A. Soshnikov, A.V. Kulik

An analytical review of existing methods for calculating the parameters of the processes of thermomechanical processing. Using the basic provisions half-membrane and bending theory of shells for large metal shells and technological bars, analyzed the stress-strain state in the shell is mandrel-and theoretical-analytical method established universal relations between the basic parameters of the thermo-mechanical calibration. The obtained parameters - force acting on the mandrel (mechanical force calibration), the height and radius of the mandrel are the main parameters of the thermomechanical process of calibration and allow a sufficient degree of accuracy shell.

Key words: thermomechanical calibration, analytical approach, mathematical modelling, key thermocalibration process parameters.

Шерстюк Дмитро Геннадійович – аспірант каф. технології виробництва, Дніпропетровський національний університет ім. О.Гончара, Дніпропетровськ, Україна, e-mail: SherDG@i.ua.

Шерстюк Геннадій Геннадійович – аспірант каф. фізики електроніки та комп'ютерних систем, Дніпропетровський національний університет ім. О.Гончара, Дніпропетровськ, Україна.

Сошніков Євгеній Анатолійович – начальник сектора, ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ, Україна.

Фокин Анатолий Антонович – науковий секретар, ВАТ «Український науково-дослідний інститут технології машинобудування», Дніпропетровськ, Україна.

Кулик Олексій Володимирович – канд. техн. наук, заступник директора, Національний центр аерокосмічної освіти молоді ім. О. Макарова, Дніпропетровськ, Україна.