

ЕНЕРГЕТИЧНІ ПЕРЕТВОРЕННЯ В МЕМБРАНАХ ВАКУУМНИХ ЗАКУПОРЮВАЛЬНИХ ЗАСОБІВ

Ватренко О. В., д.т.н., професор
Одеський національний технологічний університет, м. Одеса

Анотація. В статті наводиться аналіз станів рівноваги мембран закупорювальних засобів для консервної тари зі скла шляхом дослідження енергетичних перетворень, які забезпечують контроль глибини вакууму в тарі в заданому режимі обробки продукції.

Об'єктом досліджень є скляна упаковка. Предметом досліджень є металеві мембрани. Для визначення геометричних параметрів мембран використовувались інструментальні методи. Наявні форми рівноваги мембран досліджувались шляхом математичного моделювання енергетичним та обчислювальним методами.

Зі зміною зовнішнього навантаження мембрана може змінювати стан стійкої рівноваги. В результаті досліджень встановлено, що після переходу у стан втрати стійкості відповідний прогин мембрани більший як у три рази менше її початкового прогину. Отже деформація втрати стійкості мембрани не призводить до симетричної деформації її робочого конуса. Встановлені параметри прогину сприяють виконанню мембраною функції контролю глибини вакууму в тарі та узгоджуються зі встановленим протидіючим тиском в автоклаві під час термічної обробки продукції.

Потенціальна енергія мембрани відображена сумою енергій внутрішніх та зовнішніх локальних впливів. В результаті розв'язання загального рівняння енергії мембрани отримано розрахункове рівняння потенціальної енергії мембрани

Виконана перевірка адекватності отриманого рівняння роботі реальної мембрани консервної тари під дією навантаження. Перевірка здійснювалася шляхом підставлення отриманого експериментальним шляхом значення додаткового прогину після втрати стійкості у розрахункове рівняння потенціальної енергії мембрани. Зіставлення розрахункової величини тиску втрати стійкості мембран з заявленою виробником кришок показали їхню близькість. Деякі відмінності заявленого значення тиску втрати стійкості від розрахункового пояснюються різною твердістю жерсті для виготовлення кришок.

Отримано розрахункове рівняння повної енергії мембрани. Встановлено, що отримане рівняння є адекватним роботі реальних мембран консервної тари.

Ключові слова: стійкість, прогин, енергія, пластина, тиск, рівновага.

Вступ. Сучасні закупорювальні засоби для скляної тари різних систем закупорювання містять мембрани, які мають малий початковий прогин, і залежно від положення прогину - втягнутого всередину або опуклого – сигналізують про вакуум в незаповненому об'ємі тари або його відсутність і, отже, про її герметичність [1].

Кришки виготовляють із жерсті різної товщини та твердості, тобто. різного енергетичного рівня [2]. Це залежить від об'єму скляної тари та особливостей теплової обробки. У сучасній науці існує кілька методів розрахунку тонких пластин. Вони представлені у роботах [3, 4]. Автори дають розрахунок переважно тонких плоских пластин під дією різних видів навантаження. Однак тонкі пластини з початковим прогином проти дії навантаження, що вивчаються у цій роботі, у зазначених роботах не розглядаються.

Широко відомий та ефективно використовується енергетичний метод розрахунку тонких пластин, представлений багатьма авторами [5, 6, 7]. У статті [8] використовується енергетичний метод для вирішення завдання місцевого згинання тонкостінної циліндричної сталеві труби з еластичним наповненням під дією концентричного осьового навантаження. Завдання розрахунку тонких пластин з початковим прогином проти дії навантаження у цих роботах не відображено.

У роботі Вольміра А. [9] наводиться розрахунок гнучких оболонок, закріплених у різний спосіб при різних, щодо початкового прогину, напрямках дії навантаження. Однак представлена вона у загальному вигляді і не має завершеної розрахункової наукової бази, яка описує та пояснює роботу мембран, у тому числі з урахуванням енергетичної складової матеріалу.

У роботі [10] загальне формулювання Лагранжа для гнучких пластин розглядається методом кінцевих елементів для пластин з великим переміщенням та обертанням. Круглі пластини з малим переміщенням, досліджувані у даній роботі, розглянуті не були.

Щодо металеві упаковки було виконано дослідження роботи мембран вакуумних кришок. У роботі [1] отримано рівняння взаємозв'язку тиску, геометричних параметрів та товщини мембрани. У роботі [11] проведено дослідження стану металевих кришок з мембранами для консервної скляної тари протягом зберігання та обробки упакованої продукції. На базі отриманого розрахункового рівняння було розроблено комп'ю-

терну програму для побудови залежності «тиск – прогин». В залежності від зміни товщини жерсті та прогину мембран побудовані їхні графічні деформаційні характеристики [11]. Однак, зміна повної енергії мембрани в процесі деформування, і насамперед у положеннях рівноваги, не досліджена та потребує вивчення. Внаслідок чого виникають певні труднощі щодо надійності роботи пружної пластини та її проектування.

Мета роботи полягає в тому, щоб описати зміну енергії круглої пластини з початковим прогином, що зумовлює стабільну роботу мембран у заданому режимі.

Завдання роботи.

1. Розв'язати рівняння локальних енергетичних впливів на мембрану в процесі її роботи та отримати розрахункове рівняння повної енергії системи мембрани.

2. Експериментально визначити додатковий прогин мембрани у робочому положенні.

3. Виконати перевірку адекватності одержаного рівняння роботі реальної мембрани металевих кришок для скляної тари.

Матеріали та методи.

Матеріали, що досліджуються. Для експериментальних досліджень використовувалися кришки з «контрольною кнопкою» системи «Твіст-офф» [2] діаметром 82 мм виробництва німецької фірми Silgan White sar, які використовуються на консервних підприємствах країн ЄС та України. Конструктивно мембрани спроектовані для роботи у режимі контрольованої втрати стійкості, рис. 1а. Мембрани мають опорний конус зовнішнім діаметром D_3 , робочий конус зовнішнім діаметром D_2 і пласку ділянку діаметром D_1 . Вони втрачають стійкість внаслідок виникнення вакууму в тарі, що тягне за собою перепад тиску на полі кришки. Будемо називати цей перепад тиску – тиском.

Втративши стійкість мембрана переходить у інший стан стійкої рівноваги, рис. 1б. Значення критичних тисків втрати стійкості та відновлення форми, які складають робочий діапазон функціонування мембран консервної тари, загалом відомі та надаються деякими фірмами-виробниками кришок.

Відповідно, об'єктом дослідження є скляна упаковка із вакуумними кришками. Предметом дослідження – гнучкі мембрани металевих кришок.

Експериментально визначався додатковий прогин центру мембрани у стані втрат стійкості.

Підготовка експериментальних зразків. Підготовка зразків упаковки відбувалася у виробничих умовах. Кришки подавалися в паровакуумну машину для закупорювання, де ними в робочому режимі закупорювались скляні банки з продукцією. Потім продукція охолоджувалась до кімнатної температури для створення вакууму у незаповненому обсязі тари, після чого дослідний зразок був готовий до експерименту.



а) мембрана у ненавантаженому стані; б) мембрана у стані втрати стійкості

Рис. 1 – Поле кришки

Порядок проведення досліджень. Енергетичні можливості круглої мембрани пов'язані з формою її поперечного перерізу. В аналітичному дослідженні форм стану рівноваги мембран дотримуватимемося розрахункової схеми, в якій робочий конус мембрани зашпелений по контуру з вільним зміщенням радіальним точкам контуру, оскільки вона найбільш близька до реальності (рис. 2). Мембрана має початковий прогин $f_{нч}$.

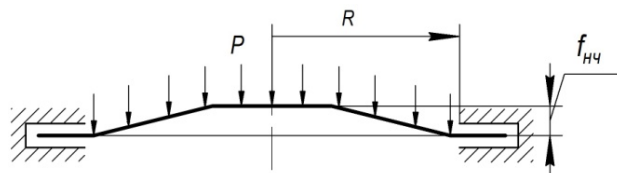


Рис. 2 – Схема закріплення: мембрана у ненавантаженому стані

Вимірювання додаткового прогину центру мембрани у стані втрати стійкості мало таку послідовність дій.

1. Після охолодження продукції, закупорена банка ставилася на контрольну плиту індикаторного приладу, прилад налаштовувався для підготовки до вимірів (див. п. 1-3 нижче).

2. За допомогою гострого шила в полі кришки (не на мембрані) проколювався отвір. Тиск у тарі порівнювався з атмосферним і мембрана стрибкоподібно поверталася до початкового стану рівноваги. При цьому стрілка індикатора відхилялася від нульового положення. Покази індикатора записувалися.

3. Додатковий прогин центру мембрани в стані втрати стійкості f , що відраховується від площини контуру закріплення, рис. 3, визначали як різницю між показаннями індикатора та початковим прогином центру мембрани.

Можливим прогином контуру закріплення мембрани від дії вакууму в тарі нехтували через його незначність у порівнянні з робочим ходом центру мембрани.

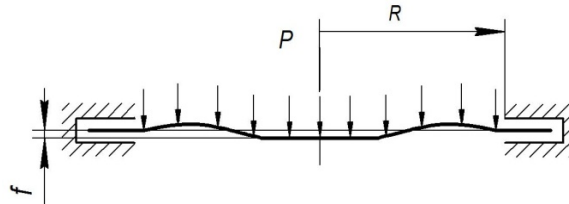


Рис. 3 – Схема закріплення: мембрана у стані втрати стійкості

Опис методів, установок. Додатковий прогин та товщина жерсті мембрани визначалися інструментальними методами на реальній скляній упаковці з кришкою.

Вимір прогину здійснювалося за допомогою індикаторного пристрою рис. 4. Пристрій складається зі штатива для вимірювальних головок 1, закріпленого на горизонтальній контрольній плиті 2 з отворами для упорів, індикатора годинного типу 3, з похибкою 0,01 мм, і двох фіксуючих упорів 4.

Підготовка приладу до вимірювань мала таку послідовність дій.

1. Дослідний зразок ставили дном на контрольну плиту, піднімали вимірювальний шток індикатора, заводили зразок під вимірювальну головку.

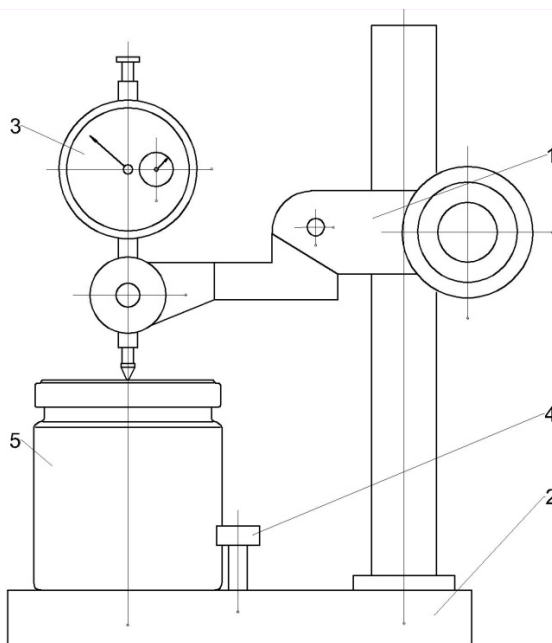
2. Наконечник індикатора приводили в контакт з центром плоскої ділянки мембрани і фіксували розташування тари за допомогою двох фіксуючих упорів, попередньо встановивши їх у відповідні для даних розмірів корпусу тари отвори контрольної плити.

3. Клему затискання індикатора на штативі відпускали, поєднували вимірювальний наконечник індикатора до контакту з центром мембрани кришки так, щоб стрілка на його малій шкалі відхилялася від нуля на ціле число міліметрів, але не менше величини двох початкових прогинів мембрани. Встановлювали індикатор у нульову позначку та фіксували його розташування на штативі.

Оскільки дослідний зразок складається з декількох деталей (банка, кришка, прокладка ущільнювача кришки), які мають власний допуск на висоту, то кожен зразок матиме власну висоту.

Досить сказати, що лише допуск на висоту скляної тари може коливатися в межах 1-3 мм. Тому для кожного вимірювання дослідного зразка слід виконувати індивідуальну підготовку приладу за п. 3.

Опрацювання результатів досліджень. В експерименті використовувалася мембрана параметрами $f_{нч}=0,25$ мм; товщина жерсті $\delta=0,18$ мм; радіус контуру закріплення мембрани $R=12$ мм, виготовлена з маловуглецевої сталі. Результати вимірів показали, що в стані втрати стійкості додатковий



1 – штатив, 2 – контрольна плита, 3 – індикатор годинного типу, 4 – фіксуючі упори, 5 – дослідний зразок.

Рис. 4 – Індикаторний пристрій

прогин центру мембрани склав $f=0,07$ мм, що значно менше початкового прогину центру мембрани $f_{нч}=0,25$ мм, рис. 3. Тобто втрата стійкості не призводить до симетричної деформації робочого конуса мембрани.

Результати та обговорення. Виведення розрахункового рівняння повної енергії системи мембрани. Вихідні рівняння для розрахунку енергії системи використовуємо з теорії пластин та оболонок. Повна енергія мембрани представлена подібно до визначення енергії у випадку вісесиметричного вигину круглої пластинки [9]

$$E_n = E_c + E_\delta - W, \quad (1)$$

де E_c – енергія напружень у серединній поверхні мембрани,

$$E_c = \frac{E\delta}{2} \int_0^R \left[\left(\frac{d^2\Phi}{dr^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{d\Phi}{dr} \right)^2 - \frac{2\mu}{r} \frac{d\Phi}{dr} \frac{d^2\Phi}{dr^2} \right] 2\pi r dr; \quad (2)$$

E_ϵ – енергія вигину,

$$E_\epsilon = \frac{D}{2} \int_0^R \left[\left(\frac{d^2 \omega}{dr^2} \right)^2 + \left(\frac{1}{r} \frac{d\omega}{dr} \right)^2 + \frac{2\mu}{r} \frac{d\omega}{dr} \frac{d^2 \omega}{dr^2} \right] 2\pi r dr; \quad (3)$$

W – робота зовнішнього навантаження,

$$W = \int_0^R P \omega 2\pi r dr = 2\pi P \int_0^R \omega r dr, \quad (4)$$

де δ – товщина жерсті;

R – радіус закріплення мембрани по контуру;

E – модуль нормальної пружності жерсті;

r – поточний радіус мембрани;

μ – коефіцієнт Пуассона жерсті;

Φ – функція напруження;

$D = \frac{E\delta^3}{12(1-\mu^2)}$ – циліндрична жорсткість мембрани;

ω – додатковий поточний прогин мембрани;

P – тиск (навантаження) на мембрану.

Запишемо вираз для $\frac{d\Phi}{dr}$ [9]

$$\frac{d\Phi}{dr} = \frac{Ef^2}{6R} \left(3\frac{r}{R} - 6\frac{r^3}{R^3} + 4\frac{r^5}{R^5} - \frac{r^7}{R^7} \right). \quad (5)$$

Введемо безрозмірний поточний радіус $r_1 = \frac{r}{R}$, тоді $dr = \frac{dr}{R}$; $\frac{d\Phi}{dr} = \frac{1}{R} \frac{d\Phi}{dr_1}$; $\frac{d^2\Phi}{dr^2} = \frac{1}{R^2} \frac{d^2\Phi}{dr_1^2}$.

Після підстановки цих позначень в (5) отримаємо

$$\frac{d\Phi}{dr_1} = \frac{Ef^2}{6} (3r_1 - 6r_1^3 + 4r_1^5 - r_1^7). \quad (6)$$

Відповідно

$$\frac{d^2\Phi}{dr_1^2} = \frac{Ef^2}{6} (3 - 18r_1^2 + 20r_1^4 - 7r_1^6). \quad (7)$$

Запишемо (2) для безрозмірного поточного радіусу r_1 , враховуючи, що за $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а за $r=R \rightarrow r_1=1$, та після перетворень отримаємо

$$E_\epsilon = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36R^2} \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dR}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_1} R^2(r_1) - 2\mu R(r_1) \frac{dR}{dr_1} \right] dr_1. \quad (8)$$

Позначимо інтегральну частину рівняння (8)

$$I_1 = \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dR}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_1} R^2(r_1) - 2\mu R(r_1) \frac{dR}{dr_1} \right] dr_1.$$

Тоді рівняння енергії напружень у серединній поверхні мембрани

$$E_\epsilon = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36R^2} I_1. \quad (9)$$

Розглянемо рівняння (3) енергії вигину E_ϵ .

У разі пружної деформації пластини, наближений вираз для додаткових прогинів відповідає рішенням аналогічного завдання у випадку пластини малого прогину,

$$\omega = f \left(1 - \frac{r^2}{R^2} \right)^2. \quad (10)$$

Запишемо (10) для безрозмірного поточного радіусу r_1

$$\omega = f (1 - r_1^2)^2 = f (1 - 2r_1^2 + r_1^4), \quad (11)$$

$$\frac{d\omega}{dr_1} = 4f r_1 (r_1^2 - 1). \quad (12)$$

Запишемо (3) для безрозмірного поточного радіусу r_1 , враховуючи, що за $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а за $r=R \rightarrow r_1=1$, та після перетворень отримаємо

$$E_s = \frac{16f^2\pi D}{R^2} \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dW_1}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_{1r}} W_1^2(r_1) + 2\mu W_1(r_1) \frac{dW_1}{dr_1} \right] dr_1. \quad (13)$$

Позначимо інтегральну частину рівняння (13)

$$I_2 = \int_0^1 \left[r_1 \left(\frac{dW_1}{dr_1} \right)^2 + \frac{1}{r_{1r}} W_1^2(r_1) + 2\mu W_1(r_1) \frac{dW_1}{dr_1} \right] dr_1.$$

Тоді рівняння енергії вигину

$$E_s = \frac{16f^2\pi D}{R^2} I_2. \quad (14)$$

Розглянемо рівняння (4) роботи зовнішнього навантаження W .

Запишемо (4) для безрозмірного поточного радіуса r_1 , враховуючи, що при $r=0 \rightarrow r_1 \rightarrow 0$, а при $r=R \rightarrow r_1=1$, і після підстановки (11) і перетворень

$$W = 2\pi P f R^2 \int_0^1 (r_1 - 2r_1^3 + r_1^5) dr_1. \quad (15)$$

Тоді після інтегрування рівняння роботи зовнішнього навантаження

$$W = \frac{\pi P f R^2}{3}. \quad (16)$$

Після підстановки (9), (14) і (16) рівняння (1)

$$E_n = \frac{\pi E^3 f^4 \delta}{36 R^2} I_1 + \frac{16 f^2 \pi D}{R^2} I_2 - \frac{\pi P f R^2}{3}. \quad (17)$$

Введемо безрозмірний додатковий прогин центру мембрани $\zeta = \frac{f}{\delta}$ та безрозмірний тиск (навантаження)

$P^* = \frac{P R^4}{\delta^4 E}$. Після підстановки цих позначень у (17) і перетворень отримаємо

$$E_n = \frac{\pi}{R^2} \left[E \delta^5 \frac{\zeta^4}{36} I_1 + 16 \delta^2 D \zeta^2 I_2 - E \delta^5 \frac{\zeta P^*}{3} \right]. \quad (18)$$

Визначаємо інтеграли I_1 та I_2 . Коефіцієнт Пуассон для сталі $\mu=0,35$.

Інтегруючи I_1 отримуємо

$$I_1 = 48,8167 + 1,7047 + 1,4 = 51,9214.$$

Інтегруючи I_2 отримуємо

$$I_2 = 0,5 + 0,1667 + 0 = 0,6667.$$

Введемо безрозмірну повну енергію

$$E_n^* = \frac{E_n R^2}{E \delta^5}. \quad (19)$$

Після підстановки (18) у (19) та розрахунку отримуємо

$$E_n^* = 1,4423 \zeta^4 + 1,013 \zeta^2 - 0,3333 P^* \zeta. \quad (20)$$

Зведемо рівняння (20) до форми рівняння рівноваги, продиференціюємо його по $d\zeta$ і прирівняємо до 0. В результаті отримаємо

$$\zeta^3 + 0,3512 \zeta - 0,0578 P^* = 0. \quad (21)$$

Аналіз та перевірка коректності отриманого рівняння рівноваги. Підставивши експериментально отримане значення f після втрати стійкості в рівняння рівноваги (21), можна отримати відповідну величину критичного тиску.

При значенні $f=0,07$ мм відповідний безрозмірний прогин складе $\zeta=0,39$. Виразивши з (21) P^* отримаємо

$$P^* = \frac{\zeta^3 + 0,3512 \zeta}{0,0578},$$

звідки, для даного випадку, отримуємо $P_1^* = 3,3958$. Відповідно P_1 знаходимо з

$$P = \frac{P^* \delta^4 E}{R^4},$$

звідки, для випадку, що розглядається, отримуємо $P_1 = 0,0326 \cdot 10^6$ Па.

Отримана в результаті розрахунку величина P_1 близька до величини тиску втрати стійкості мембран $P_1=0,03$ МПа, що наводиться виробником кришок [12]. На відхилення розрахункової величини тиску P_1 від експериментальної може впливати ступінь твердості жерсті, з якої виготовлена кришка з мембраною.

Після втрати стійкості мембрана переходить в положення стійкої рівноваги. Результати вимірювання показали, що в стані втрати стійкості додатковий прогин центру мембрани $f=0,07$ мм значно менше початкового прогину центру мембрани $f_{nc}=0,25$ мм, рис. 3. Отже деформація втрати стійкості мембрани не призводить до симетричної деформації її робочого конуса.

Встановлені параметри прогину сприяють виконанню мембраною функції контролю глибини вакууму в тарі та узгоджуються зі встановленим протидіючим тиском в автоклаві під час термічної обробки продукції. Небезпечним значенням P_l прийнято вважати більше 0,07 МПа. Тоді під час стерилізації (етап витримки або початку охолодження) може статися порушення функціонування контрольної кнопки, пов'язане з переходом пружної деформації металу пластичну.

Ступінь твердості жерсті збільшують для підвищення її жорсткості. Шляхом підвищення жорсткості компенсують зниження міцності жерсті, що неминуче виникає у разі зниження товщини сталевих прокату. У діапазоні товщини жерсті, що використовується для кришок, діапазон зміни твердості постійний і вузький.

Висновки.

1. Рівняння (21), отримане в результаті розв'язання рівнянь окремих енергетичних впливів, є розрахунковим рівнянням, що характеризує і представляє енергетичні перетворення в тілі мембрани.
2. Експериментально визначено, що додатковий прогин мембрани в робочому положенні значно менше її початкового прогину.
3. Наведений розрахунок показує адекватність отриманого розрахункового рівняння роботі реальної металевієї пластини з початковим прогином, у разі дії навантаження проти початкового прогину, зокрема для мембран металевих кришок скляної консервної тари.
4. Отримала розвиток розрахункова модель контрольованої втрати стійкості круглої пружної пластини.

References

1. Vatenko O.V. (2014). Membrany kryshok konservnoi sklianoi tary (obgruntuvannya yikh roboty) [Membranes of lids of canned glass containers (reasoning for their operation)]. *Packaging*, 6, 26-29.
2. Schiester S. (2018), A new twist, *Compact steel*, 01, 22.
3. Ugural A. (2018). *Plates and shells: theory and analysis, fourth edition*, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis group
4. Szilard R. (2004). *Theories and application of plate analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods*, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken.
5. Reddy J. (2007). *Theory and analysis of elastic plates and shells, second edition*, London, New York: CRC Press, Taylor & Francis group
6. Ventsel E., Krauthammer T. (2001). *Thin plates and shells: Theory, analysis and applications*, New York, Basel: Marcel Dekker, Inc.
7. Ugural A., Fenster S. (2012). *Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity* (5th ed.). NJ: Prentice-hall, Upper Saddle River.
8. Bradford M., Roufegarinejad A., Vrcelj Z. (2006). Elastic buckling of thin-walled circular tubes containing an elastic infill, *International Journal of Structural Stability and Dynamics*, 6 (4), 457–474.
9. Vol'mir, A.S. (1956). *Gibkiye plastinki i obolochki* [Flexible plates and shells]. M.: Izd-vo tekhniko-teoreticheskoy lit.
10. Frank Pai P. (2007) Total-Lagrangian Formulation and Finite-Element Analysis of Highly Flexible Plates and Shells. *Mathematics and Mechanics of Solids*, 12 (2), 213-250
11. Ватренко О.В. (2015). Modeliuvannya roboty membran vakuumnykh kryshok: prohyn [Modeling the operation of vacuum lid membranes: deflection]. *Scientific Works*, 48, 150-154.
12. Rukovodstvo po obrabotke kryshek Twist-off [Instructions for processing Twist-off caps] (2006). Hannover: Silgan White Cap

ENERGY TRANSFORMATIONS IN THE MEMBRANES OF VACUUM SEALING MEANS

Vatrenko O. V., SciD, professor
Odesa National University of Technology, Odesa, Ukraine

Abstract. This article exposes an analysis of the membranes' equilibrium states at sealing means for glass made canning containers through the study of energy transformations that provide control of the vacuum depth in the container under a given product processing mode.

This research object is glass container packaging. The metal membranes are subject of this research. Instrumental methods were used to determine the membranes' geometric parameters. Existing forms of membrane'

equilibrium were studied by means of mathematical modeling using energy and computational methods.

While the external load changing, the membrane can change its state of stable equilibrium. As a result of study carried out, it was established that after the transition to the state of stability loss, the corresponding deflection of the membrane is more than three times less than its initial deflection. Therefore, the deformation at the loss of membrane stability never leads to a symmetrical deformation of its working cone. The set parameters of deflection contribute to the membrane's function of controlling the vacuum depth in the container and are consistent with the set opposing pressure in the autoclave during the canned products heat treatment.

The membrane potential energy is reflected by the sum of the internal and external local influences' energies. At the issue of solving the general membrane energy equation, there was obtained the calculation equation of the membrane potential energy.

The obtained equation adequacy to the operation of a real membrane at a canned food container under the action of load was verified. The result verification was carried out by substituting the experimentally obtained value of the additional deflection after the stability loss into the membrane potential energy calculation equation. A comparison of the estimated value of the pressure of the membranes stability loss with the value declared by the container lids manufacturer showed their closeness. Some difference between the declared value of the stability loss pressure and the calculated one is explained by the different hardness of tin used for making lids.

The calculated equation of the membrane total energy was obtained. It is established that this resulting equation is adequate for the operation of real canning container membranes.

Key words: stability, energy, plate, deflection, pressure, equilibrium.

Список використаної літератури

1. Ватренко О. В. Мембрани кришок консервної скляної тари (обґрунтування їх роботи) // Упаковка. 2014. № 6. С. 26-29.
2. Szilard R. A new twist // Compact steel. 2018. № 01. P. 22.
3. Ugural A., Plates and shells: theory and analysis, fourth edition, CRC Press, Taylor & Francis group, London, New York. 2018.
4. Szilard R., Theories and application of plate analysis: Classical, Numerical and Engineering Methods, John Wiley & Sons, Inc. Hoboken .2004.
5. Reddy J., Theory and analysis of elastic plates and shells, second edition, CRC Press, Taylor & Francis group, London, New York. 2007.
6. Ventsel E., Krauthammer T., Thin plates and shells: Theory, analysis and applications, Marcel Dekker, Inc., New York, Basel. 2001.
7. Ugural A., Fenster S., Advanced Mechanics of Materials and Applied Elasticity, 5th ed. Prentice-hall, Upper Saddle River, NJ. 2012.
8. Bradford M., Roufegarinejad A., Vrcelj Z., Elastic buckling of thin-walled circular tubes containing an elastic infill, // International Journal of Structural Stability and Dynamics, 2006. Vol. 6, No. 4, pp. 457–474.
9. Вольмир, А.С. Гибкие пластинки и оболочки / А.С. Вольмир. – М.: Изд-во технико-теоретической лит., 1956. – 419с
10. Frank Pai P. (April 2007) Total-Lagrangian Formulation and Finite-Element Analysis of Highly Flexible Plates and Shells. Mathematics and Mechanics of Solids, vol. 12, no. 2, pp. 213-250.
11. Ватренко О.В. Моделювання роботи мембран вакуумних кришок: прогин, товщина / О.В. Ватренко // Наук. праці ОНАХТ. – 2015. – Вип. 48. – С. 150-154.
12. Руководство по обработке крышек Твист-офф / Silgan White Cap, 2006, Hannover.

Отримано в редакцію 21.06.2023

Прийнято до друку 27.11.2023

Received 21.06.2023

Approved 27.11.2023