

СТВОРЕННЯ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ КОНСТРУКЦІЙ ПЕРЕТВОРЮВАНОВОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

Обґрунтовано оптимальний тип базової поверхні конструкції перетворюваного об'єму (КПО) та створено математичну модель її перетворення до компактної форми. Визначено оптимальні геометричні параметри КПО конічного типу. Виконано моделювання характеру розподілу напружень в оболонці конструкції на послідовних стадіях перетворення та дослідження кінетики процесу розкриття тонкостінних конічних КПО. Визначено критерії якості нероз'ємних з'єднань перетворюваних тонкостінних металевих оболонок, створено технологічне обладнання для їхнього виготовлення та лабораторні зразки для випробовувань.

Ключові слова: конструкції перетворюваного об'єму, несні оболонки, розгорті космічні конструкції.

ВСТУП

Сучасний стан розвитку перетворюваних оболонкових конструкцій у світовій космічній техніці характеризується пошуком рішень, здатних забезпечити достатню жорсткість трансформованих оболонок у робочому стані та надати їм несучі властивості, уникнувши додаткових витрат енергії в умовах космічного простору [4]. Актуальність досліджень обумовлена необхідністю створення конструкцій перетворюваного об'єму (КПО) із жорсткою металевою оболонкою, здатних до перетворень у компактний стан без локальної втрати стійкості матеріалу поверхні та зворотної трансформації і подальшої довготривалої експозиції в умовах дії факторів космічного простору (ФКП). При виконанні роботи була поставлена задача пошуку типу несучої КПО, оптимальної для використання у космічній техніці, створення розрахункової моделі, що дозволяє визначити геометричні та технологічні

параметри широкого спектру КПО стосовно до умов експлуатації у відкритому космосі, а також створення та дослідження лабораторних зразків оболонок згідно отриманих розрахункових залежностей.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІЗОМЕТРИЧНОГО ПЕРЕТВОРЕННЯ КПО КОНІЧНОГО ТИПУ

Теоретична модель оборотної формозміни КПО припускає об'ємні деформації тонких оболонок, які відбуваються при практичній відсутності розтягування або стиснення матеріалу, тобто близькі до ізометричних перетворень. Найбільш перспективними з точки зору надійності, ефективності використання робочого простору і простоти виготовлення є конструкції на основі лінійчатих поверхонь нульової гауссової кривизни, які можуть бути «розгорнуті у площину» шляхом перетворень, досить близьких до ізометричних. Розроблені в ІЕЗ технології дозволяють здійснювати подібне перетворення конструкцій з реальних матеріалів (листового металу), замінюючи бічну поверхню конуса локально ізо-

тричною поверхнею, що утворюється кільцевими складками [3].

Розроблений у ході виконання роботи процес створення КПО конічного типу підпорядкований простому алгоритму, перший крок якого включає власне проектування конструкції і її міцнісний розрахунок, що враховує реальні умови експлуатації. Далі моделюється ізометричне перетворення одиничного елемента (кільцевого гофра) нейтральної поверхні оболонки, при якому рух обраного сегмента може бути описано одним рівнянням деформації [1], що допускає обробку чисельними методами. Зображення нейтральної поверхні оболонки у тривимірному просторі може бути отримане, зокрема, обертанням графіка функції $f = (x - a)^3$. Із використанням параметра t ($0 \leq t \leq 1 + \varepsilon$, де $\varepsilon \geq 0$) деформацію функції f можна подати послідовністю відображень, наведених на рис. 1. При $t = 0$ відповідна поверхня обертання Z_1 є прямим круговим конусом (рис. 1, а), твірна якого при зростанні t ($0 \leq t \leq 1$), послідовно вигинається відповідно до деформації твірної металевої конічної оболонки у процесі технологічного перетворення (рис. 1, б). При $t = 1$ поверхня Z є поверхнею, що отримана обертанням кубічної параболи $y = (x - a)^3$ навколо осі Oy (рис. 1, в). Відповідно при $t = 1 + \varepsilon$ ($\varepsilon > 0$) поверхня обертання Z_2 задається як графік функції, графічне зображення якої наведене на (рис. 1, г). Побудова графічних зображень виконувалася за допомогою системи Wolfram Mathematica®.

Отримана математична модель враховує особливості ізометричного перетворення поверхонь обертання, дозволяє визначити основні геометричні параметри нейтральної поверхні у будь-

який момент її перетворення (руху) і є основою для побудови динамічної скінченно-елементної моделі елементів перетворюваної конструкції (рис. 2, 3), що враховують властивості реального матеріалу оболонки.

ОПТИМІЗАЦІЯ ГЕОМЕТРИЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАНОВОГО ОБ'ЄМУ

Оптимальні геометричні характеристики КПО було визначено шляхом пошуку найбільш вигідного співвідношення стійкості оболонки та її компактності, або коефіцієнта трансформації K_T при мінімально можливій масі. Так, в конічних КПО зменшення кута конусності (α) і наближення секцій конструкції до конфігурації циліндра, найбільш вигідної з точки зору стійкості до впливу невісесиметричних навантажень, призводить до зниження коефіцієнта трансформації K_T . Протилежний підхід істотно знижує просторову жорсткість конструкції, але дозволяє підвищити K_T і спростити процес компактного складання.

Розрахунок напружено-деформованого стану та стійкості конструкції проводився з використанням методу скінченних елементів (МСЕ), реалізованого за допомогою універсальних програмних систем скінченно-елементного аналізу. Результати розрахунку максимальних відхилень вільного кінця проектованої довгомірної КПО з 31 конічної секції та ізополів еквівалентних напружень при впливі на неї комбінації лінійних ($a_x = +12 \text{ м/с}^2$, $a_y = +12 \text{ м/с}^2$, $a_z = +9 \text{ м/с}^2$) та кутових ($\varepsilon_x = +1.4 \text{ рад/с}^2$, $\varepsilon_y = +1.4 \text{ рад/с}^2$, $\varepsilon_z = +0.4 \text{ рад/с}^2$) прискорень її центра мас у напрямку та навколо осей Ox , Oy , Oz дозволяють зробити висновок про оптимальність кута ко-

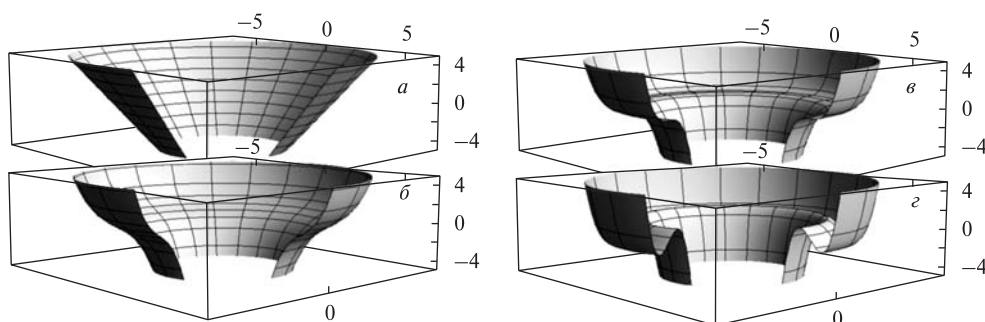


Рис. 1. Неперервні відображення нейтральної поверхні конічної оболонки, відповідні до стадій об'ємного деформування одиничної кільцевої складки

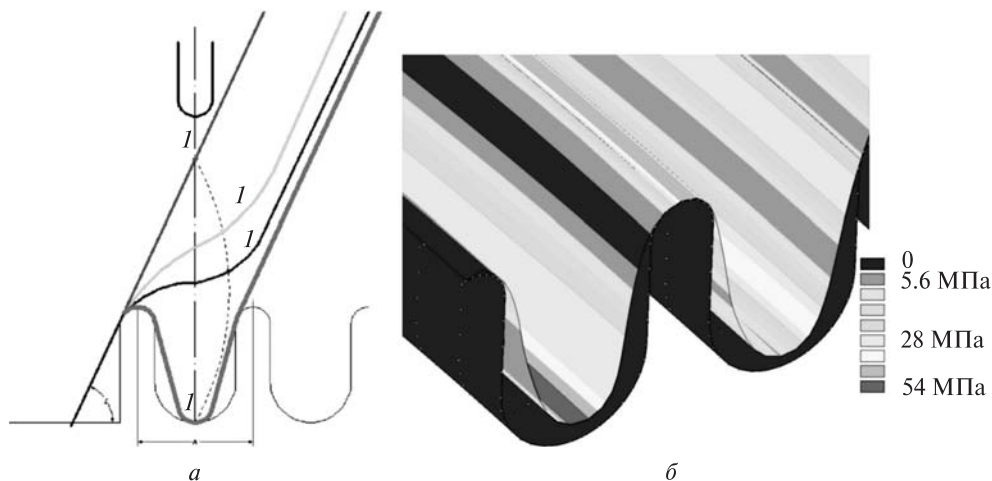


Рис. 2. Визначення траєкторії руху фіксованих точок поверхні і контактних ділянок формуючого інструменту (а) та динамічна скінченно-елементна модель утворення послідовних складок (гофрів) перетворюваної конструкції з урахуванням властивостей реального матеріалу оболонки (б)

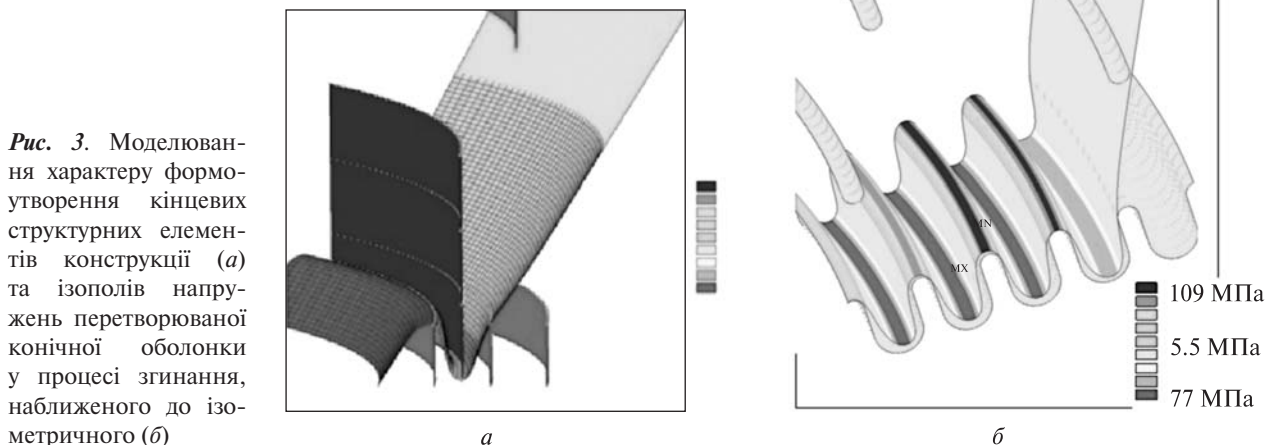


Рис. 3. Моделювання характеру формоутворення кінцевих структурних елементів конструкції (а) та ізополів напружень перетворюваної кінцевої оболонки у процесі згинання, наближеного до ізометричного (б)

нунності елементів конструкції, що дорівнює $\alpha = 25^\circ$. У даному випадку максимальні значення еквівалентних напружень у матеріалі оболонки дорівнюють $\sigma_{\text{екв макс}} = 161$ МПа і є значно меншими від значень межі плинності для досліджуваного матеріалу (аустенітна сталь, $\sigma_{0.2} = 266$ МПа), отриманих експериментальним шляхом. Величини та орієнтація розрахункових прискорень відповідають вимогам до створення та обслуговування наукової апаратури, що розміщується на зовнішній поверхні МКС. Очевидно, що просторова жорсткість КПО даного типу при незмінному куті конусності її секцій може бути істотно збільшена шляхом використання конструкційних матеріалів більшої товщини або зміною висоти і кількості) самих секцій. І у першо-

му, і у другому випадку компактність конструкції знижується, а її відносна маса збільшується, що не відповідає базовій концепції створення багатосекційної КПО кінцевого типу.

При дослідженні процесу формоутворення кінцевих перетворюваних поверхонь оболонкової КПО проведено визначення траєкторії руху фіксованих точок поверхні і відповідних контактних ділянок формувального інструменту (рис. 2, а) та побудовано динамічну скінченно-елементну модель утворення послідовних складок (гофрів) перетворюваної конструкції з урахуванням властивостей реального матеріалу оболонки (рис. 2, б). Мета дослідження полягала у знаходженні оптимальної схеми переміщення формувального інструменту (ротаційного

пуансона), яка дозволяє реалізувати процес об'ємного деформування вихідної конічної оболонки із максимальним наближенням до схеми ізометричного перетворення. Критерієм наближення обрано мінімізацію залишкових напружень та переміщень в конічних оболонках після завершення процесу деформування. Одночасно було проведено оцінювання впливу пружно-пластичних властивостей конструкційних матеріалів КПО на характер формоутворення кінцевих структурних елементів конструкції (рис. 3, а) та проведено аналіз ізополів напружень та переміщень конічної оболонки, перетворюваної у плоский диск, у процесі формоутворення (рис. 3, б). Результати дослідження дозволили скоригувати вихідну геометричну модель, отриману шляхом моделювання ізометричного перетворення нейтральної поверхні оболонки, а також провести прогнозування локальної втрати стійкості оболонки КПО. Задача вирішувалась з урахуванням фізичної нелінійності поведінки матеріалу. Використані для визначення розрахункових даних діаграми розтягнення (деформації) досліджуваного матеріалу були отримані експериментальним шляхом за допомогою випробувальної системи MTS® 318.25.

ВИЗНАЧЕННЯ КРИТЕРІЇВ ЯКОСТІ ТА СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ НЕРОЗ'ЄМНИХ З'ЄДНАНЬ ТОНКОСТІННИХ ПЕРЕТВОРЮВАНИХ МЕТАЛЕВИХ ОБОЛОНОК

Однією з основних проблем при створенні оболонок КПО є досягнення поєднання високих фізико-механічних характеристик при одночасній вакуум-щільності зварних швів, які піддаються комплексу впливів механічних навантажень і специфічних агресивних зовнішніх факторів. Метою проведених досліджень було визначення оптимальних умов формування нероз'ємних з'єднань тонких перетворюваних сталевих оболонок КПО, здатних забезпечити службові характеристики конструкції в екстремальних умовах експлуатації.

Схема ізометричного перетворення оболонки, описувана сімейством неперервних відображень її нейтральної поверхні (рис. 1), потребує ізотропності конструкційного матеріалу остан-



Рис. 4. Мікроплазмове зварювання тонкостінного елемента 1 (секції) конструкції перетвореного об'єму на складально-зварювальному пристосуванні 2

ньої; отже, зварний шов повинен мати практично еквівалентні з основним металом конструкції фізико-механічні властивості. Таким чином, головна технологічна задача полягає у створенні якісного вакуум-щільного зварного з'єднання із заданими характеристиками пластичності і міцності.

При створенні КПО космічного призначення з метою зниження маси використовуються мінімальні товщини конструкційних матеріалів оболонки, при яких може бути забезпечена необхідна міцність конструкції без втрати її функціональних властивостей. При виборі способу зварювання стикових з'єднань з нержавіючої сталі з товщиною $\delta = 0.1 \dots 0.175$ мм перевагу було віддано мікроплазмовому зварюванню [2]. Цей метод дозволив значно спростити підготовку торців розгортки конічної заготовки під зварювання, збільшивши тим самим продуктивність виготовлення КПО, і зменшити теплові деформації зварного шва при використанні попереднього відбортування зварюваних крайок. При зварюванні заготовок з нержавіючої сталі було застосовано відбортування крайок на величину, рівну двом товщинам матеріалу. Крім того, мікроплазмове зварювання дозволило забезпечити

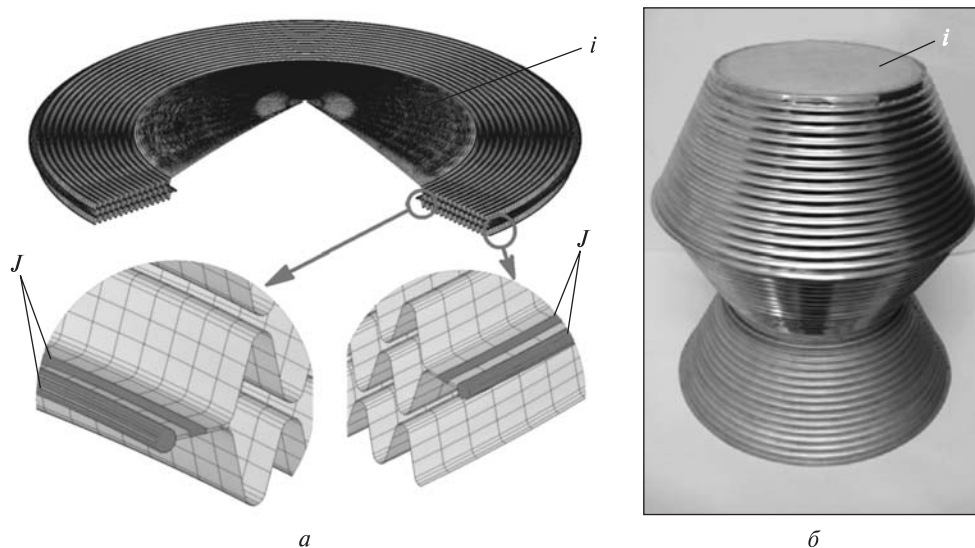


Рис. 5. Модель конічної конструкції перетворюваного об'єму з трьох гофрованих дисків (а) та лабораторний зразок даної КПО у розкритому стані (б): *J* — модель сегментів конструкції із внутрішнім та зовнішнім кільцевими зварними з'єднаннями, *i* — замикальний елемент

практично повну відтворюваність зафіксованого результату, що можна пояснити менш жорсткими, порівняно з лазерним зварюванням, вимогами до точності механізму переміщення джерела нагрівання.

Визначення оптимальних параметрів зварювального процесу та подальше виготовлення тонкостінних елементів *I* (секцій) КПО (рис. 4) виконувалося на спеціально спроектованому складально-зварювальному пристосуванні 2, що забезпечує жорстку фіксацію крамок конічних заготовок з фольги на довжині в кілька десятків сантиметрів за відсутності зварювальних деплацій, ефективного відведення тепла від зони шва і максимальну простоту складальної операції. Захист кореня шва з його одночасним примусово-конвективним охолодженням досягався нагнітанням інертного газу через серію послідовних отворів змінного перерізу в захисному каналі, сполученим з колектором. Глибина, перетин і конфігурація отворів, а також чистота обробки їхніх крамок дозволяють досягти на всій протяжності кореня шва практично ламінарного витікання з повним розкриттям струменів і з рівними швидкостями потоку для захисних газів різної щільності при їхній витраті в діапазоні 5...10 дм³/хв. При заданому значенні струму *I* і коефіцієнта заповнення (duty cycle) *D*, коректування погонної енергії Q_l на різних частотах *f* імпульсного струму забезпечувалося зміною

об'ємних витрат плазмоутворюючого і захисного газів при їхньому незмінному оптимальному співвідношенні, отриманому для обраних параметрів плазмотрона емпіричним шляхом і рівному 0.32 при використанні аргону. Обмеження частоти імпульсного струму значенням $f = 200$ Гц пов'язано з необхідністю пошуку оптимальних критеріїв якості з'єднань в діапазоні параметрів джерела, що не викликають швидкого зносу електрода і камери плазмоутворення плазмотрона і, як наслідок, порушення стаціонарного режиму зварювання.

Первинна якість отриманих з'єднань підтверджувалася капілярним і вихрострумовим методами неруйнівного контролю; після вибіркового випробування з'єднань на багаторазовий вигин і статичний розтяг, проводився аналіз їхньої структурної неоднорідності, хімічної неоднорідності методом мікрорентгеноспектрального аналізу, а також мікротвердості металу зварного шва, зони сплавлення і основного металу оболонки. У всіх випадках критерієм якості була практична еквівалентність відхилень досліджуваних характеристик в конструкційному матеріалі, нероз'ємному з'єднанні, а також у їхніх перехідних зонах. На заключній стадії визначення якості зварних з'єднань проводилися дослідження їхньої тонкої структури, основані на уявленні про визначальний вплив структурно-фазового стану металу на його фізико-механічні властивості.

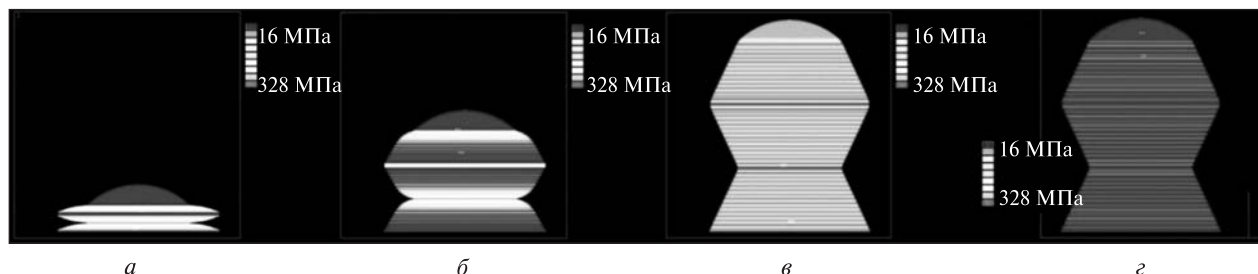


Рис. 6. Результати моделювання ізополів напружень в оболонці конструкції, аналогічній зображеній на рис. 5, б, у процесі розкриття

Результати роботи дозволяють зробити висновок про можливість поєднання критеріїв якості розглянутих нероз'ємних з'єднань у діапазоні параметрів зварювального процесу, відповідних до частот імпульсного струму зварювання $f_{PC} = 100 \dots 200$ Гц.

Після підтвердження якості зварних з'єднань тонкостінним елементам (секціям) КПО шляхом ізометричного перетворення аналогічно моделі, наведеній на рис. 3 надається форма плаского гофрованого диску. Відповідно, вакуум-щільні з'єднання дисків по контурах більшої та меншої основ дозволяють отримати довгомірну перетворювану конструкцію із заданими розрахунковими параметрами. Рішення задачі стійкості багатосекційної КПО космічного призначення і розрахункова оцінка її деформативності дозволили визначити вимоги до конфігурації і жорсткості зварних з'єднувальних елементів кінцевих секцій, особливо елементів меншого діаметра, що піддані найбільшим питомим навантаженням. Функціональне призначення кільцевих зварних з'єднань не обмежується підтримкою цілісності, механічної міцності і вакуум-щільності багатосекційної довгомірної конструкції; необхідні демпфуючі властивості останньої можуть бути забезпечені особливостями профілю кінцевих поверхонь КПО в поєднанні з жорсткістю кільцевих з'єднувальних елементів. Зварювання кінцевих секцій по периметрах основ об'єднує їхні суміжні фланцеві відбортуння в єдиний елемент жорсткості — кільцевий шпангоут, ефективність якого залежить більшою мірою від ширини кільця, а не від його сумарної товщини, а також від характеру зварного з'єднання.

Зокрема, в розглянутій КПО при зварюванні відбортуння меншого діаметру з розрахунковою шириною 6 мм необхідний результат може бути досягнутий застосуванням комбінованого шва — прорізного з фіксацією осі плазмотрона по нормалі до площини фланця, а потім торцевого, при орієнтації осі плазмотрона по лінії радіуса плаского гофрованого диску. Схема об'єднання відбортуння у шпангоути в лабораторному зразку, що складається з трьох гофрованих дисків, показана на рис. 5. Наведені моделі сегментів ілюструють схему виконання зварних з'єднань, що дозволяє зв'язати периметри кінцевих секцій в жорсткий кільцевий елемент конструкції. Вакуум-щільні з'єднання торцевої кінцевої секції з замикальним елементом (денцем) (рис. 5, і), що має товщину матеріалу $\Delta = 6 \dots 8 \delta$, де δ — товщина матеріалу оболонки конструкції, реалізуються попереднім зварюванням периметру секції з кільцем проміжної товщини $\delta_1 = (\Delta + \delta)/2$.

Кільцеві зварні з'єднання кінцевої КПО, на відміну від прямолінійних швів конструкції, не зазнають значних технологічних і експлуатаційних деформацій і мають незначні навантаження від внутрішнього надлишкового тиску розкриття, що не перевищує величини 50 кПа. З'єднання можуть бути виконані мікроплазмовим методом в імпульсному режимі за умови коригування схеми подачі захисного газу для торцевих швів.

Для оцінки функціональних якостей КПО і коригування розрахункової конфігурації шпангоутів було проведено динамічне моделювання ізополів напружень у оболонці конструкції у процесі розкриття (рис. 6). Поданий на рис. 6 результат моделювання ілюструє зріст напружень

(а, б) у оболонці КПО до стадії, що передує стану повного розкриття (рис. 6, в); максимальні величини еквівалентних напружень ($S_{\text{екв}} = 328$ МПа) досягаються на ділянках сполучення конічних секцій конструкції (шпангоутах). За умови повного розкриття КПО (рис. 6, г) відмічено перерозподіл напружень та зниження їхнього рівня до значень $S_{\text{екв.мах}} = 42$ МПа. Після зняття навантаження від внутрішнього тиску розкриття величини напружень не перевищують значень $S_{\text{екв.мах}} = 16$ МПа.

Початкові експерименти зі зварювання зразків сталевих фольг марки 12Х18Н10Т дозволяють зробити висновок про технологічну можливість створення вакуум-щільних тонких перетворюваних оболонок, відповідних до умов поєднання обраних критеріїв якості, із практичною відсутністю дефектів, та можливість подальшого переходу до етапу виготовлення дослідних та натурних зразків багатосекційної КПО.

ВИСНОВКИ

У роботі досліджено залежності параметрів перетворення та створено математичну модель процесу трансформації довгомірної оболонкової конструкції космічного призначення. Виконане динамічне моделювання розподілу напружень в оболонці конструкції в процесі перетворення до компактного стану, яке дозволяє прогнозувати локальну втрату стійкості оболонки КПО у стані розкриття. Отримані лабораторні зразки нероз'ємних з'єднань на аустенітних сталях фольгового класу та визначені оптимальні співвідношення параметрів дискретного вводу зварювального тепла, здатні забезпечити практичну еквівалентність відхилень характеристик якості, пластичності та міцності в конструкційному матеріалі, нероз'ємному з'єднанні, а також у їхніх перехідних зонах.

Роботу виконано в рамках Цільової програми НАН України з космічних досліджень.

1. Волков В. Про ізометрії поверхонь обергання // Вісник КНУ ім. Т. Г. Шевченка. Сер. Математика. Механіка. — 2013. — № 29. — С. 36–39.
2. Патон Б. Е., Гвоздецкий В. С., Дудко Д. А. и др. Микроплазменная сварка. — Киев: Наук. думка, 1979. — 248 с.

3. Paton B. E., Lobanov L. M., Volkov V. S. Transformable structures (Review) // The Paton Welding J. — 2011. — 12. — P. 25–33.
4. Schenk M., Viquerat A. D., et. al. Review of Inflatable Booms for Deployable Space Structures: Packing and Rigidity // J. Spacecraft and Rockets. — 2014. — 51, N 3. — DOI: 10.2514 /1.A32598. — <http://www.eng.cam.ac.uk/advancedstructures/files/pdf/2014JSR.pdf>

Стаття надійшла до редакції 15.12.14

Л. М. Лобанов, В. С. Волков

Институт электросварки им. Е. О. Патона
Национальной академии наук Украины, Киев

СОЗДАНИЕ И ИССЛЕДОВАНИЕ КОНСТРУКЦИЙ ПРЕОБРАЗУЕМОГО ОБЪЕМА КОСМИЧЕСКОГО НАЗНАЧЕНИЯ

Обоснован оптимальный тип базовой поверхности КПО и создана математическая модель ее преобразования к компактной форме. Определены оптимальные геометрические параметры КПО конического типа. Выполнено моделирование характера распределения напряжений в оболочке конструкции на последовательных стадиях преобразования и исследование кинетики процесса раскрытия тонкостенных конических КПО. Определены критерии качества неразъемных соединений преобразуемых тонкостенных металлических оболочек, создано технологическое оборудование для их изготовления и лабораторные образцы для испытаний.

Ключевые слова: конструкции преобразуемого объема, несущие оболочки, развёртываемые космические конструкции.

L. M. Lobanov, V. S. Volkov

E. O. Paton Electric Welding Institute, Kyiv

DEVELOPMENT AND INVESTIGATION OF TRANSFORMABLE-VOLUME STRUCTURES FOR SPACE APPLICATIONS

We present a grounded optimal type of transformable-volume structures' (TVS) basic surface and the developed mathematical model of its transformation into a compact form. Optimal geometric parameters of a conical type TVS were determined. The parameters of stresses distribution in a structure's shell at successive stages of transformation was modeled and kinetics of a thin-walled conical TSV unfolding process was studied. Quality criteria of permanent joints of the transformable thin-walled metal shells were determined and the technological equipment for their manufacture and laboratory tests samples was designed.

Key words: transformable-volume structures, load-carrying shells, deployable space structures.