

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ІНСТИТУТ ЕЛЕКТРОЗВАРЮВАННЯ ім. Є.О. ПАТОНА

Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису  
УДК 629,4.021.26:629.78-047,37

БОРОВИК ЯРОСЛАВ ВОЛОДИМИРОВИЧ

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**РОЗРОБКА І ДОСЛІДЖЕННЯ ДОВГОМІРНОЇ ЗВАРНОЇ  
КОНСТРУКЦІЇ ПЕРЕТВОРЮВАННОГО ОБ'ЄМУ КОСМІЧНОГО  
АПАРАТОБУДУВАННЯ**

Спеціальність – 132 Матеріалознавство  
Галузь знань – 13 Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей,  
результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

Я.В. Боровик

Науковий керівник: к.т.н., с.д., В.С. Волков

Київ – 2024

## АНОТАЦІЯ

Боровик Я.В. Розробка і дослідження довгомірної зварної конструкції перетворюваного об'єму космічного апаратобудування.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 132 Матеріалознавство. – Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона НАН України, Київ – 2024.

Дисертація присвячена розробці та виготовленню металевої конструкції перетворюваного об'єму (КПО) космічного призначення з конічних секцій, механічні характеристики якої можливо прогнозувати на етапі її створення з урахуванням впливу факторів агресивного середовища в умовах експлуатації. Виконано визначення конструктивної схеми, яка відповідає найкращому поєднанню масово-габаритних характеристик, високої компактності та стійкості під дією експлуатаційних навантажень та факторів космічного простору. Визначено оптимальні співвідношення геометричних параметрів конічних секцій КПО, включаючи їх товщину і параметри кільцевих складок, що утворюються при компактному перетворенні, при яких оболонка конструкції обраного матеріалу має найбільшу стійкість під дією характерних (регламентованих) зовнішніх навантажень. Проведено порівняльний аналіз скінчено-елементних моделей розкриття суцільнозварних секцій КПО з рівною вихідною геометрією та товщиною при різній кількості складок та різній компактності, що в сукупності з верифікацією отриманих результатів шляхом натурного експерименту дозволило отримати об'єктивні дані щодо локальної втрати стійкості тонких перетворюваних оболонок в нестационарному стані. Показано, що забезпечення сталого процесу розкриття зі збереженням регулярності рухомої поверхні оболонки можливо за умов дотримання відповідності кроку її кільцевої згортки до діапазону у 26...29 товщин металу оболонки.

Досліджено вплив алгоритмів мікроплазмового зварювання та їх параметрів на кінцеві механічні властивості КПО, а також відпрацьовано та систематизовано режими зварювання екстремально деформованих з'єднань перетворюваних секцій КПО з високолегованої аустенітної сталі фольгового класу товщин. Запропоновано методики кількісної оцінки прецизійних параметрів зварювання у повторюваних циклах складання суцільнозварної КПО періодичного профілю. Продemonстровано можливість та ефективність поточного коригування параметрів зварювального процесу за результатами експрес-оцінки структурно-фазового стану зварного з'єднання методами неруйнівного контролю.

Реалізовано методику прогнозування жорсткісних параметрів багатосекційної КПО довжиною 3 метри шляхом розрахунково-експериментального модального аналізу довгомірної оболонки в стані розкриття із вихідними даними, попередньо отриманими методом чисельного аналізу. Виконано моделювання точних геометричних параметрів розкритої КПО після зняття внутрішнього тиску формоперетворення для усунення вірогідності виникнення резонансних частот коливань в експлуатаційних умовах.

Ключові слова: розкривні конструкції; надувні конструкції; розкривні оболонки; самонесні оболонки; складні оболонки; зварні з'єднання, міцність, математичне моделювання, зварювання, мікроплазмове зварювання, тонкі металеві оболонки, імпульсне зварювання, механічні властивості, мікроструктура.

## **ABSTRACT**

Borovyk, Y.V. Development and Investigation of a Longitudinal Welded Structure of Transformable Volume for Space Apparatus Construction, Methods for its Strength and Stability Calculations.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in the specialty 132 Materials Science. - E.O. Paton Paton Electric Welding Institute of the National Academy of Sciences of Ukraine, Kyiv, 2024.

The dissertation is devoted to the development and fabrication of a metallic transformable-volume structure (TVS) for space applications, consisting of conical sections, with mechanical characteristics that can be predicted at the stage of its creation, taking into account the aggressive operating environment. The determination of the structural scheme, which corresponds to the best combination of dimensional characteristics, high compactness, and stability under the influence of operational loads and space factors, has been carried out. Optimal ratios of geometric parameters of the conical sections of the TVS, including their thickness and parameters of circular folds formed during compact transformation, have been determined, ensuring the highest stability of the selected material shell under external loads. A comparison of finite element models of welded section unfolding with the same initial geometry and thickness but with different numbers of folds and compactness has been conducted.

The influence of microplasma welding and its characteristics on the final mechanical properties of the TVS, as well as the developed welding regimes for sections of the TVS made of stainless steel with a thickness of 0.3 mm, has been investigated. The TVS requires precise assembly conditions before welding, and only under these conditions is it possible to approximate the necessary mechanical characteristics of the weld to those of the base metal. The optimal parameter of the natural frequency of the 3-meter-long TVS, determined by modal analysis, has been confirmed to ensure the physical and mechanical characteristics that prevent

resonance frequency vibrations during operation, thereby maintaining the useful load.

Key words: deployable structure, inflatable structures, deployable booms, load-carrying shells, foldable shells, strength; mathematical modeling, welding, welded joints, microplasma welding, thin metal shells, pulsed welding, Mechanical Properties, microstructure.

#### Список публікацій здобувача

1. Lobanov, L.M., Volkov, V.S., Makhnenko, O.V., Kandala, S.M., Borovyk, Y.V. The Influence of Geometric Parameters on the Bearing Capacity of Transformable-Volume Structure *Structural Integrity*, 2020, 16, стр. 198–203
2. Volkov, V.S., Makhnenko, O.V., Kandala, S.M., Volkova, O.A., Borovyk, Y.V. Compactness variability of metal deployable load-carrying shell structures *Materials Today: Proceedings*, 2021, 46, стр. 170–175
3. Лобанов Л.М., Махненко О.В., Волков В.С., Кандаля С.М., Боровик Я.В. Моделивання НДС і несної здатності зварних трансформованих конструкцій в процесі розкриття і експлуатації // X Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах», Одеса, 2020
4. Technology for manufacture of all-welded deployable shell structures for space purposes. The 75th IIW Annual Assembly and International Conference, Tokyo 2022
5. Borovyk Y.V., Lobanov, L.M., Volkov, V.S. Technology for manufacture of all-welded deployable shell structures for space purposes *Welding in the World*, 2023, DOI10.1007/s40194-023-01592-6

## ЗМІСТ РОБОТИ

<b>АНОТАЦІЯ.....</b>	<b>2</b>
<b>ЗМІСТ.....</b>	<b>6</b>
<b>ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ.....</b>	<b>8</b>
<b>ВСТУП.....</b>	<b>9</b>
<b>1. ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПАКТНОГО ФОРМОПЕРЕТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В СУЧАСНІЙ СВІТОВІЙ ПРАКТИЦІ.....</b>	<b>16</b>
1.1. Класифікація сучасних перетворюваних конструкцій. Самонесні конструкції оболонкового та стрижневого типу.....	16
1.2. Методи забезпечення базових функціональних властивостей перетворюваних конструкцій.....	32
Завдання досліджень.....	42
<b>2. МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ДОВГОМІРНОЇ КПО.....</b>	<b>44</b>
2.1. Методологія створення металевої довгомірної перетворюваної конструкції оболонкового типу. Визначення можливих варіантів геометричної конфігурації конструкції, при яких забезпечується необхідна компактність.....	44
2.1.1 Визначення власних частот коливань конструкції.....	52
2.1.2 Оцінка впливу гладкості профілю твірної кінчної секції КПО у розкритому стані на величину власної частоти коливань.....	62
2.1.3 Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів оболонки КПО.....	64
2.2 Моделювання процесу формоперетворення та аналіз напружено- деформованих станів металевої оболонки.....	69
2.2.1 Формування чисельної моделі КПО, моделювання напружено- деформованого стану структурних елементів та конструкції загалом .....	69
2.2.2 Коригування конструктивної схеми КПО на підставі отриманих експериментальних та розрахункових даних.....	74

2.2.3	Проектування та виготовлення дослідної конструкції КПО.....	83
	Висновки по розділу.....	100
<b>3.</b>	<b>РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КПО І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ .....</b>	<b>101</b>
3.1.	Технологія зварювання та об'ємного деформування структурних елементів КПО.....	101
3.1.1	Зварювання прямолінійних швів секцій КПО.....	101
3.1.2	Технологія ізометричного формоперетворення вихідних структурних елементів КПО.....	114
3.1.3	Зварювання внутрішніх та зовнішніх кільцевих швів.....	118
3.1.4	Технології контролю якості критичних елементів та параметрів конструкції.....	132
3.2.	Контроль відповідності вихідних параметрів КПО до заданих умов.....	145
3.2.1	Дослідження кінетики процесу розкриття.....	145
3.2.2	Динамічні дослідження власних частот коливань КПО.....	149
	Висновки по розділу.....	158
	<b>ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....</b>	<b>159</b>
	<b>СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....</b>	<b>162</b>

## ПЕРЕЛІК ОСНОВНИХ УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

- $S$  – довжина конічної твірної [мм]  
 $K$  – товщина зварюваного матеріалу, [мм]  
 $I_s$  – стартовий струм, [А]  
 $T_{up}$  – час підвищення струму, [сек]  
 $I$  – зварювальний струм, [А]  
 $T_{down}$  – час зниження струму, [сек]  
 $V$  – швидкість зварювання, [мм/сек]  
 $d_{cy}$  – відношення тривалості імпульсу до паузи, [мс]  
 $I-G$  – базовий струм, [А]  
 $F-P$  – частота імпульсу, [Гц]  
 $I_p$  – струм чергової дуги, [А]  
 $X$  – відстань між притискними губками, [мм]  
 $Z$  – відстань від електрода до зварюваного виробу, [мм]  
 $q_p$  – витрати плазмоутворюючого газу, [л/хв]  
 $q_t$  – витрати захисного газу, [л/хв]  
 $d_{ел}$  – діаметр електрода. [мм]  
 $\delta$  - товщина конструкційного матеріалу оболонки, [мм]  
 $\alpha$  - кут конусності оболонки КПО, [град]  
 $b$  – крок гофрів [мм]  
 $\varepsilon_K$  - відносна кільцева деформація оболонки, [%]  
 $\tau_i$  – тривалість імпульсу струму, [мс]  
 $\tau_p$  – тривалість паузи струму, [мс]  
 $L$  – загальна довжина КПО, [мм]  
 $d$  – діаметр меншої основи усіченого конусу [мм]  
 $D$  - діаметр більшої основи усіченого конусу [мм]  
 $H_K$  – висота конічної секції, [мм]  
 $h$  – висота (товщина) компактної конічної секції (диску), [мм]  
 $K_T$  - коефіцієнт трансформації довжини ,  $K_T = H_K / h$   
 $\Delta R_F$  - зміщення радіусу гофра  
 $\sigma_b$  ( $\sigma_u$ ) - межа міцності матеріалу оболонки КПО, [МПа]  
 $R_{p0,2}$  ( $\sigma_T$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) - межа плинності



## ВСТУП

Стрімке зростання темпів освоєння космічного простору вимагає постійного вирішення протиріччя між зростаючим об'ємом корисного навантаження засобів доставки та їх власною вантажною спроможністю. Кількість запусків носіїв та загальна маса їх корисного навантаження за останні десятиріччя збільшилися у більше ніж 2,5 рази - із 387 запусків у 2010 році до 1006 у 2020 [1], і переважна більшість космічних апаратів (КА) є оболонковими конструкціями, що зумовлено необхідністю підтримання в обмеженому просторі технологічних та житлових модулів характерних умов земного середовища. Низьке питоме співвідношення маси та об'єму оболонкових конструкцій стимулює постійний пошук технологічних рішень щодо їх компактного складання під час доставки носієм, які на сьогодні мають обмежену ефективність з причини жорстких вимог до несної спроможності, стійкості та щільності складаної оболонки після розкриття у вакуумі космічного простору. Отже, динамічна зміна технологічної картини застосовуваних матеріалів та методів компактного перетворення вимагає актуального аналізу їх переваг та недоліків, результатом якого має стати універсальний та прийнятний для більшості існуючих задач метод побудови жорстких перетворюваних оболонок.

**Актуальність** виконуваної роботи зумовлена існуванням нової проблематики у сфері створення несних розкривних споруд космічного призначення, здатних поєднувати масогабаритну ефективність із довготривалою стійкістю до агресивних зовнішніх факторів.

**Мета роботи:** створення довгомірної конструкції перетворюваного об'єму із забезпеченням заданих геометричних параметрів, вакуумної щільності після проходження деформаційних циклів та несучої здатності під дією факторів космічного простору.

**Об'єктом досліджень** є самонесні конструкції перетворюваного об'єму космічного призначення

**Предмет досліджень** – технологічні процеси виготовлення і дослідження експлуатаційних властивостей довгомірної зварної конструкції перетворюваного об'єму.

Ідея досліджень полягає у визначенні взаємозв'язку між геометричними параметрами і коефіцієнтом трансформації довгомірної КПО з несною здатністю і необхідною частотою її власних коливань.

Отримання самонесних властивостей розкривних конструкцій є метою переважної більшості відомих проектів, за винятком випадків їх технологічного застосування у якості поверхонь відбиття і т.ін. У досліджуваному класі конструкцій жорсткість у робочому стані не вимагає застосування додаткових технологій для її одержання та підтримання, але залежить від ступеню розкриття та збільшується із його зростанням. З іншого боку, актуальною та остаточно не вирішеною проблемою в сучасній аерокосмічній техніці є точність відтворення геометричних параметрів розкривних конструкцій оболонкового типу. Отже, в роботі досліджується як сполучення достатніх ступеню трансформації та відповідної йому жорсткості, так і вплив пружно-пластичних властивостей матеріалів оболонки на прецизійність її перетворення на межі застосування зовнішнього джерела енергії для ініціювання розкриття.

**Наукова новизна** роботи полягає у сукупності конструктивно-технологічних рішень, направлених на створення довгомірної зварної конструкції перетворюваного об'єму (КПО) космічного призначення, у розроблених технологіях зварювання, формотворення та верифікації експериментальними оцінками результатів математичного моделювання напружено-деформованих станів і частот власних коливань КПО, що забезпечують її необхідну несучу здатність і масово-габаритні параметри, високу міцність і вакуумну щільність зварних з'єднань.

Робота сфокусована на розробці алгоритму відтворення і сполучення геометричних та механічних властивостей розкривної конструкції у

робочому стані, а також прогнозуванні дефектоутворення екстремально деформованих зварних з'єднань фольгових металевих матеріалів безпосередньо у процесі зварювання, що забезпечує їх вакуумну щільність після деформаційних циклів. Достатня жорсткість перетворюваної оболонки конструкції після розкриття визначає самонесну здатність, яка є її базовою функціональною властивістю. Однак, будь-які з відомих методів отримання кінцевої несної спроможності породжують невизначеність у співвідношенні жорсткості оболонки та її точних геометричних параметрів, принципово важливих для космічного апаратобудування. Крім того, створення розкритої оболонки вимагає прогнозування реакції її критичних елементів на зовнішні та технологічні фактори, відтворення яких в експлуатаційних умовах вкрай ускладнено або неможливо. Найбільш характерним прикладом є відтворення заданих властивостей нероз'ємних з'єднань, що зазнають екстремальних деформувань як складова розкритої оболонки.

### **Практичне значення отриманих результатів.**

Теоретичні та експериментальні дослідження, які були виконані в ході роботи, можуть бути застосовані при створенні великогабаритних самонесних оболонок перетворюваного об'єму, які можна буде використати у широкому спектрі задач по створенню висувних та модульних конструкцій у сфері космічного апаратобудування. Розроблювана конструкція має визначене практичне застосування та призначена для апробації в реальних експлуатаційних умовах. При виконанні роботи розроблено методику точного прогнозування сполучення геометричних та механічних властивостей перетворюваної конструкції після повного розкриття у робочому стані, а також практичні рекомендації по виконанню рівномісних зварних з'єднань оболонок, що зберігають герметичність при екстремальному деформуванні та подальшій експлуатації в умовах агресивного середовища космічного простору.

Результати теоретичних та експериментальних досліджень, які були отримані в процесі виконання роботи, можуть бути застосовані при створенні самонесних оболонок перетворюваного об'єму, які будуть використовуватись у космічному апаратобудуванні, зокрема у проектах ДКБ «Південне ім М.К. Янгеля»

### **Особистий внесок здобувача.**

Автором розроблено алгоритм відтворення кінцевих механічних властивостей та геометричних параметрів довгомірної розкривної самонесної конструкції, методику прогнозування дефектоутворення екстремально деформованих зварних з'єднань фольгових металевих матеріалів безпосередньо у процесі зварювання, що забезпечує необхідну вакуумну щільність зварних з'єднань після проходження деформаційних циклів.

### **Апробація результатів дисертації.**

Результати дисертаційної роботи доповідалися і обговорювалися на The 75th IW Annual Assembly and International Conference (Tokyo, Japan, 2022).

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами підтверджує її актуальність. Основні результати дисертаційної роботи автор отримав як виконавець науково-дослідних робіт згідно з:

- Інфраструктурні програми «Програма наукового приладобудування НАН України» у 2020-2022 р. за темою «Розробка тривимірного методу цифрової кореляції зображень для безконтактного вимірювання переміщень великогабаритних циліндричних об'єктів». Державний реєстраційний номер роботи 0120U102483. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.9. (8/9). Виконується за розпорядженням Президії НАН України від 10.02.2021 № 82 дог. № 5-751-2021 від 11.02.2021.

- Відомча, відомче замовлення НАН України у 2019-2021 р. за темою «Розробка та дослідження технологій і устаткування для зварювання тонкостінних і розкривних конструкцій із високоміцних легких сплавів з мінімальними деформаціями, електроімпульсної обробки і діагностики лазерно-інтерферометричними методами». Державний реєстраційний номер 0118U100510. Номер теми згідно плану ІЕЗ ім. Є.О. Патона НАН України: 1.6.2.8.7. (8/7). Виконується за постановою Бюро ВФТПМ НАН України від 30.10.2018, прот. № 15.

### **Публікації.**

За темою дисертаційної роботи опубліковано 6 робіт, з них 3 у виданнях, включених або реферованих в міжнародних наукометричних базах даних «Scopus», 1 стаття у фахових виданнях України, 1 публікація в матеріалах конференцій.

### **Структура і обсяг роботи.**

Дисертаційна робота містить вступ, 3 розділи, загальні висновки та список використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 170 сторінок машинописного тексту, в тому числі 100 малюнків, 15 таблиць і список використаних джерел зі 81 найменуваннями.

У **вступі** відзначено актуальність теми дисертації та сформульовано її мету та основні завдання досліджень. Розглянуто об'єкт, предмет та методи досліджень і описано наукову новизну та практичне значення здобутих результатів. Надано інформацію щодо апробації результатів роботи та кількості публікацій по зазначеній темі із посиланням на внесок автора. Представлено структуру та обсяг дисертаційної роботи.

У **першому розділі** розглянуто застосування технологій компактного формоперетворення просторових конструкцій в сучасній світовій практиці та наведено класифікацію сучасних перетворюваних конструкцій та самонесних конструкцій оболонкового та, зокрема, стрижневого типу. Зазначено та

проаналізовано методи забезпечення базових функціональних властивостей перетворюваних конструкцій та окреслено задачі досліджень. На основі широкого огляду літературних джерел та подальшого порівняння властивостей матеріалів металевих та синтетичного походження проведено аналіз прийнятності їх використання за умов забезпечення жорсткісних та міцнісних властивостей самонесних конструкцій різного призначення.

У **другому розділі** розглянуто методологічні аспекти створення металевої оболонкової довгомірної перетворюваної конструкції періодичного профілю. Виконано чисельне моделювання напружено-деформованих станів обраного шляхом послідовної оптимізації об'єкту дослідження, проведено аналіз його характеристик жорсткості та визначено раціональні шляхи покращення масово-габаритних властивостей. Наведено основні та альтернативні способи утворення нероз'ємних з'єднань матеріалів аерокосмічного призначення. Виконано аналіз впливу ключових параметрів процесу імпульсного мікроплазмового зварювання на структурні особливості шва до та після екстремального деформування. Наведено результати визначених та підтверджених експериментальним шляхом оптимальних умов формування нероз'ємних з'єднань тонких перетворюваних оболонок зі сталі аустенітного класу, сполучення фізико-механічних властивостей та структурних особливостей яких максимально наближено до аналогічних властивостей основного металу. Обґрунтовано технологічні умови забезпечення необхідних властивостей з'єднання з урахуванням умов експлуатації та виготовлення. Досліджено вплив зварних з'єднань на процес розкриття та просторову жорсткість розкритої конструкції.

**Третій розділ** присвячений розробці технології зварювання структурних елементів КПО та дослідженню кінетики процесу розкриття довгомірної конструкції. Виконано вибір прийнятних методів контролю якості нероз'ємних з'єднань з урахуванням їх геометричних та структурних особливостей. Проведено аналіз задовільних сполучень фізико-механічних властивостей металевих матеріалів для забезпечення необхідної жорсткості

та стійкості перетворюваної конструкції в умовах дії факторів космічного середовища. Зроблено загальні висновки за результатами досліджень сполучення достатніх ступеню трансформації та жорсткості об'єкту дослідження.

## **Розділ 1 ЗАСТОСУВАННЯ ТЕХНОЛОГІЙ КОМПАКТНОГО ФОРМОПЕРЕТВОРЕННЯ ПРОСТОРОВИХ КОНСТРУКЦІЙ В СУЧАСНІЙ СВІТОВІЙ ПРАКТИЦІ**

### **1.1 Класифікація сучасних перетворюваних конструкцій. Самонесні конструкції оболонкового та стрижневого типу**

Технології компактного формоперетворення просторових конструкцій знаходять широке застосування в космічній галузі, що дозволяє створювати гнучкі та адаптивні системи зі змінною формою та розмірами. Складані та розкриті типи компактних формоперетворюваних конструкцій використовуються для створення різноманітних просторових елементів, таких як антени, функціональні елементи супутників, сонячні панелі, ємнісні конструкції тощо. Проте, успішне впровадження таких конструкцій потребує вирішення викликів, пов'язаних з розробкою надійних систем управління розкриттям та використанням високоякісних матеріалів із властивостями, що відповідають вимогам космічного середовища. Дослідження та застосування технологій компактного формоперетворення просторових конструкцій у космічному застосуванні відкривають нові перспективи для їх розвитку, сприяючи зменшенню маси та об'єму апаратів, покращенню функціональності та ефективності, а також забезпеченню адаптивності до змінних умов космічного середовища. Сучасні дослідження в галузі конструкцій перетвореного об'єму в космічних технологіях спрямовані на розвиток нових підходів, матеріалів та методів для підвищення функціональності та ефективності таких конструкцій. Основними проблемами на даний момент є збільшення масштабів та складності таких конструкцій, розробка нових методів та матеріалів, які дозволяють створити більші та більш складні трансформовані конструкції, що забезпечують також більшу функціональність для космічних апаратів. Також є необхідним вирішення проблем, пов'язаних з надійністю і довговічністю трансформованих конструкцій у вимогливих умовах космічного середовища,



включаючи температурні зміни, радіаційні та механічні навантаження. Всі вищезгадані вимоги значною мірою залежать від розробки нових матеріалів з покращеними властивостями для перетворюваних конструкцій. Це можуть бути легкі та міцні композитні або металеві матеріали, що мають високу стійкість до умов космосу та відповідають алгоритмам перетворення, які забезпечують більш точну, швидку та надійну реалізацію процесу розкриття конструкції. Для перетворюваних конструкцій необхідні матеріали з достатньою пластичністю та стійкістю до впливу зовнішніх факторів. Протягом останніх років використовуються різні матеріали, як наприклад пластик та полімери, зокрема високоміцний полікарбонат, який має також високу ударну стійкість та прозорість, або ж акрилові полімери ці матеріали мають високу прозорість, стійкість до ультрафіолетового випромінювання і хорошу пластичність. Застосовуються також композитні матеріали, які поєднують полімерні матриці з армуючими наповнювачами, такі як скловолокно або карбонові волокна, що забезпечують необхідну пластичність, міцність, легкість і витривалість. Мають застосування і гумові матеріали та еластомери, такі як силіконові гуми, які мають властивості пластичності, еластичності та витривалості, можуть зберігати власну форму при деформації і відновлюватися до початкової форми; еластомери мають аналогічні властивості. Надійність металевих сплавів, які мають високу міцність і гарну корозійну стійкість, є перспективою майбутнього використання з огляду на недостатню вивченість особливостей згинання пластичних матеріалів із необхідною мінімізацією їх розтягу та стискання. За останні десятиліття стали вживаними композитні та керамічні матеріали, такі як композити з керамічною матрицею і наповнювачами - оксид алюмінію або карбід кремнію, які можуть мати високу міцність, жорсткість і стійкість до температурних змін. Очевидно, що вибір матеріалу залежить від конкретних вимог до конструкції, її функціональних особливостей та параметрів середовища, в якому він буде використаний.

Майбутні космічні кораблі із сонячним вітрилом, яким не потрібні жодні ракетні двигуни та паливо, є перспективним варіантом для довгострокових дослідницьких місій у сонячній системі. Однак їм будуть потрібні надлегкі світловідбивні плівки і розгортні стрижневі елементи, які дозволять розкласти та утримувати поверхні з великою площею. Досягнення прийнятного співвідношення площі рефлекторного вітрила і маси конструкції, що призводить до поки що невеликого, але значного прискорення під фотонним тиском сонячного світла, є надзвичайно складним завданням. Така ж складна техніка розгортання потрібна для розкриття великих рефлекторних тонких мембран або антен. Ключовими елементами подібних конструкцій є так звані «стріли» – стрижневі оболонкові елементи, які необхідно компактно скласти в дуже невеликий об'єм для доставлення до місця призначення в космосі. Подібні стріли були успішно випробувані в умовах невагомості під час космічного польоту [2] (Рис. 1.1).

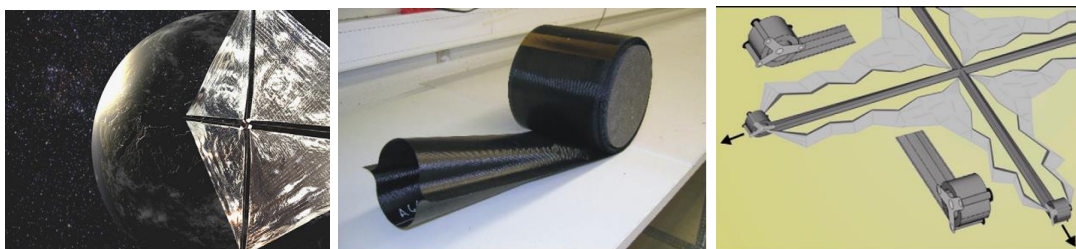


Рис.1.1 Концепція сонячного вітрила з чотирма несучими стрижневими оболонковими елементами незамкненого профілю

Надлегкі розгортні балки з вуглецевого волокна, що складаються з двох протилежних напівоболонки з  $\Omega$ -подібним профілем, мають чудові властивості згортання та розкриття і є відносно жорсткими в розгорнутому стані, тому вони ідеально підходять як структурне посилення для майбутніх космічних апаратів з сонячними вітрилами, великих антен або сонцезахисних екранів. Тим не менш, розгортання кожного зі стрижнів потребує досить складного та енерговитратного електромеханічного пристрою із значною власною масою. З цієї причини, розповсюдження отримали замкнені оболонкові конструкції різних типів формотворення, розкриття яких

потребує створення надлишкового тиску у внутрішній порожнині без використання додаткових джерел енергії. Помітна категорія схем згинання для циліндричних стрижнів походить від схем, що використовуються для згинання так званих сільфонних складок. Традиційно сільфони проектувалися для можливості гнучкого руху в обмеженому діапазоні, але їх можна адаптувати для розгортання від плоского до повністю циліндричного стану. Класична схема сільфонних складок показана на (Рис. 1.2,*a*).

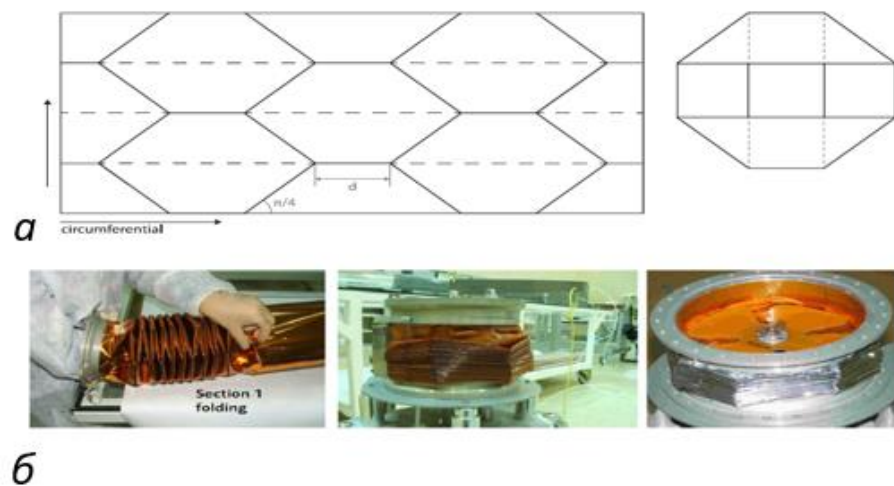


Рис. 1.2 Зразок сільфонних складок: (*a*) малюнок складок і поперечний переріз чотирикутного малюнка складання сільфона, що використовується для надувної жорсткої стріли TADECS (*б*) для деорбітної програми [3].

Ця схема згинання була використана для системи контролю розгортання тетрагональних складок (TADECS) надувної жорсткої стріли для сходження з орбіти [3]; (Рис. 1.2,*б*). Далі, у роботі [4] описано геометрію згинання, перевагою якої є мінімальна загальна довжина складок та наявний внутрішній простір у згорнутому стані. Важливим вдосконаленням було розроблення пристрою для послідовного розгортання: стрижень з пристроєм у вигляді чотирилистої деталі розташовується всередині згорнутого циліндра, а під час розгортання складки ковзають по гнучким пелюсткам, які замикаються, щоб утримати наступний згорнутий шар. Недоліки використання множинних складок включають збільшення ліній згину, що

з'єднуються у верхівках, і зниження ефективності компактування через збільшення кількості шарів, що перекриваються.

Наступна категорія схем згинання для циліндричних стрижнів, відомих як складки Міура, походить від класичної планарної схеми Міура-орі [5]; за допомогою зміни кутів зворотних складок з ряду в ряд, вводиться загальна кривизна. Використання цих схем для розгортних конструкцій було запропоновано у роботі [6], що описує геометрію розкривних циліндрів у повністю згорнутому стані. У роботі [7] було досліджено характеристики розгортання циліндрів Міура за схемою, названою "згорнутими в зірку". Стрижні були виготовлені з алюмінієвої ламінованої плівки і після розкриття надлишковим тиском були жорстко закріплені за допомогою деформаційного зміцнення. Експерименти проводилися в умовах мікрогравітації для вивчення характеристик розгортання різних геометричних форм складання (Рис. 1.3) та визначення жорсткості розгорнутої оболонки. Було показано, що циліндри Міура мають краще прямолінійне розгортання, ніж ті, що згорталися з гексагональною схемою, відомою як «схема Йошімура». Це було пов'язано зі ступенем деформації матеріалу під час розгортання, - у циліндрі Йошімура лінії складок і грані значно деформуються. Було доведено, що зіркоподібний зразок надає додатковий геометричний параметр, який може бути адаптований для синхронізації модулів та розгортання стрижня по прямій лінії. Однак ця залежність між геометрією та характеристиками розгортання не була повністю розкрита. Фактично, схеми для експериментів вибиралися шляхом проб і помилок. Методом аналізу скінченних елементів у роботі [7] було досліджено деформацію згорнутого стрижня під внутрішнім тиском; жорсткість складок моделювалася за допомогою пружинного елемента. Було показано, що циліндр Йошімура найважче розгортався і мав найбільші концентрації напружень.

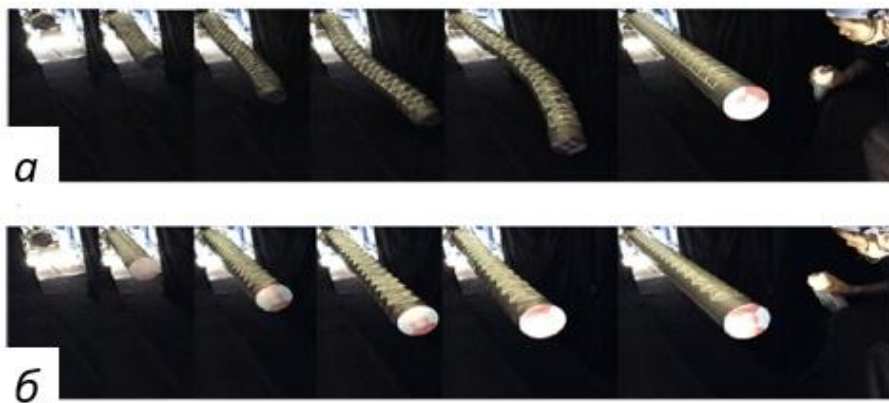


Рис. 1.3 Випробування на розгортання надувних стрижневих елементів в умовах мікрогравітації з шестикутним малюнком складки Йошімура (а) та п'ятикутним малюнком складки Міура (б) [7]

Жорсткість зміцнених стрижнів, визначена за їх базовою власною частотою коливань, була експериментально встановлена як практично незалежна від схеми складання. Однак виміряні частоти зменшилися до значень від 1 до  $2/3$  частоти нерозгорнутого циліндра, це може бути викликано залишковими складками, особливостями з'єднання в основі стрижня та тріщинами у більш товстих алюмінієвих шарах в згинах.

Серед застосувань наступної схеми згортання, відомої як спіральна триангуляція, найбільш вивченими є гелікоїдно-трикутні циліндри (Рис. 1.4). У роботі [8] вперше описано геометричні співвідношення трикутного циліндра із припущенням, що складання є однорідним по всій довжині циліндра, у протиріччя експериментальним спостереженням.

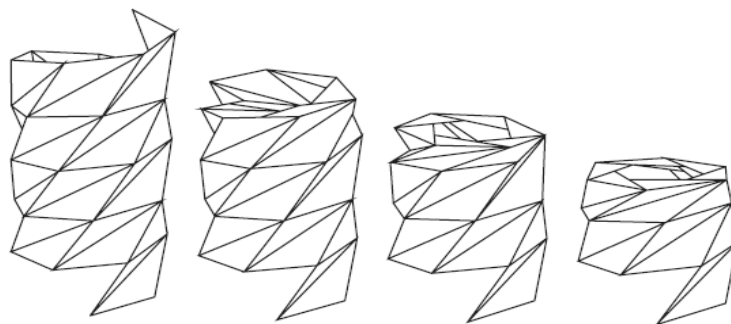


Рис. 1.4 Схема згину гелікоїдно-трикутного циліндру для механізму згортання під дією осьового стискаючого навантаження [9].

Шляхом подальшого припущення, що тільки один тип складок змінює свою довжину, за допомогою геометричних досліджень було розроблено гелікоїдно-трикутні циліндри, що не мають напружень як у згорнутому, так і у розгорнутому стані. Було показано, що напруження розгортання стають меншими зі збільшенням кількості сторін циліндра, тим не менш, компромісом є коефіцієнт перетворення (трансформації) – співвідношення кінцевого та початкового визначального розміру конструкції.

Досліджені гелікоїдно-трикутні циліндри мали жорсткі грані з гнучкими лініями згину, що дозволяло створювати відносно компактні механічні моделі. Однак для стрижнів з гнучких мембран, що розкриваються надлишковим тиском, припущення про прямі лінії складок вже не буде вірним. У дослідженні [10] описано пневматичне розкриття алюмінієвих циліндрів з неспіральною трикутною схемою (Рис. 1.5).

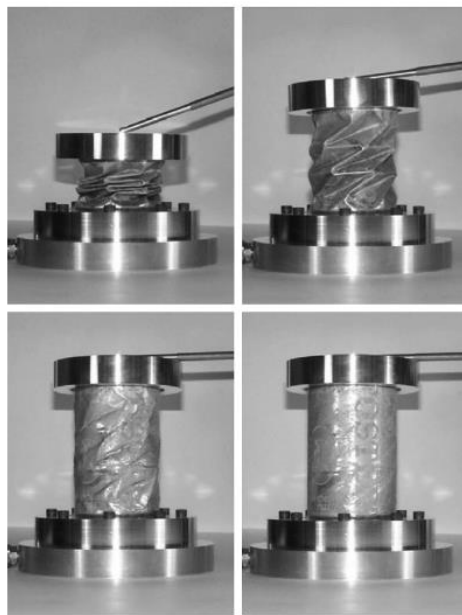


Рис.1.5 Надування алюмінієвого гелікоїдно-трикутного циліндра [10].

Орієнтація послідовних згорнутих шарів була зворотною, щоб уникнути відносного обертання крайок під час розгортання. Важливою особливістю спірально-триангульованих схем є те, що повністю згорнутий поперечний переріз необов'язково є правильним багатокутником, і вершини

можуть бути зміщені один відносно одного в послідовних шарах, зменшуючи габарити згорнутого стрижня.

Досліджена у роботі [11] схема кінчного складання полягає у формуванні слабokonічного стрижня, який має кільцеві згортки через визначені проміжки та утворює компактну телескопічну конфігурацію для подальшого розкриття (Рис. 1.6). Цей підхід суттєво відрізняється від поданих вище методів компактування оболонки, оскільки поперечний переріз залишається майже недеформованим протягом згортання та розгортання надувного стрижня. Крім того, складання не відбувається в окремих місцях по довжині стрижня, а замість цього концентричні складки переміщуються по матеріалу під час розгортання, розсіюючи енергію за рахунок пластичної деформації.

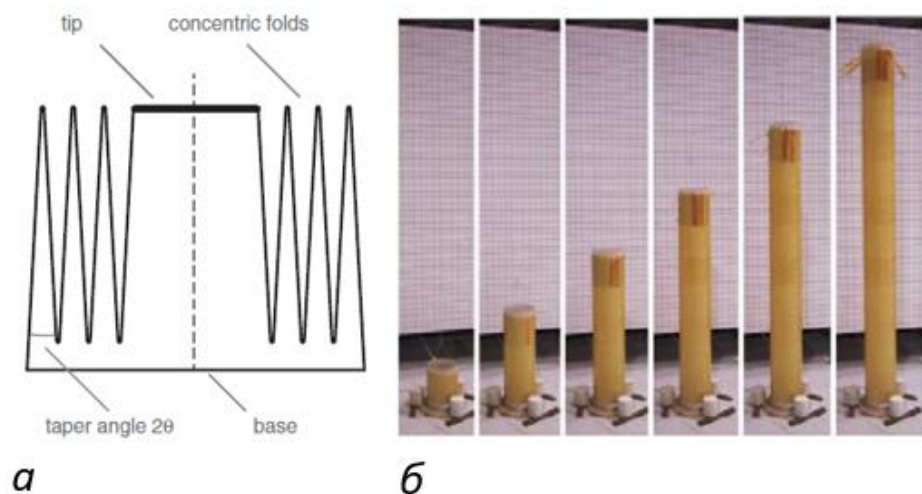


Рис. 1.6 Переріз телескопічно-конічної стрижневої оболонкової конструкції (а) а процес її розкриття створенням надлишкового тиску у внутрішній порожнині (б) [12].

Розкривні конічні стрижні були розроблені компанією L'Garde для проекту In-Space Propulsion NASA [13,14], і концепція пройшла космічну апробацію в рамках експерименту Cibola Flight, спільно з технікою підвищення жорсткості за підвищених температур [15]. Для поліпшення прямолінійності розгортання можна розмістити оправку вузького кінця

конічного стрижня, що забезпечує жорстку поверхню для зкручування матеріалу [11,12]. Альтернативний метод згортання конічного стрижня, відомий як "схема розгортання Goodyear", було досліджено у [16]. Тут перевернута частина зкручується на барабан всередині стрижня, що забезпечує гальмуючу силу під час розгортання. Метод зкручування конічного стрижня має кілька переваг: контрольоване і прямолінійне розгортання, несна здатність під час розгортання, можливість кріплення мембрани в декількох точках по довжині стрижня, ефективне видалення залишкового повітря і мінімальне початкове розгортання завдяки залишковим напруженням. Також одним з важливих міркувань є те, що при розкритті телескопічних секцій пластиковий шарнір проходить крізь матеріал оболонки, що може призвести до небажаних залишкових напружень та його пошкодження. Очевидним є недолік, що полягає у необхідності застосування м'яких синтетичних матеріалів телескопічно-конічної оболонки та подальшого інтегрування складних технологій надання їй жорсткості.

За останні десятиріччя у багатьох космічних місіях було застосовано конструкції перетворюваного об'єму різного типу та методу формоперетворення. Показовим є експеримент з надувною антеною Inflatable Antenna Experiment (IAE) у середині 1990-х років [17], яка створена методом зигзагоподібної складки (Рис.1.7). При зигзагоподібній складці стріла стрижневої конструкції згладжується, а потім складається через рівні проміжки дискретними лініями або петлями. Дискретний характер складання створює переривчасту структуру, в якій потік повітря між секціями обмежений, у результаті отримана структура чутлива до невеликих змін форми з непередбачуваним напрямом розкриття. Експерименти, чисельні симуляції та польотні випробування на IAE підтвердили, що схема складання типу "зигзаг" є нестабільною під час розгортання. Додатковим недоліком схеми "зигзаг" є погана вентиляція при складанні, тому що залишкове повітря повинно подолати всю довжину стрижня [17, 18].





а

б

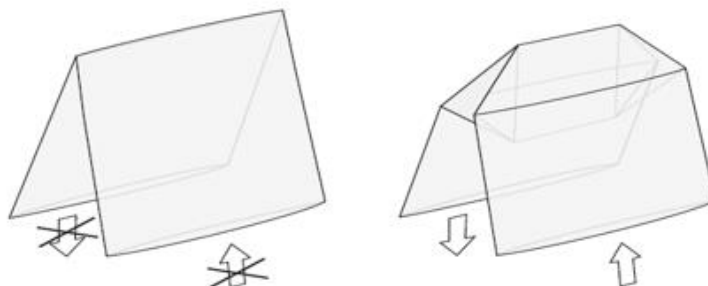


Рис. 1.7 Стрижні зі згином у формі "Z": а) розгортання ІАЕ (зображення: NASA); б) стандартний та модифікований згін у формі "Z", розроблений для полегшення потоку розгортаючого газу [19].

Відоме також використання різноманітних схем складання циліндричних стрижнів (Рис.1.8), заснованих на так званих «схемах орігамі». У той час як зигзагоподібна форма складається з простих паралельних згинів, повторюваних вздовж довжини стрижня, схеми орігамі більш складні і можуть "локально згинатися" в складеній конфігурації.

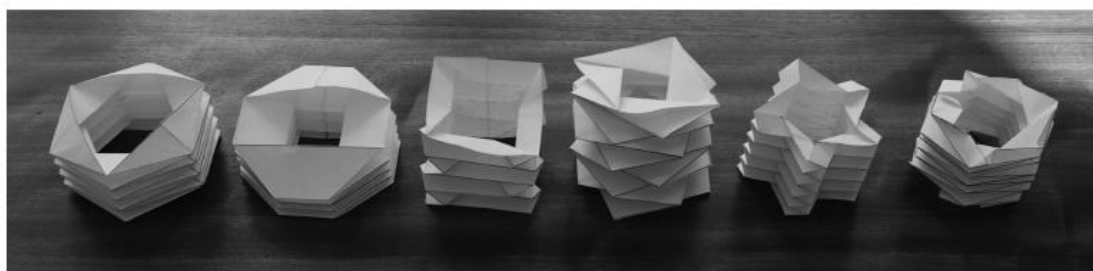


Рис. 1.8 Моделі згортання циліндрів за схемами орігамі

### Конструкції ІЕЗ ім.Є.О.Патона

Роботи над створенням перетворюваних конструкцій для космічних цілей розпочалися в ІЕЗ ім. Є.О. Патона приблизно в той самий час, коли людина вперше освоювала космос. У кінці 1966 року Б.Є. Патон сформулював завдання створення суцільнозварних металевих оболонок,

розміри яких при транспортуванні на орбіту можна було б зменшити до розмірів контейнерів для ракет-носіїв. Прототипами сучасних конструкцій були просторові перетворювані конструкції, такі як висувні (фермові), параболічні антени та оболонкові конструкції [20]. Під час їх проектування використовувалися принципи геометричного згортання та розгортання поверхонь, що використовувались в промисловості для створення пласкозгорнутих труб, зварних металевих полотнищ резервуарів та інших виробів.

З точки зору оптимізації транспортування великогабаритних конструкцій у космосі, найефективнішим методом було складання їх із структурних елементів, які доставлялися з Землі в компактному стані. Однією з перших таких конструкцій в ІЄЗ була трубчасто-тросова тригранна ферма завдовжки до 100 метрів, яку можна було скласти в компактний пакет висотою 650 мм [20], [21]. Довгі трубчасті елементи ферми (лонжерони) виготовлялися з незамкненого профілю типу STEM і складалися в спеціальних пристроях в процесі розгортання конструкції, готові секції з'єднувалися за допомогою зварювання. Ця конструкція, несучі елементи якої аналогічні до стрижневих оболонкових елементів, характеризувалися високими амортизуючими властивостями при мінімальній масі. Алгоритм її розкриття був досить складним, тому для орбітальних експериментів була створена менш компактна, але надійніша чотиригранна ферма шириною грані 450 мм і робочою довжиною до 15 метрів, яку можна було скласти в компактний стан заввишки 500 мм [21], [22], [23]. У 1986 році успішно пройшли експерименти з розгортання та складання ферми на орбіті навколо станції "Салют-7", що підтвердили можливість експлуатації довгомірних несучих конструкцій, які виготовляються на Землі та розгортаються в космосі. Також варто відзначити успішне рішення задачі створення перетворюваної несної ферми для сонячної батареї масою 48 кг, яка мала повну довжину 15 метрів і масу 250 кг [21], [22], [23]. Випробування цієї

фермової конструкції в умовах орбітального польоту пройшли в 1997 році під час монтажу сонячної батареї на космічному модулі "Квант".

При створенні просторових конструкцій для космосу було впроваджено інженерні рішення, які ефективно використовуються в сучасних розробках. Критично важливе зменшення маси та енергетичної витратності процесу розкриття ініціювало пошук методів прямого та зворотного складання замкнених оболонок із достатньою власною жорсткістю. Надалі в ІЕЗ ім. Є.О. Патона була теоретично обґрунтована задача перетворення об'єму суцільнозварних металевих оболонок та знайдені технологічні рішення для її вирішення, які можна розділити на два методи. Перший метод полягає в заміщенні поверхні опуклих оболонок послідовністю плоских фігур, зі згинанням по лініях їх з'єднання, і відомий в сучасній практиці як "z-Folding" [24]. Другий метод базується на ізометричному згинанні оболонок на основі розгортуваних лінійчастих поверхонь. Великий внесок у цю роботу внесли ряд вчених, таких як В.М. Балицький, В.Н. Самілов, О.Ю. Гончар, І.С. Пилишенко, Е.Ю. Бурменко та інші [25].

Розроблені методи формозміни оболонкових конструкцій в ІЕЗ ім. Є.О. Патона, які зберігають гомеоморфний тип поверхні, дозволили створити різноманітні конструкції космічного призначення, включаючи сфери, еліпсоїди тощо. Основою цих методів є прийоми комбінаторної геометрії, такі як заміщення опуклих тіл обертання гомотетичними фігурами і розбиття фігур. Далі, проведені в ІЕЗ Л.М.Лобановим та В.С.Волковим дослідження [26], торкалися широкого спектру застосувань перетворюваних конструкцій, включно з розкривними оболонковими спорудами захисного призначення (Рис. 1.9). Тим не менш, практично досліджені зазначеними авторами оболонки не охоплювали найбільш актуального класу довгомірних конструкцій, що мають співвідношення діаметру найбільш навантаженого перетину до довжини більш ніж 1:10 та ефективно сполучають несні та демпфувальні властивості.

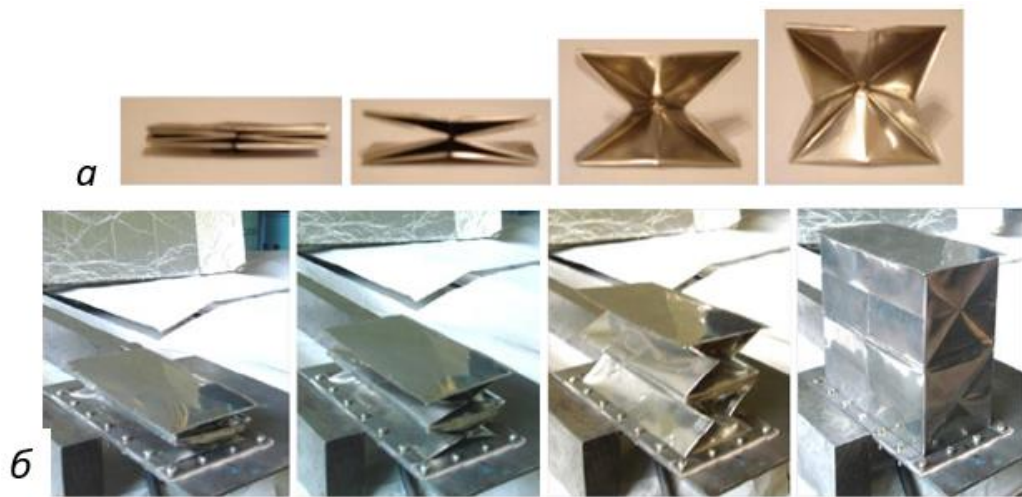


Рис.1.9 Складчасті поверхні неперіодичного профілю; одинична складка в процесі розкриття (а) і конструкція з двох кесонів з титану ВТ1-0 з товщиною 0,1 мм на відповідних до (а) стадіях розкриття (б) [26]

В більшості випадків практична реалізація формозміни полягає в заміщенні поверхні суцільнозварних оболонок послідовністю рівних багатокутників, які згинаються по лініях їх з'єднання до взаємного накладення для створення компактного пакету.

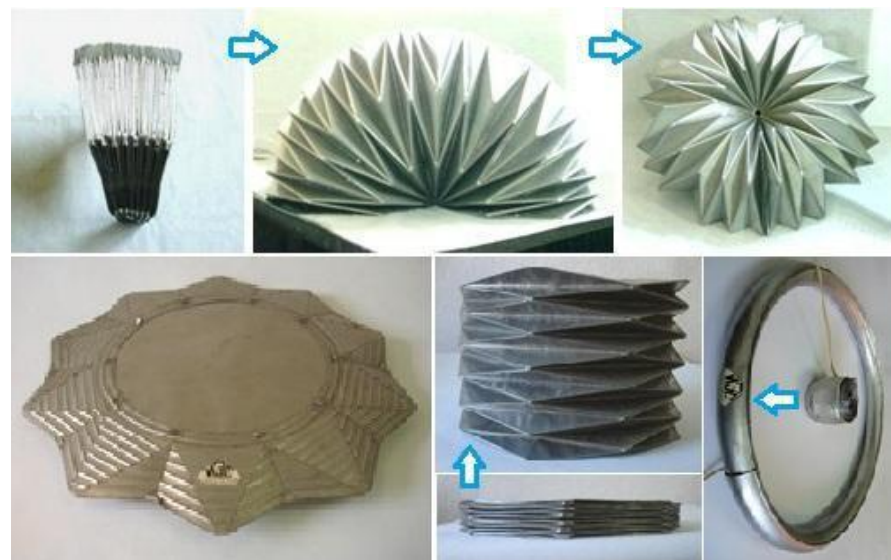


Рис.1.10 Етапи формозміни оболонкових конструкцій, що отримані методом заміщення фрагментів поверхні еліптичної тороїдної оболонки та іншими методами [27].

Недоліки конструкцій перетворюваних оболонок (КПО) даної групи включають обмежену надійність деформованої оболонки, яка під час технологічного процесу формування складок піддається багаторазовим вигинам по суміжних лініях фігур заміщення під кутами, що досягають 180 градусів. Це призводить до появи пошкоджень на лініях вигину, пов'язаних із втомною міцністю матеріалу оболонки і подальшою втратою герметичності конструкції.

Слід зазначити, що найбільш перспективні для використання у сфері аерокосмічної техніки є конструкції, які базуються на поверхнях, що можуть бути ізометрично розгорнуті в площину - такі, як циліндр та конус. Розроблені в ІЕЗ ім. С.О. Патона технології дозволяють здійснювати аналогічне перетворення конструкцій з використанням реальних матеріалів (наприклад, листових металів). Вони заміщають бічну поверхню циліндра складчастою поверхнею та конуса - лінійчастою поверхнею, що формується гладкими кривими в будь-якому осьовому перерізі. Ця різниця між двома типами конструкцій визначає їхні переваги з точки зору технології та експлуатації, роблячи конічні КПО більш придатними для використання в аерокосмічній техніці.

Так, КПО циліндричного типу ґрунтується на принципі перетворення гіперболоїдної складки в оболонку з рівномірним круглим перерізом та може розглядатись як прототип наведених вище схем складання на (Рис.1.2...1.5). Гіперболоїдна складка - це складна багатогранна поверхня, яка складається з двох видів ребер, що є прямими твірними для двох співвісних гіперболоїдів. При певних геометричних співвідношеннях ця складка може бути компактно складена без розтягування її панелей та торцевих ребер. Завдяки ізометричності поверхонь складки та циліндра, її можна перетворити в циліндричну оболонку за допомогою тиску, створеного всередині обмеженого цією оболонкою об'єму. Це призводить до розпрямлення складки та зміни форми прямолінійних ребер на циліндричній поверхні. При з'єднанні декількох складок по торцевих крайках можливо

отримати багатосекційну гіперболоїдну складку, де кожна секція може бути самостійним перетворюваним елементом. Основні недоліки циліндричних конструкцій включають важку технологію формування гіперболоїдних складок, що вимагає створення складного спеціалізованого обладнання для кожного типорозміру кінцевого виробу. Досліди показали, що оптимальні результати при формуванні складок можна отримати лише в певному діапазоні співвідношень  $0,3 \leq H/D \leq 0,6$ .

У більшості випадків більш оптимальною є технологія виготовлення КПО кінцевого типу за допомогою гофрованих дисків з тонкостінних конічних заготовок, що дозволяє створювати конструкції різних типорозмірів і параметрів без утворення концентраторів напружень, які характерні для циліндричних і, особливо, складчастих перетворюваних оболонок. Так само, як і у випадку циліндричних конструкцій, технологія виготовлення КПО кінцевого типу ґрунтується на методі ізометричного перетворення поверхні, який передбачає можливість вигину оболонки без стиснення або розтягування матеріалу, і є близьким аналогом відомої телескопічно-конічної стрижневої оболонки (див. Рис.1.6), що дозволяє використати переваги металевих матеріалів для вирішення проблеми недостатньої жорсткості та стійкості та здатна мати різні масогабаритні варіанти виконання.

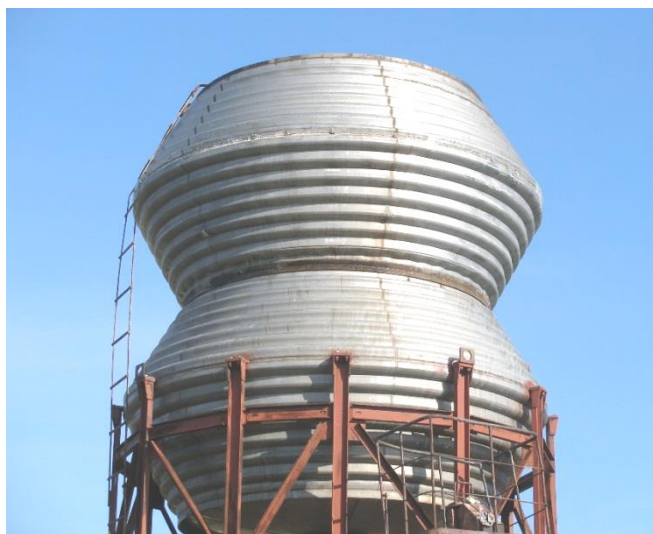


Рис.1.11 Великогабаритна КПО резервуарного типу з об'ємом 40 м<sup>2</sup>, яка використовується в автономній системі водопостачання [28].

Використання КПО в аерокосмічній техніці ставить певні вимоги до проектування жорстких несучих оболонок. З метою зниження маси конструкцій використовуються мінімальні товщини матеріалів оболонки, які дозволяють забезпечити необхідну міцність конструкції без втрати її функціональних властивостей. Це призводить до високих температурних градієнтів в матеріалі при циклічному нагріванні, що визначає складні напружено-деформовані стани конструкції.

Одразу ж, виникає обмеження щодо використання звичайних захисних покриттів з матеріалів, які можуть протистояти упередженому впливу агресивних хімічних факторів. Під час розробки КПО, важливо враховувати той факт, що термооптичні характеристики поверхні, які визначаються властивостями верхнього шару конструкційних матеріалів, такі як їх шорсткість, можуть зазнати значних змін під час орбітального польоту, переважно через сублімацію металів у вакуумі та вплив метеоритного пилу. У випадку тривалого контакту між фрагментами металевої поверхні КПО під впливом агресивних факторів можуть утворюватися міцні нероз'ємні з'єднання, які виникають через дифузійне зварювання. Цей фактор може послужити додатковим аргументом на користь вибору конструктивної схеми КПО кінцевого (багатоконусного) типу. Такий тип конструкції представляє собою єдину оболонку, яка, будучи в складеному стані, не має взаємних дотиків точок поверхні суміжних плоских дисків.

На основі порівняльного аналізу наявних класів КПО можна зробити висновок, що поєднання високої міцності оболонки з великими коефіцієнтами трансформації, при цьому забезпечуючи герметичність, можливе лише в твердих несучих оболонках. Серед них кінчні та багатоконусні перетворювані конструкції є найбільш оптимальними завдяки простоті технології зміни форми. Однак, відсутність сталості конструктивних рішень вимагає розробки універсальної методики для визначення основних геометричних параметрів.

Крім перелічених вище факторів, КПО, знаходячись в умовах космічного простору, піддається впливу численних факторів. Виходячи із поєднання агресивних хімічних факторів, термоциклічних, інерційних навантажень і т.ін., багатосекційні конструкції вимагають нестандартних підходів до їх оптимізації. Наприклад, при обчисленнях КПО на статичні та динамічні навантаження важливими є співвідношення між базовими розмірами профілю зварних з'єднувальних елементів суміжних секцій, розмірами та кількістю секцій, фізико-механічними властивостями конструкційного матеріалу та термооптичними характеристиками його поверхні, а також конфігурацією поверхні.

## **1.2 Методи забезпечення базових функціональних властивостей перетворюваних конструкцій**

Методи забезпечення базових функціональних властивостей (перша базова частота, коефіцієнт трансформації, вакуумщільність) в різних конструкціях включають в себе багато складових. Наприклад, в конструкціях сильфонного типу (Рис.1.2) використовуються окремі зворотні складки на кожному кутові й ділянці, а використання двох чи більше складок може значно знизити середню деформацію під час розгортання [29,30]. Більш того, використання множинної складки дозволяє створювати моделі, вільні від напруження як у складеному чи частково розгорнутому, так і в повністю розгорнутому стані без врахування напружень згину вздовж ліній самого згину. У випадку розглянутих вище «складок Міура» краще застосовується прямолінійне розгортання, це пов'язано зі ступенем деформації матеріалу під час розгортання, - в порівнянні з варіантом «складок Йошімури» лінії складок і грані деформуються значніше. Авторами [31] було доведено, що «зіркоподібний» зразок надає додатковий геометричний параметр, який може бути адаптований для синхронізації модулів та розгортання стрижня строго



по прямій лінії. Однак, ця залежність між геометрією та характеристиками розгортання не була повністю розкрита у зазначених роботах.

Отже, функціональні властивості описаних оболонкових перетворюваних конструкцій стрижневого типу залежать від геометрії складок, методу розкриття, матеріалу і т.д., а для поліпшення цих характеристик використовуються різноманітні методи надання трансформованим конструкціям стійкості та несучої здатності.

До цього часу було опубліковано багато оглядових робіт, присвячених суто актуальній проблемі збільшення жорсткості оболонкових перетворюваних конструкцій ([31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38] та ін.), і більшість з них написані авторами з промисловим досвідом. Запропоновано багато методів класифікації матеріалів розкривних конструкцій, здатних набувати та збільшувати жорсткісні властивості. Матеріали групуються за певними методами зміцнення: це смоли, що тверднуть під ультрафіолетовим випромінюванням (сонячним або ламповим), термореактивні смоли, смоли із так званим скловидним переходом, смоли, які твердіють під дією впливу газового середовища, так звані розтягнуті металеві ламінати, матеріали, що твердіють завдяки механізму випаровування чи осушування, полімери з пам'яттю форми, укріплюючі піни, фотолізуючі плівки з дрововими каркасами, а також вбудовані структурні компоненти.

Є кілька загальноприйнятих у науковій періодиці характеристик надувних жорстких стрижнів, на які кожен метод укріплення може впливати в більшій чи меншій мірі. Вимоги до використання зовнішньої енергії для зміцнення оболонки можуть варіюватися від нуля для деяких пасивно затверджуваних смол до значного постійного використання енергії, як це може бути у випадку термічно отвердних смол. Оборотно́сть процесу укріплення може дозволити більш ретельне наземне тестування космічного обладнання, а також дозволяє проведення місій з кількома циклами розгортання/складання. Дегазація (виділення газу або пари, збережених у матеріалі, особливо в вакуумі) зазвичай повинна бути мінімальною. У

продуктивності методів зміцнення у цій галузі спостерігаються значні відмінності. Рівномірність твердіння є проблемою для багатьох методів зміцнення на основі смол та випромінювання. Нерівномірне затвердіння або висихання може призвести до нерівномірного усадки та інших спотворень, що змінюють загальну форму конструкції. Жорсткість у різних термічних середовищах є характеристикою, яка мусить збільшити універсальність більшості місій. Діапазон досяжних розгорнутих геометричних форм також може значно залежати від типу методу зміцнення. Різняться й структурні властивості в розгорнутому стані, залежно від обраного методу зміцнення. Деякі композити дозволяють створювати досить міцні та жорсткі конструкції, тоді як, наприклад, розтягнуті металеві ламінати фундаментально обмежені за несучою здатністю. Стійкість у космічному середовищі є ключовим аспектом для місій, які можуть тривати кілька років після розгортання. Низький коефіцієнт теплового розширення (КТР) бажаний або потрібен для конструкцій, що підтримують точні прилади, такі як оптика, але може бути менш важливим для застосувань, де точна геометрія менш критична. Оцінюючи придатність конкретного методу зміцнення, необхідно враховувати ці характеристики, однак наявність самонесної здатності без використання додаткових джерел енергії є безумовно найліпшим варіантом конструктивного рішення. Далі розглянуто деякі з найбільш дієвих методів зміцнення, що наведені у дисертаційній роботі для порівняння ефективності застосування.

*Еластичні металеві ламінати* є найбільш використовуваними в космосі. Металеві ламінати складаються з тонких шарів пластичних металів (зазвичай алюмінію), з'єднаних з тонкими шарами полімерів. Зазвичай використовуються полімери типу BoPET (Mylar) і Каптон, металевий компонент додає структурної жорсткості, тоді як полімерний шар діє як пароізоляція та покращує міцність. Металополімерні ламінати використовують для формування обшивки надувних розбірних конструкцій. Після того, як структура повністю розгорнута, внутрішній тиск збільшується,

поки металевий компонент у ламінаті трохи не перевищить свою межу текучості, полімерний компонент завжди залишається еластичним. Після того, як газ випускається або виходить, навантаження від тиску знімається, і конструкція досягає стану попереднього напруження, в якому металевий компонент знаходиться в стані стиснення, а полімер - у стані розтягу. Конструкції з металевого ламінату набувають локальної жорсткості завдяки деформаційному зміцненню металу та в цілому через усунення недоліків (ліній згинів, складок) на поверхні ламінату під час текучості. Однак попереднє напруження зменшує здатність ламінату витримувати стиск. Були випробувані різні комбінації шарів, включаючи метал-полімер-метал, полімер-метал-полімер і двошарові ламінати [7,39].

NASA почало експериментувати з металевими ламінатами для застосування в космосі наприкінці 1950-х років [40], а пізніше успішно запустило алюмінієво-майларові ламінатні сфери для тестів пасивного зв'язку та експериментів з щільністю атмосфери: Explorer IX у 1961 році [41], Explorer XIX у 1963 році [47], і більший Echo II у 1964 році [42,39,43,44]. Компанія L'Garde за підтримки дослідницького центру Ленглі NASA експериментувала з надувними стрілами з металевого ламінату [45] і покращила структурні характеристики своїх стріл за допомогою спірального обгортання [46], (рис. 1.12,б).

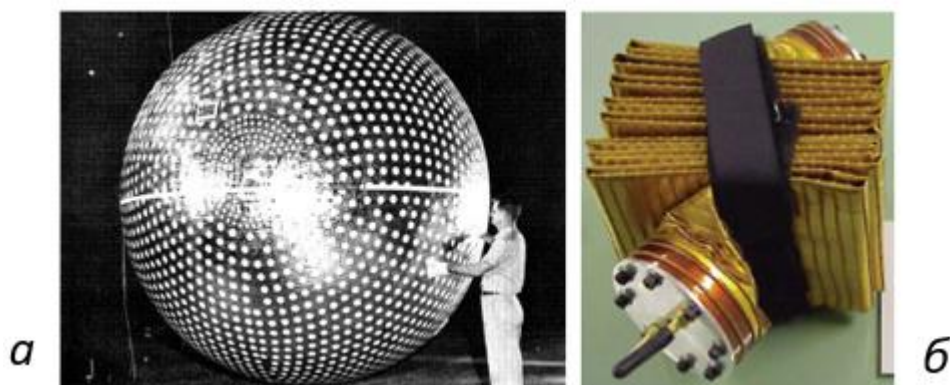


Рис. 1.12 Використання деформаційної жорсткості металополімерних ламінатів у супутнику Explorer XIX (а) [47] і стрілі зі згорнутою спіраллю (б) [46].

Подібна складка зменшує радіальні навантаження в стрілі, дозволяючи осевій деформації реалізовуватися більш повно [48]. Власну металеву ламінатну сферу також випустила компанія L'Garde [46]. Компанія EADS Astrium використала надувну стрілу каптон-метал-каптон-ламінат у запропонованому «двогранному» крилі для спуску з орбіти [49,50], а Senda et al. [7] досліджували надування та отвердіння складених орігамі циліндрів з алюмінієвого ламінату.

*Смоли, що затверджуються завдяки ультрафіолетовому опроміненню.* Починаючи з ранніх робіт у галузі УФ-фіксації смол [51,52], було досліджено комбінацію розкриття за допомогою піни з подальшим УФ-зміцненням оболонки, просоченої смолою [53,54], для затвердіння було використано ультрафіолетове випромінювання навколишнього середовища. Далі було продемонстровано використання УФ-зміцнення в надувних ізограткових штангах із застосуванням як природніх [55] (Рис. 1.13,а), так і лампових [56] джерел випромінювання (Рис. 1.13,б), а також вбудованих ламп, що працюють на різних довжинах хвиль, для надання жорсткості попередньо просоченим спеціальним розчином розкривним стрижневим конструкціям [3,57,58]. Лампи також використовувалися для успішного затвердіння невеликої ненадувної так званої павутинної конструкції під час параболічного польоту FOCUS [59]. Переваги надання жорсткості за допомогою УФ-випромінювання включають тривалий термін зберігання, низьку дегазацію і широкий вибір можливих форм застосування. Використання сонячного випромінювання для затвердіння дає можливість суто пасивного процесу затвердіння, тоді як використання ламп дозволяє більш точно контролювати затвердіння за рахунок більшої складності системи та споживання електроенергії. Вибір армуючих волокон зі смолами для використання з УФ-випромінюванням обмежений разом з товщиною стінки конструкції, оскільки для повного затвердіння УФ-випромінювання має проникати в усі шари твердого ламінату. Слід зауважити, що багато

типів високоміцних волокон, таких як графіт, не пропускають УФ-промені і їх використання обмежено.



Рис. 1.13 Затвердіння смол УФ-випромінюванням з використанням сонячного випромінювання (а) [55] та ламп для затвердіння (б) [57].

Крім того, полімерні камери, які використовуються для утримання газу, що наповнює конструкцію, також можуть запобігати проникненню хвиль із необхідними довжинами до жорсткої конструкції. Можливість нерівномірного затвердіння та деформації може бути великою при використанні радіації навколишнього середовища як затверджувача. Нарешті, УФ-жорсткість є незворотною, що ускладнює використання та наземні випробування космічного обладнання.

*Склоподібні смоли.* Багато матеріалів, включаючи полімери, демонструють зміну стану, яка називається склуванням, яке завжди відбувається нижче температури плавлення і не є фазовим переходом. Кристалічний компонент полімерів втрачає свою тверду форму лише під час плавлення, а аморфний компонент змінює рухливість при температурі склування, що призводить до утворення каучукоподібного полімеру. Ця властивість використовується в надувних стрижневих оболонках для створення структури, яка самозастигає при температурі нижче певної після розгортання. Так, в роботах [60,13,61,62,63,64] описано практичне використання даного ефекту в циліндричній оболонці (Рис. 1.14) та в сонячному вітрилі завдовжки 20 м [65,67].

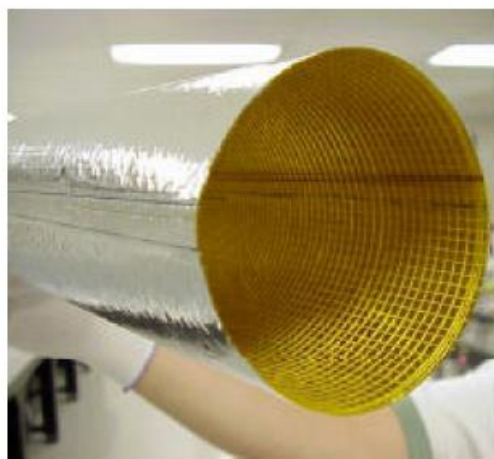


Рис. 1.14 Внутрішній вигляд надувної оболонкової конструкції з волокнами, просоченими смолою, що орієнтовані по діаметру та в осьовому напрямку [13].

Описані експерименти зі смолами зі значеннями температурного зміцнення 50; 20; 0 та  $-20^{\circ}\text{C}$  [66], і також було виконано льотні випробування технології зміцнення кевларом в рамках експерименту Sibola [15]. Додаткові експерименти зі смолами були проведені ВПС США (USAF), які розробили стрілу RIGEX [68] з використанням смоли з ефектом склування, тоді як компанія ILC Dover запропонував використовувати подібні смоли для так зв. гексапода [69], а також експериментував із полімерами з ефектом склування з пам'яттю форми (SMP) [70,71,72,73]. SMP імітують поведінку сплавів з пам'яттю форми та природним чином відновлюють свою попередньо нагріту форму при нагріванні вище їх температури склування ( $T_g$ ). Ця незвичайна поведінка дозволяє створювати більш складні саморозгортні структури, ніж можна досягти за допомогою лише розкриття. Хоча полімери зі склуванням зазвичай не такі жорсткі, як термореактивні смоли, оборотність процесу твердіння робить можливим багаторазове розгортання і полегшує наземні випробування компонентів. Перед розгортанням композити, у яких використовуються так звані суб- $T_g$  смоли, зазвичай потрібно нагріти, щоб забезпечити необхідну гнучкість. Після повного розгортання, отвердіння конструкції відбувається пасивно при її охолодженні. Складною особливістю жорстких конструкцій з ефектом склування є вимога постійного утримання

розгорнутої конструкції нижче  $T_g$  і, швидше за все, вимагатиме використання багатошарового теплового захисту для захисту конструкції від сонячного випромінювання та інших джерел тепла.

*Структури із використанням фотолізації* було практично досліджено в експериментах ВПС США OV1-8 (Рис. 1.15) і AVL-802 (Gridsphere) [74]. Обидві конструкції були сферами, що склалися з тонкої плівки з інтегрованою сіткою. Під час розгортання тонка плівка діяла як оболонка, яка витягувала дротяний каркас у сферичну форму, і дріт створював жорсткий каркас.



Рис. 1.15 Супутник OV1-8 із надувною оболонкою, що піддається фотолізу, із вбудованою дротяною сіткою [74].

Через деякий час плівка фотолізується (випаровується) під дією сонячного випромінювання, залишаючи дротяний каркас, що виконує функції «пасивного супутнику зв'язку», який відбиває певні частоти електромагнітного випромінювання як суцільна сфера, але має набагато менший аеродинамічний опір.

Далі, розкривні оболонкові конструкції з використанням певних смол можна робити гнучкими за допомогою пом'якшувальних розчинників. Композитний матеріал оболонки, покритий пароізоляційним шаром, запобігає випаровуванню розчинника під час зберігання. Якщо ділянки бар'єру зробити проникними для розчинника, і ті самі секції згорнути або зкрутити під час зберігання, тоді затвердіння відбудеться лише після розгортання. Експерименти із гідрогелями під час створення надувної

жорсткої конструкції IRSS, яка стає жорсткою за допомогою дегідратації описано в [75,76], (Рис. 1.16).

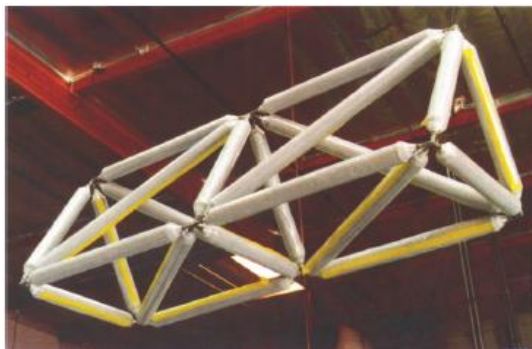


Рис. 1.16 Ферма IRSS з використанням гідрогелевого зміцнення [80].

Полівініловий спирт і навіть желатин були запропоновані як відповідні матеріали, що твердіють при випаровуванні [51,77,78]. Метод надання жорсткості за допомогою випаровування спочатку був привабливим через простоту процесу, доступність відповідних матеріалів і відсутність енергозатрат. Придатність методу для сучасних космічних застосувань обмежена дуже великим виділенням газів ( $>15\%$  загальної втрати маси) та ймовірністю нерівномірного висихання та усадки.

Отже, виконаний огляд існуючих прототипів розроблюваної конструкції вказує на два ключові виклики при проектуванні розкривних пневматичних (надувних) космічних конструкцій – це вибір раціональної схеми згортання та методу забезпечення міцності оболонки. Схема згортання повинна забезпечувати найбільшу компактність конструкції, а також надійну та передбачувану динаміку розгортання. Міцність після розгортання забезпечує необхідну жорсткість конструкції для реалізації її несної здатності, а також довгострокового використання в умовах космічного простору. Циліндричні стрижневі оболонкові конструкції є важливою категорією надувних космічних конструкцій, оскільки вони утворюють основні елементи трьохвимірних конструкцій і використовуються як опорна структура для багатьох об'єктів, включно з сонячними параболічними вітрилами та сонячними батареями. Тим не менш, розглянутий широкий



спектр схем згортання для надувних циліндричних стрижнів демонструє, що класичні оболонки зі z-подібною згорткою мають непередбачувану динаміку розгортання. Альтернативою є використання схем згинання за принципом орігамі, а також телескопічних конічних стрижнів. Технологія конічних стрижнів з полімерних матеріалів була протестована в ході льотних випробувань, але використання схем згинання за принципом орігамі наразі має низький рівень готовності до використання. Зокрема, зв'язок між геометрією схеми згинання та кінетикою розгортання стрижневих оболонок не належним чином встановлений та обмежено презентований у світовій науковій періодиці. Таким чином, розкривні оболонки багатоконусного типу мають декілька безсумнівних переваг стосовно високої компактності, динаміки та надійності розкриття, обумовленою унеможливленням дифузійного зварювання дотичних фрагментів складених поверхонь в умовах високого вакууму.

Як висновок з огляду, проблема забезпечення міцності та стійкості оболонки залишається головною та остаточно не вирішеною. Узагальнення технологій зміцнення демонструє велику різноманітність застосовуваних хімічних, фізичних та механічних процесів, жоден з пропонованих методів не є бездоганним, маючи свої переваги і обмеження, але практичне застосування в космосі обмежується лише декількома методами зміцнення синтетичних матеріалів оболонок, такими як розтягнуті металеві ламінати та смоли з підтримуваною температурою склування. Головні технологічні проблеми - нерівномірне затвердіння, спотворення поверхні під час затвердіння або висихання, ненадійність затверджуючого компонента (сонячне випромінювання, газ, піна, лампи) та вимоги до складного додаткового обладнання, такого як теплові ковдри, що також повинні компактно складатися. Отже, подальший прогрес використання стрижневих оболонок з металевих матеріалів має наочні переваги завдяки відсутності необхідності додаткових технологій зміцнення, але потребує всебічного вивчення, зокрема, в аспекті надійності нероз'ємних з'єднань та

прецизійності розкриття, обмеженої пружними властивостями металевих матеріалів конструкції.

Характерний варіант концепції практичного застосування самонесної перетворюваної конструкції періодичного профілю (КПО) для відведення та утримання наукової апаратури (НА) на відстані від базового космічного модулю Міжнародної космічної станції (МКС) наведено на Рис.1.17. Досліджувані в роботі сполучення геометричних та функціональних властивостей розроблюваної КПО наведені в п.2.1 роботи та базуються на вихідних діапазонах параметрів, регламентованих Договором №YN-OBI-23260 про співпрацю між ДП«КБ «Південне»» та ІЕЗ ім.Є.О.Патона НАНУ. Загалом,

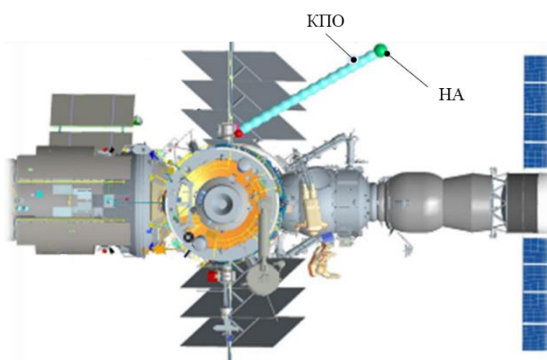


Рис.1.17 Схема розміщення КПО на службовому модулі МКС [28]

конструктивна схема КПО має відповідати найкращому поєднанню масогабаритних характеристик при заданій компактності і забезпечувати стійкість до впливу зовнішніх і експлуатаційних факторів. Базові регламентовані вимоги до КПО відповідають наступним діапазонам параметрів:  $L = 3000 \pm 0,025$  м;  $300 \text{ мм} \leq D \leq 400 \text{ мм}$ ;  $K_t = 10 \pm 0,25$ ; перша (базова) частота власних коливань: 2...10 Гц; корисне навантаження (НА): еквівалентна маса 10-15 кг у земних умовах.

Для реалізації поставленої мети роботи визначено такі **завдання досліджень**:

1. Визначення оптимального співвідношення геометричних параметрів конструкції.

2. Отримання необхідної просторової жорсткості створюваної конструкції, яка характеризується першою (базовою) частотою власних коливань.
3. Розробка технології зварювання оболонкових елементів конструкції зі сталей фольгового класу товщин, що здатні проходити цикли екстремальних деформувань без втрати рівномірності шва, зони термічного впливу (ЗТВ) та основного металу
4. Розроблення методики динамічного неруйнівного контролю нерозємних з'єднань перетворюваних оболонок безпосередньо в процесі зварювання.
5. Виготовлення дослідного зразка перетворюваної конструкції, експериментальна валідація її характеристик, отриманих шляхом чисельного експерименту.

## Розділ 2. МЕТОДОЛОГІЯ СТВОРЕННЯ ДОВГОМІРНОЇ КПО

### **2.1 Методологія створення металевої довгомірної перетворюваної конструкції оболонкового типу. Визначення можливих варіантів геометричної конфігурації конструкції, у яких забезпечується необхідна компактність.**

Основним завданням розробки металевої конструкції перетворюваного об'єму (КПО) з конічних секцій є визначення її конструктивної схеми, яка відповідає найкращому поєднанню масогабаритних характеристик, високої компактності і стійкості під дією експлуатаційних навантажень і факторів космічного простору (ФКП). Умови механічного навантаження (ФКП) приймаються відповідно до вимог МКС; основними є циклічні температурні впливи, а також інерційні та вібраційні навантаження при коефіцієнті безпеки, що дорівнює 2,0. Базовим параметром конструкції обрана її довжина  $\sim 3$  м, яка дозволяє використовувати КПО як висувний несучий елемент для здійснення позакорабельної діяльності за межами власної зовнішньої атмосфери космічних апаратів (ВЗА КА). Для здатності виконання основного призначення конструкції - утримання корисного навантаження (наприклад, масс-спектрометру) на відстані від базового космічного модуля, необхідно забезпечити стійкість консольно закріпленої оболонки зазначеної довжини із корисним навантаженням за умови її максимального діаметру у межах  $300 \leq D \leq 500$  мм, обумовленого габаритами шлюзового отвору КА-носія. Коефіцієнт трансформації  $K_T$ , тобто співвідношення довжини КПО у компактному та робочому стані, повинен дорівнювати  $K_T \geq 10$  і обумовлений габаритними розмірами транспортного відсіку базового модуля. Очевидне прагнення до зменшення маси оболонки обмежене мінімальною товщиною її оболонки, яка повинна забезпечити достатню жорсткість конструкції, що запобігає втраті стійкості в умовах дії інерційних та теплових навантажень. Відповідно, жорсткість конструкції характеризується її першою (базовою)

частотою власних коливань та аналізується у роботі за допомогою чисельних та експериментально-розрахункових методів.

Завданням дослідження на першому етапі є визначення оптимальних співвідношень геометричних параметрів конічних секцій КПО, включаючи їх товщину і параметри кільцевих складок, що утворюються при компактному перетворенні, при яких оболонка конструкції з обраного матеріалу має найбільшу стійкість під дією зовнішніх навантажень. Отже, для визначення конструктивної схеми багатоконусної КПО повинно одночасно вирішуватися кілька взаємозалежних завдань: визначення можливих варіантів геометричної конфігурації конструкції, у яких забезпечується необхідна компактність; вибір конструкційного матеріалу, при використанні якого можливість компактного перетворення оболонки поєднується з її необхідними характеристиками міцності і не порушує необхідної герметичності; визначення відповідності жорсткості, міцності та стійкості кожного з варіантів конфігурації конструкції з обраного матеріалу.

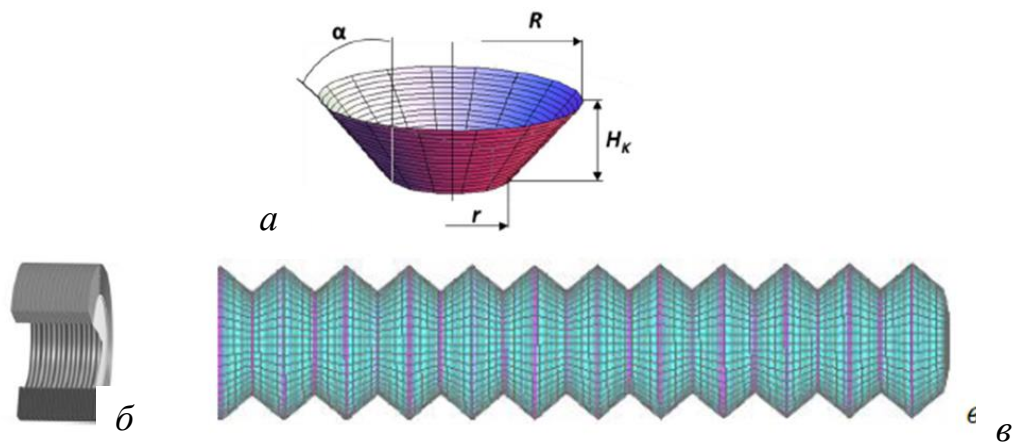


Рис.2.1 Усічена конічна секція КПО (а) та конструктивна схема багатосекційної КПО в компактному (б) та розкритому (в) положенні

Висота  $H_K$  усіченої конічної секції КПО (Рис.2.1) визначається кутом конусності і співвідношенням діаметрів її основ  $D/d$  ( $D=2R$ ;  $d=2r$ ). Відносна висота секції  $H_K/D$  обмежена насамперед вимогами до жорсткості конструкції, оскільки базова частота при незмінній товщині оболонки зростає при  $d \rightarrow D$ . Отже, для створення довгомірної конструкції потрібно об'єднання

послідовності конічних секцій контурами великих і менших основ. Формозміна усіченої конічної секції до компактного стану реалізується за допомогою запропонованого ІЕЗ ім. Є.О. Патона методу послідовного дзеркального відображення ділянок поверхні  $Q_1...Q_n$  відносно еквідистантних паралельних площин  $\gamma_1... \gamma_n$  (Рис.2.2,*а*), при якому перетворення близьке до ізометричного і відбувається з мінімально можливими розтягуваннями та стисненнями серединної поверхні тонкої оболонки. Послідовність перетворених ділянок поверхні  $Q_1...Q_n$  при використанні тонколистових металів набуває вигляду (Рис.2.2,*б*), що пояснюється обмеженнями на мінімально допустимий радіус згину матеріалу. Дане обмеження є одним з основних факторів, що визначають крок складки  $b$ , кількість кільцевих складок  $n$  при заданому куті конусності  $\alpha$ , і компактність оболонки  $K_T$  багатоконусної КПО:

$$K_T = 2 \cdot n = \frac{2 \cdot S \cdot \sin \alpha}{b} \quad (1) [26]$$

Кількість гофрів  $n$  визначається далі розрахунково-аналітичним шляхом і залежить головним чином від товщини конструкційного матеріалу, а також від його пружно-пластичних властивостей та значення радіусу меншої основи конічної секції. Таким чином, при рівних  $D$ ,  $\alpha$  і  $K_T$  оболонка з меншою товщиною має і меншу висоту  $H_K$ , а значить, великий діаметр  $d$ , а  $n$  збільшується при зменшенні товщини матеріалу конічної секції.

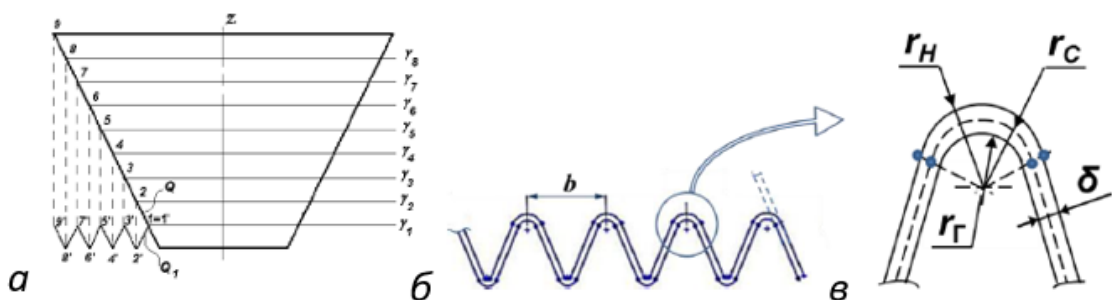


Рис.2.2 Схема перетворення серединної поверхні усіченої конічної оболонки (*а*), послідовність перетворених ділянок поверхні  $Q_1...Q_n$  при використанні тонколистових металів (*б*) та схема згинання однієї складки (*в*)

Мінімально допустимий радіус згину матеріалу вибирається виходячи з умови мінімальності розтягування серединної поверхні оболонки (Рис.2.2,в). Як початковий критерій може бути взята залежність, що використовується в теорії обробки металу тиском для визначення допустимого значення утоншення матеріалу ( $\Delta\delta$ ) у вершині складки, яка добре поєднується з емпіричним досвідом ізометричного перетворення металевих оболонок аналізованих товщин (Рис.2.2, в):

$$\Delta\delta = \frac{\delta^3}{4 \cdot (2r_c + \delta)^2} \quad (2)$$

$\Delta\delta$  – допустиме утоншення матеріалу;  $\delta$  – товщина матеріалу;  $r_c$  – зовнішній радіус згину. При  $r_c/\delta \geq 4,5 \dots 5$  зменшення товщини матеріалу при згинанні не перевищує похибки за товщиною, допустимою в тонколистовому прокаті товщиною  $\geq 0,15$  мм; при цьому, у вершинах складок немає формування концентраторів напружень, достатніх для спотворення кінцевої геометрії перетвореної оболонки. Очевидно, що величина відносного подовження матеріалу, що використовується, повинна перевищувати величину відносного розтягування  $\Delta l$  зовнішньої поверхні оболонки у вершині складки (Рис.2.2,в) :

$$\Delta l = \frac{\delta}{(2r_r + \delta)} \quad (3)$$

Прийнятність модельних матеріалів з різними фізико-механічними характеристиками для деформування та забезпечення функціональних властивостей КПО буде розглянута далі. Для виготовлення деформованої оболонки КПО може бути використаний досить широкий діапазон металів за умови достатнього запасу пластичності, зокрема, з відношенням умовної межі плинності  $\sigma_{0,2}$  до межі міцності  $\sigma_B$  в діапазоні  $\sigma_{0,2}/\sigma_B = 0,3 \div 0,8$  [26],[28]. В якості модельних матеріалів при визначенні конструктивної схеми КПО обрані нержавіюча сталь і титан, що широко використовуються в космічному апаратобудуванні. Для остаточного вибору конструкційного матеріалу перетворюваної оболонки розглянуті як первинні фактори, що визначають механічну поведінку КПО (наприклад, нержавіюча сталь забезпечує меншу

деформативність конструкції завдяки значенню модуля пружності, в  $1,5 \div 2$  рази більшому в порівнянні з титаном), так і вторинні (наприклад, терморадіаційні властивості поверхонь розглянутих матеріалів, що визначають їхню температуру в умовах вакууму космічного простору).

Слід зазначити, що визначення радіусу складок за мінімальним радіусом вигину матеріалу не враховує складного комплексу дотичних, кільцевих і мембранних напружень, що виникають при взаємодії оболонки з формуючим інструментом. Коректне визначення напружено-деформованого стану (НДС) аналізованої конструкції не має аналітичних рішень і може здійснюватися методом скінченно-елементного аналізу; для побудови первинних геометричних моделей використовувалися прості залежності, що дозволяють забезпечити дотримання критичних технологічних параметрів.

Наступним фактором, що визначає крок  $b$  для матеріалу усіченої конічної секції, є прагнення до зниження кільцевих деформацій у процесі її компактного складання та подальшого розкриття. Технологія ізометричного згинання дозволяє зосередженим зусиллям формувати складку металевої конічної оболонки таким чином, що перетворення деякої т.  $X$  в т.  $X'$  (Рис.2.3, а) відбувається без зміни радіусу  $R_F$ , тобто без розтягнення умовного кола, якому належить ця точка. Однак, при подальшому розкритті оболонки надлишковим тиском газу вже сформовані кільцеві ребра жорсткості у вершинах складок переміщуються в радіальному напрямку (Рис.2.3, б, в), при цьому жорстке кільце з радіусом  $R_F$  зміщується до радіусу  $R_F + n$  (Рис.2.3, б) і стимулює втрату стійкості бічних поверхонь складки. З цієї причини величина кроку складки  $b$  і її глибина  $a$  (Рис.2.3, в) для початкової моделі вибираються приблизно рівними, коли кут конусності вихідної гладкої оболонки  $\alpha = \arctg 0,5 \approx 26 \dots 27^\circ$  (Рис.2.3, в). У цьому випадку зміна радіусу формування складки  $\Delta R_F$  не перевищує  $b/4$ , і для тонких оболонок із співвідношенням  $b/R_F \leq 0,04$  величина відносних кільцевих деформацій матеріалу у вершині складки не перевищує діапазону значень  $\varepsilon_K \approx 0,02 \dots 0,04$ , що дозволяє виключити явище локальної втрати стійкості бічних поверхонь



складок у процесі їхнього розкриття. Зменшення кута конусності дозволяє підвищити стійкість КПО до дії неосесиметричних навантажень і підвищити частоту її власних коливань, але призводить до критичного зростання  $\varepsilon_K$  і, як наслідок, до порушення рівномірності розкриття конструкції.

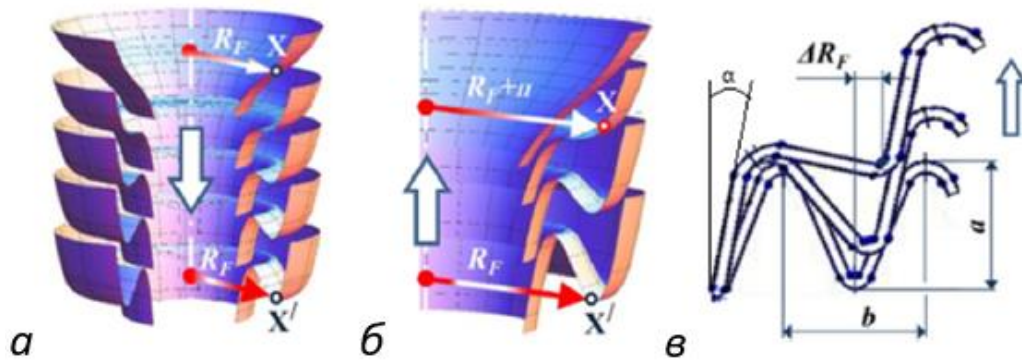


Рис.2.3 Схема формування складки конічної секції КПО (а) та її подальшого розкриття (б, в);  $R_F$  - радіус формування складки;  $\Delta R_F$  - зміщення радіусу формування складки;  $\alpha$  – кут конусності базової гладкої оболонки;  $b$  – крок складки;  $a$  – глибина складки (на Рис. 2.3, в).

При утворенні складчастої поверхні з конічної заготовки нижні складки (Рис.2.3,в) послідовно формуються вертикальним зусиллям спеціального пристрою (пуансона), при цьому верхні складки формуються на опорних ребрах, що мають той самий радіус заокруглення, що й у пуансона ( $r_c \geq 4,5 \dots 5\delta$ , Рис.2.2). Наведений у [28], та ін. для матеріалів з  $\delta = 0,1 \dots 0,2$  мм діапазон  $b = (26 \div 29)\delta$  може бути дещо збільшений для більших товщин для компенсації більш високих мембранних напружень. Для початкової моделі оболонки залежність кроку складки  $b$  від товщини матеріалу може бути виражена наближеним співвідношенням при якому технологічний зазор між пуансоном, бічною поверхнею складки товщиною  $\delta$  і опорним ребром становить  $2\delta$  (Рис.2.2):

$$b = 4 \cdot r_c + 10 \cdot \delta \quad (4)$$

Далі, конструктивна схема КПО повинна відповідати найкращому поєднанню масогабаритних характеристик при заданій компактності та

забезпечувати стійкість до дії зовнішніх та експлуатаційних факторів; при цьому будь-який із показників (мінімальна маса чи діаметр) перестає бути пріоритетним, та їх можливі поєднання визначаються при початковому проектуванні. Тим не менш, самонесна здатність (жорсткість) конструкції, що оцінюється за першою (базовою) частотою власних коливань при модальному аналізі, є її унікальною позитивною властивістю. Для попереднього визначення допустимих співвідношень геометричних параметрів конструкції, загальні взаємозв'язки яких були представлені вище, було проведено порівняння модальних характеристик варіантів багатоконусних оболонок з циліндричними оболонками за умови їх рівної довжини ( $L \sim 3$  м), рівної товщини конструкційного матеріалу (нержавіюча сталь і титан) і при діапазоні діаметрів, починаючи від меншого значення в діапазоні заданих максимальних діаметрів зрізаної конічної секції ( $D = 300$  мм). Співвідношення  $D/L = 1/10$  (тобто  $D \sim 300$  мм) було попередньо обрано для розрахунків на підставі відомих аналітичних рішень для циліндричних, найбільш стійких до неосесиметричних навантажень, оболонок як мінімальна конфігурація для набуття стійкості до характерних (експлуатаційних) навантажень. Товщина матеріалу вибиралася з кроком  $0,05$  мм починаючи з мінімального технологічно прийнятного значення  $\delta = 0,15$  мм, при якому прагнення до зниження маси конструкції не суперечить можливості отримання зварних з'єднань фольгових матеріалів, що згодом екстремально деформуються і зберігають необхідну згідно з вимогами до оболонок космічного призначення під надлишковим тиском герметичність із коефіцієнтом протікання на рівні  $1,3 \times 10^{-6}$  Па·м<sup>3</sup>/с. Вибір циліндричної оболонки як еталонної для порівняння пояснюється, як було зазначено вище, її найбільшою жорсткістю при консольному закріпленні. Перевагами багатоконусних КПО порівняно з циліндричними перетворюваними конструкціями рівної маси і довжини є, в першу чергу, значно більш висока компактність  $K_T$  і здатність компенсувати без втрати стійкості великі значення зовнішніх навантажень.

Дослідження модальних характеристик дає можливість визначення кінцевих властивостей конструкції в процесі варіювання її геометрії - товщини стінки, висоти конічних секцій, їх кількості і т.ін. Для порівняння модальних характеристик з циліндричними оболонками були побудовані скінченно-елементні моделі КПО, що відповідають товщинам матеріалу 0,15 мм, 0,25 мм та 0,4 мм; відповідно, при куті конусності  $\alpha \sim 27^\circ$  різниця радіусів ( $R - r$ ) вихідного усіченого конуса (заготівлі) секції КПО становить 23 мм для КПО з товщиною матеріалу оболонки  $\delta = 0,15$  мм (Рис.2.4,*а*), 36 мм для товщини  $\delta = 0,25$  мм (Рис.2.4,*б*) та 63 мм для товщини матеріалу  $\delta = 0,4$  мм (Рис.2.4,*в*). Для кожної з конструктивних схем КПО *а*, *б* та *в* були побудовані варіантні моделі з різними радіусами, але за умови сталості співвідношення ( $R - r$ ) і  $H_K$  (Рис.2.1). Мета побудови варіантних моделей – оцінка впливу збільшення діаметра конструкції при незмінній висоті  $L=3$  м зростання її першої базової частоти коливань і зміну її масогабаритних характеристик.

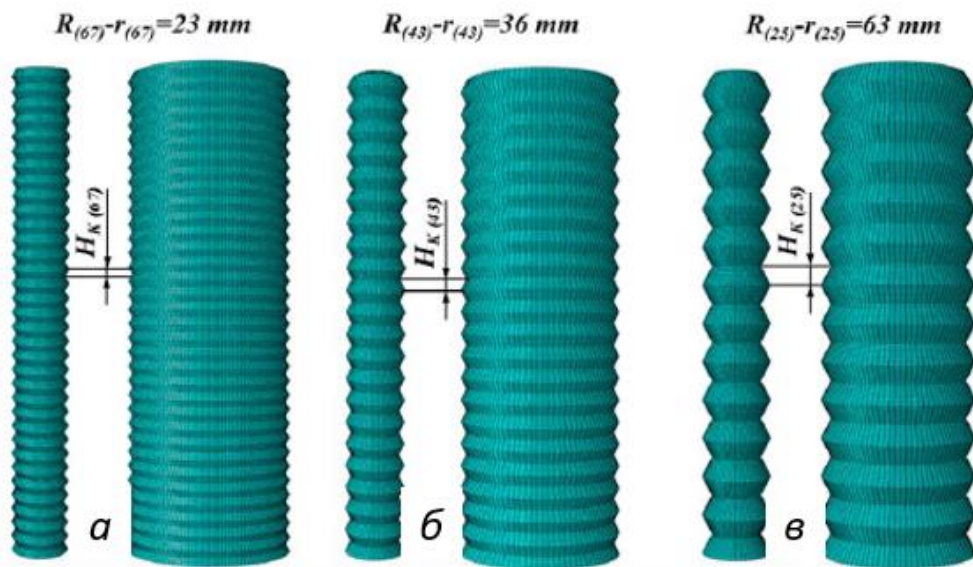


Рис.2.4 Варіантні скінченно-елементні моделі КПО з товщиною матеріалу оболонки 0,15 мм (*а*), 0,25 мм (*б*) та 0,4 мм (*в*)

### 2.1.1 Визначення власних частот коливань конструкції

Аналіз жорсткості КПО у розкритому стані за її першою (базовою) частотою власних коливань має ключове значення при визначенні конструктивної схеми оболонки періодичного профілю, головною функціональною характеристикою якої окрім компактності є несна здатність. Як система з безперервно розподіленими параметрами оболонка має нескінченну кількість частот власних коливань, кожній з яких відповідають вид і форма коливань, що характеризуються переміщенням точок її поверхні. Для оболонок розрізняють радіальні, тангенціальні та поздовжні види коливань. Для класифікації форм коливань оболонок використовуються значення числа напівхвиль  $k$  у поздовжньому напрямку та їх числа  $n$  в окружному напрямку. Точки поверхні, переміщення яких дорівнюють нулю, утворюють вузлові лінії (твірні).

Для обчислення власних частот першої форми коливань моделі застосовувався модальний аналіз у розрахунковому середовищі Abaqus/CAE 2018 з використанням модуля Frequency. Рівняння визначення кутової частоти коливань ( $\omega=f/2\pi$ ) за допомогою скінчено-елементної (СЕ) моделі має вигляд:

$$(-\omega^2[M] + [K])\{\varphi\} = 0, \quad (5) [26]$$

де  $[M]$  – матриця маси,  $[K]$  – матриця жорсткості,  $\{\theta\}$  – власний вектор (мода вібрації).

Якість розрахункової сітки впливає на точність одержуваних результатів, збіжність процесу і на час, необхідний для вирішення завдання. Використання моделей із великою сіткою дає результати, занижені на 20-40% в порівнянні з дійсними значеннями. Зменшення розмірів елемента до прийнятного рівня забезпечує необхідну деталізацію розрахункової моделі та більш достовірних результатів. Однак, використання скінченних елементів вищого порядку не завжди призводить до збільшення точності результатів, а

в деяких випадках є нераціональним. Невиправдане «згущення» скінчено-елементної сітки також призводить до накопичення помилки обчислень, яка, при досягненні певної кількості елементів, значно впливає на точність результатів. Для визначення оптимального розбиття моделі на скінченні елементи було проведено таку процедуру:

- створення декількох скінченно-елементних сіток, кількість елементів в яких послідовно збільшується;
- оцінка якості скінченно-елементних сіток;
- вибір оптимальної скінченно-елементної сітки.

Було обрано оптимальну скінченно-елементну сітку з мінімальною кількістю елементів, при якій частота залишається незмінною (Рис.2.5).

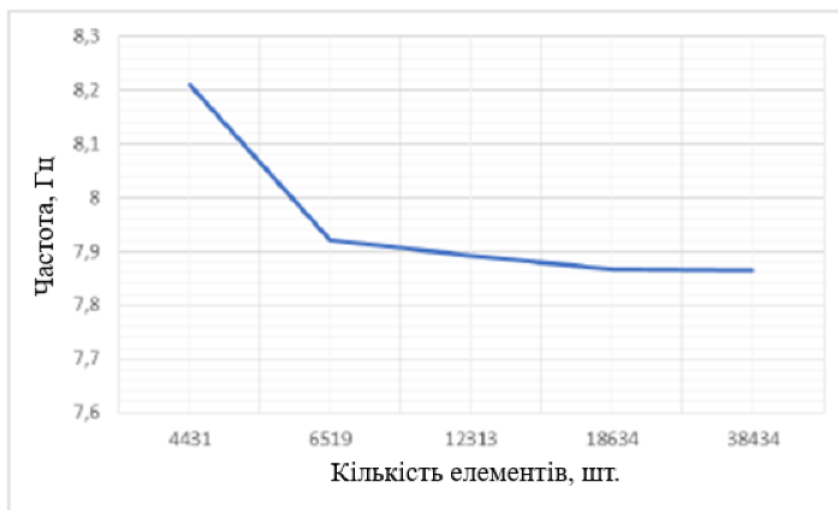


Рис.2.5 Залежність розрахункового значення власної частоти коливань КПО ( $\delta=0,4$  мм,  $D=500$  мм) кількості скінченних елементів чисельної моделі

Як приклад з підбору оптимальної скінченно-елементної моделі була розглянута сітка КПО, що складається з 25 гладких конусів із зовнішнім діаметром 500 мм. Оскільки конструкція є тонкостінною (товщина стінки від 0,15 мм до 0,4 мм), розрахункова модель створювалася на основі оболонкової конструкції за допомогою скінченних чотирикутних елементів типу «shell». Кут кожного з елементів поверхні стінки КПО дорівнює  $90^\circ$ , розмір елемента  $24 \times 12$  мм, кількість елементів - 18364. Використання такої геометрії елемента

дає можливість знизити їх кількість, не втрачаючи при цьому точність рішення.

Додатково, з прикладу циліндричної оболонки з  $D=500$  мм було розглянуто вплив товщини стінки циліндричної оболонки на частоту її власних коливань - вільних коливань, що визначаються характеристиками самої системи (Рис.2.6). Як бачимо, збільшення товщини оболонки призводить до збільшення частоти власних коливань. Вигин на графіку на рівні товщини стінки  $\delta = 0,6$  мм пов'язаний зі зменшенням кількості хвиль в окружному напрямку з  $n=4$  до  $n=3$  за рахунок зміни геометричних характеристик, що призводить до більш плавного підвищення частоти внаслідок збільшення товщини стінки оболонки.

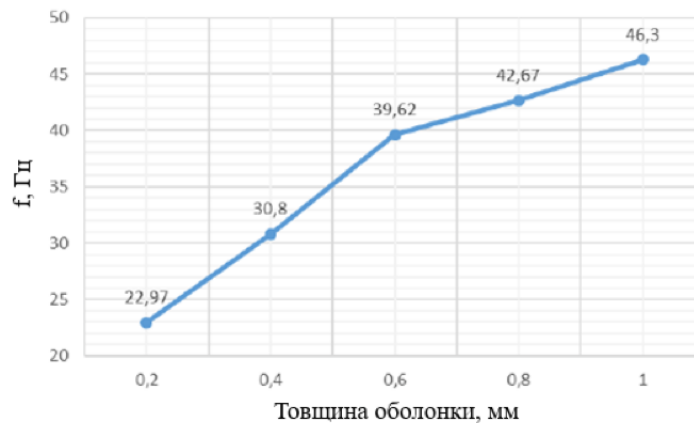


Рис.2.6 Залежність частоти власних коливань циліндричної оболонки з  $D=500$  мм від товщини її стінки

Результати розглянутого прикладу показали, що залежність власної частоти коливань циліндричної оболонки має явно виражену нелінійну залежність від геометричних параметрів. Збільшення маси оболонки за рахунок підвищення товщини стінки та діаметра оболонки, яке супроводжується збільшенням її маси, не призводить до прямо пропорційного підвищення власної частоти, що ускладнює досягнення її необхідних значень лише за рахунок зміни даних геометричних параметрів.

Результати розрахунку власних частот коливань варіантних скінченно-елементних моделей КПО з товщиною оболонки 0,15 мм, 0,25 мм і 0,4 мм

(Рис.2.4) і циліндричних оболонок для двох модельних матеріалів (нержавіюча сталь,  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 200$  ГПа,  $\nu = 0.3$ , титан,  $\rho = 4500$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 110$  ГПа,  $\nu = 0.3$ ) представлені в Табл.1 - Табл.4 (Рис.2.7 – 2.10)

**Таблиця 1** Порівняння власних частот коливань варіантних моделей циліндричних і конічних оболонок завтовшки  $\delta = 0,15$  мм. Матеріал – нержавіюча сталь ( $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=200$  ГПа,  $\nu=0.3$ )

Рис. №2.7	Тип оболонки	Параметр			
		d	D	Частота f	Маса
		мм	мм	с <sup>-1</sup>	кг
	Циліндрична $\delta=0.15$ мм	300	300	25,09	3,38
		350	350	22,82	3,96
		400	400	21,42	4,55
2.7 а	$\delta=0.15$ мм 67 конічних секцій	300	346	3,57	4,14
		350	396	3,69	4,8
2.7 б		454	500	3,87	6,19
2.7 в		954	1000	4,31	13,13

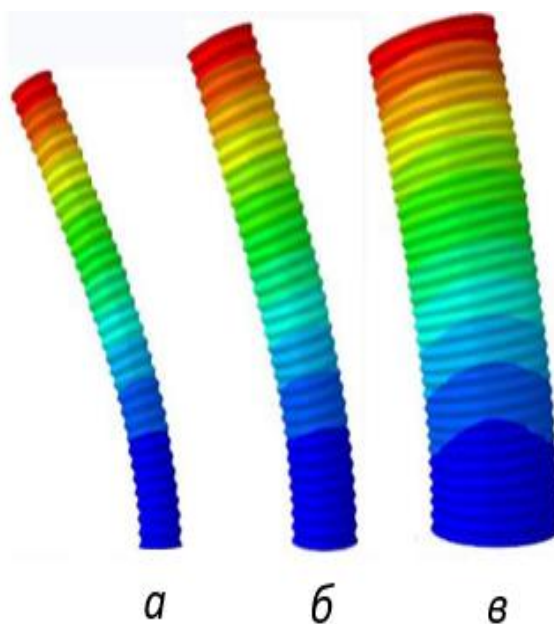


Рис.2.7 Загальні переміщення оболонок за першої власної частоти коливань для 67-конусної конструкції:  $D = 346$  мм (а),  $D = 500$  мм (б) та  $D = 1000$  мм (в)

**Таблиця 2** Порівняння власних частот коливань варіантних моделей циліндричних і конічних оболонок завтовшки  $\delta = 0,25$  мм. Матеріал – нержавіюча сталь ( $\rho = 7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E = 200$  ГПа,  $\nu = 0.3$ )

Рис. №2.8	Тип оболонки	Параметр			
		d	D	Частота f	Маса
		мм	мм	с <sup>-1</sup>	кг
	Циліндрична $\delta = 0.25$ мм	300	300	30,03	5,64
		350	350	29,54	6,61
		400	400	27,84	7,58
2.8 а	$\delta = 0.25$ мм 43 конічні секції	300	372	5,24	7,08
		350	422	5,42	8,16
2.8 б		428	500	5,64	9,86
2.8 в		928	1000	6,32	21,22

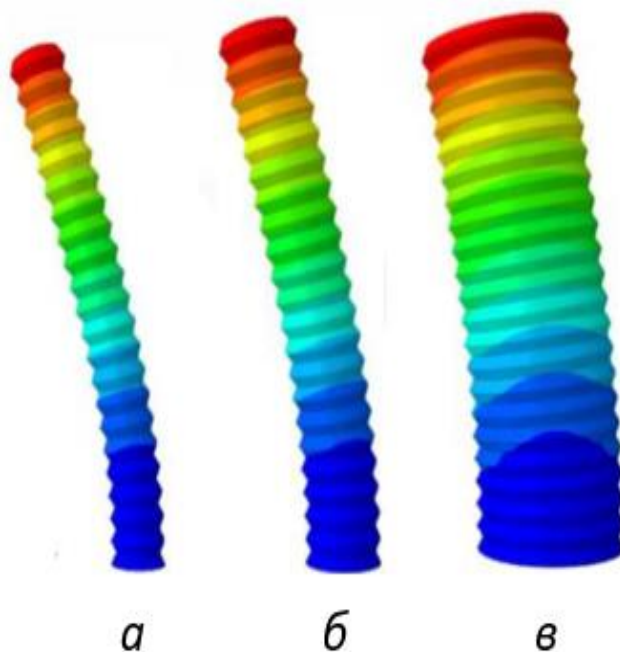


Рис.2.8 Загальні переміщення оболонок за першої власної частоти коливань для 43-конусної конструкції:  $D = 372$  мм (а),  $D = 500$  мм (б) та  $D = 1000$  мм (в)



**Таблиця 3**

Порівняння власних частот коливань варіантних моделей циліндричних і конічних оболонок завтовшки = 0,4 мм. Матеріал – нержавіюча сталь ( $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$ ,  $E=200 \text{ ГПа}$ ,  $\nu=0.3$ )

Рис. №2.9,2.10	Оболонка	Параметр			
		d	D	Частота f	Маса
		мм	мм	$\text{с}^{-1}$	кг
2.9 а	Циліндрична $\delta=0.4 \text{ мм}$	300	300	31,55	8,57
2.9 б		350	350	34,24	10,04
2.9 в		400	400	33,81	11,53
2.10 г	$\delta=0.4 \text{ мм}$ 25 конічні секції	300	426	7,43	11,74
		350	476	7,73	13,4
2.10 д		374	500	7,85	14,
2.10 е		874	1000	9,09	31,55
		1374	1500	9,35	50,06
		1874	2000	9,27	69,74
		2874	3000	8,69	112,6

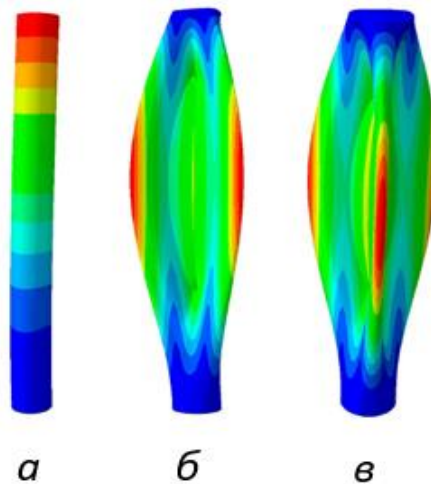


Рис.2.9 Загальні переміщення циліндричних оболонок за першої власної частоти коливань для циліндричної конструкції:  $D = 300 \text{ мм}$  (а),  $D = 350 \text{ мм}$  (б) та  $D = 400 \text{ мм}$  (в)

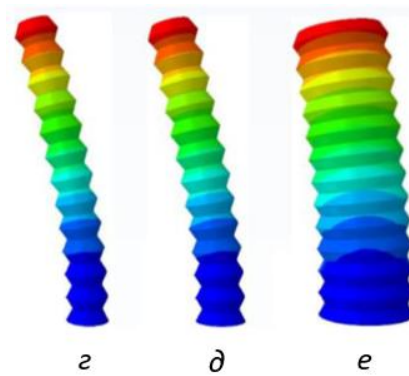


Рис.2.10 Загальні переміщення оболонок за першої власної частоти коливань для 25 конусної сталеві конструкції:  $D = 426$  мм (з),  $D = 500$  мм (д) та  $D = 1000$  мм (е)

Представлене на Рис.2.11 узагальнення результатів розрахунків ілюструє доцільність вибору в межах досліджуваного діапазону матеріалу конструкції з більшою товщиною. Проте цей підхід не є універсальним рішенням для збільшення жорсткості КПО через підвищення маси оболонки, обмеження якої є критично важливим при проектуванні конструкції аерокосмічного призначення. Крім того, збільшення товщини призводить до різкого підвищення необхідного для формозміни та подальшого розкриття внутрішнього тиску і, як наслідок, підвищення складності, надійності та масогабаритних характеристик допоміжного технологічного обладнання. Деяке порушення пропорційної залежності, що спостерігається за викривленням графіка Рис.2.11, пояснюється кратністю геометричних характеристик конічних секцій КПО різної товщини при необхідності забезпечити загальну довжину і компактність конструкції відповідно до сформульованих вимог.

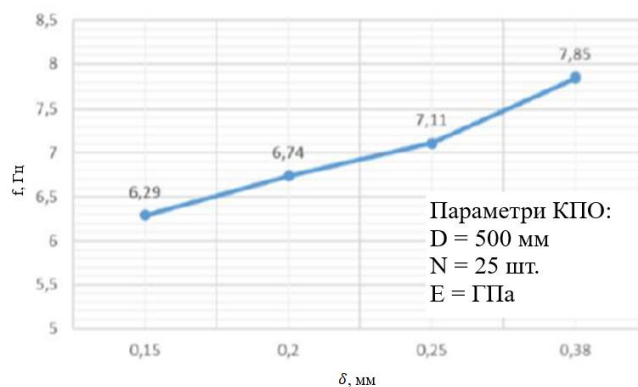


Рис.2.11 Залежність власних частот коливань КПО ( $D=500$  мм) від товщини конструкційного матеріалу (модельний матеріал – нержавіюча сталь,  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=200$  ГПа,  $\nu=0.3$ )

На Рис.2.12 представлений результат узагальнення розрахункових даних, що ілюструє залежність власних частот коливань КПО від діаметра конструкції найбільшої товщини матеріалу досліджуваного діапазону (нержавіюча сталь,  $\delta=0,4$  мм). Як видно, збільшення більшого діаметра  $D$  КПО в 2 рази (з 500 мм до 1000 мм) дозволяє збільшити власну частоту коливань всього до  $\sim 1,2$  Гц, при цьому маса конструкції збільшується більш ніж в 2,2 рази. При подальшому збільшенні діаметрів частота, навпаки, плавно знижується (Рис.2.12), що пояснюється якісно зміною форми власних коливань конструкції. При збільшенні  $D$  понад 500 мм, як і у разі зростання товщини за межі товщин фольгових матеріалів, якісно змінюються вимоги до обладнання для формозміни вихідних конічних заготовок. З цієї причини, при визначенні конструктивної схеми КПО діаметр  $D=500$  мм був обраний як проміжне розрахункове значення, і подальша оптимізація конструкції зводилася до пошуку конструктивних рішень щодо збільшення її жорсткості в критичних перерізах або введення додаткових пристроїв, що не суперечать основним вимогам.

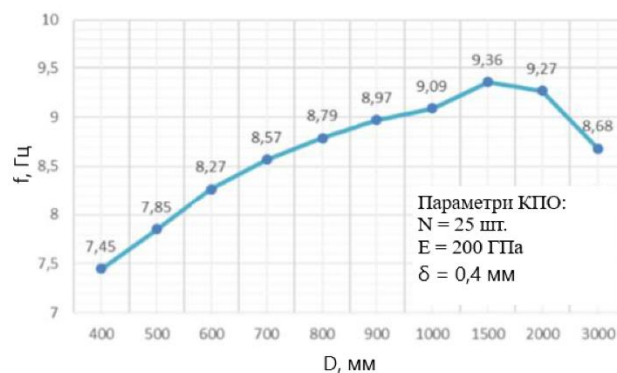


Рис.2.12 Залежність власних частот коливань КПО (модельний матеріал – нержавіюча сталь,  $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=200$  ГПа,  $\nu=0.3$ ,  $\delta=0,4$  мм) від зміни діаметра конструкції

Рішенням для зниження маси КПО при незмінній товщині є також вибір модельного конструкційного матеріалу, одним з яких є титан, що має меншу щільність ( $\rho=4500 \text{ кг/м}^3$ ) в порівнянні з нержавіючою сталлю ( $\rho=7850 \text{ кг/м}^3$ ), але й меншим значенням модуля пружності ( $E=110 \text{ ГПа}$ ). Результати розрахунку варіантних циліндричних та багатоконусних оболонок з товщиною  $\delta=0,4 \text{ мм}$  з титану ВТ1-0 ( $\rho=4500 \text{ кг/м}^3$ ,  $E=110 \text{ ГПа}$ ,  $\nu=0.3$ ) наведено в Таблиці 4. Вибір даної марки титану обумовлений також порівняно високим відносним подовженням (20-30%), що може дозволити розкрити КПО без порушення її цілісності.

**Таблиця 4**

Порівняння власних частот коливань варіантних моделей циліндричних і конічних оболонок завтовшки  $= 0,4 \text{ мм}$ . Матеріал – титан ВТ1-0 ( $\rho=4500 \text{ кг/м}^3$ ,  $E=110 \text{ ГПа}$ ,  $\nu=0.3$ )

Оболонка	d	D	Частота f	Маса
	мм	мм	$\text{с}^{-1}$	кг
Циліндрична $\delta=0,4 \text{ мм}$	300	300	31,04	4,92
	350	350	33,69	5,76
	400	400	33,27	6,61
$\delta=0,4 \text{ мм}$ 25 конічних секцій	300	426	7,31	6,74
	350	476	7,60	7,69
	374	500	7,72	8,15
	874	1000	8,94	18,11
	1374	1500	9,21	28,73
	1874	2000	9,12	40,02

Як видно з результатів Таблиці 3 та Таблиці 4, використання титану ВТ1-0 (модуль пружності  $E=110 \text{ ГПа}$  порівняно з модулем  $E=200 \text{ ГПа}$  для нержавіючої сталі) призводить до незначного (на  $\sim 2\%$ ) зниження власної частоти КПО, але дозволяє суттєво на  $\sim 43\%$  знизити масу конструкції; крім того, використання титану призводить до збільшення згинальних деформацій конструкції за рахунок нижчого значення модуля пружності. Таким чином, остаточний вибір матеріалу може ґрунтуватися на аналізі більшої кількості факторів, які будуть представлені далі.

Слід врахувати, що зміна товщини матеріалу КПО призводить до зміни загальної конструктивної схеми, тобто. при більшій товщині висота конічної секції більша і кількість секцій менша. На Рис.2.13 представлена залежність власних частот коливань КПО з діаметром  $D = 500$  мм і довжиною  $L = 3$  м із нержавіючої сталі від кількості конічних секцій за умови збереження компактності.

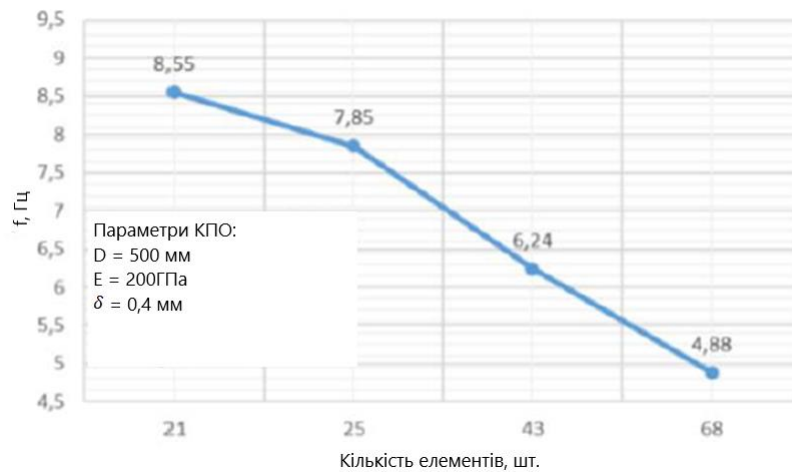


Рис.2.13 Залежність власних частот коливань КПО (модельний матеріал – нержавіюча сталь ( $\rho=7850$  кг/м<sup>3</sup>,  $E=200$  ГПа,  $\nu=0.3$ ,  $D=500$  мм,  $L=3$  м) від зміни кількості конічних секцій конструкції

Результати Рис.2.13 дозволяють зробити висновок про те, що вклад у зміну власної частоти коливань КПО вносить також і кількість ділянок сполучення конічних секцій (особливо – меншого діаметра), що мають найменшу відносну жорсткість і в яких величини деформацій у процесі коливань є максимальними. Таким чином, одним із рішень для підвищення частоти може бути зміна у можливих межах геометричних параметрів конічних секцій при їхній незмінній товщині, зокрема – незначне зменшення кута конусності та збільшення висоти секції. Межі зменшення кута вимагають експериментального підтвердження, оскільки супутнє збільшення глибини складки  $a$  (Рис.2.2, в), як було зазначено вище, може суттєво погіршувати рівномірність розкриття КПО.

### 2.1.2 Оцінка впливу гладкості профілю поверхні твірної конічної секції КПО у розкритому стані на величину власної частоти коливань.

Після розкриття КПО внутрішнім надлишковим тиском конічні секції набувають концентричних кільцевих особливостей, що відповідають вершинам складок, в яких лицьові поверхні металевої оболонки піддаються пластичному деформуванню. Вихідна твірна поверхні гладкої конічної оболонки після складання та подальшого розкриття має хвилеподібний профіль, який може бути приблизно описаний синусоїдальною функцією. Оскільки закріплена конструкція з консольним закріпленням зазнає найбільших переміщень у площинах, по нормалі до площин залишкових кільцевих складок, останні сприяють деякому зниженню власної частоти коливань КПО. Для модального аналізу варіантів конструкції були побудовані кілька профілів твірної з різною пологістю, що відповідають різному рівню внутрішнього тиску розкриття (Рис.2.14). При цьому довжина кожної з синусоїдальних твірних по серединній поверхні дорівнює довжині вихідної гладкої конічної твірної, що відповідає умові взаємної їх ізометричності (за Рис.2.2,а). Кожен із профілів описаний функцією виду  $y = c \times \sin(nx-t)$ , де  $c$ ,  $n$  і  $t$  – натуральні числа.

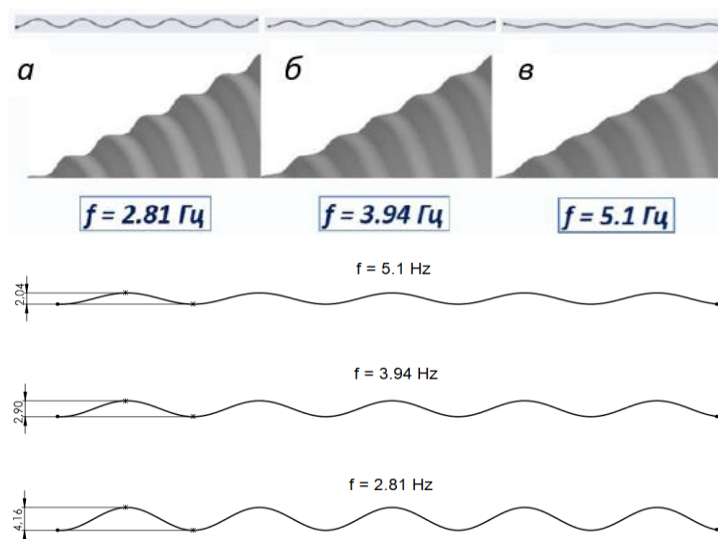


Рис.2.14 Бічні твірні конічних секцій КПО з мінімальною (а), середньою (б) та високою (в) гладкістю та глибина відповідної складки (мм)

Кожен із профілів описаний функцією виду:  $y = c \times \sin(nx-t)$ , де  $n = 6/21.5$ ;  $t = 5.628$ ;  $c = 2.08$  (для  $f=2,81$  Гц),  $c = 1.45$  (для  $f=1,45$  Гц) та  $c = 1.45$  (для  $f=1,02$  Гц).

Додатково представлений для порівняння варіант КПО з  $\delta=0,25$  мм та  $D=500$  мм (43 секції), що ілюструє зниження частоти розкритої конструкції з меншою товщиною матеріалу та великою кількістю секцій (Таблиця 2).

Результати чисельних рішень демонструють істотне зниження власної частоти коливань КПО з хвилеподібним профілем (від 2,8 Гц до 5,1 Гц) порівняно з гладким варіантом конструкції, для якого значення частоти становить 7,8 Гц (Табл.3). Найбільша власна частота отримана для конструкції з більш пологою поверхнею оболонки, що потребує більшого внутрішнього тиску для розкриття. Значення тиску розкриття, відповідна йому форма кінцевого профілю утворює вплив величини тиску на довжину КПО і зниження довжини після скидання формуючого тиску можуть піддаватися розрахунковій оцінці після визначення остаточної конструктивної схеми.

Подані аналітичні та чисельні розрахункові результати дозволяють зробити такі висновки:

- підвищення власної частоти коливань КПО шляхом збільшення її діаметра і товщини може бути доцільним до певної межі (попередньо обраний  $D=500$  мм та  $\delta=0,4$  мм), після якої рівномірне зростання масогабаритних характеристик поєднується з якісним зростанням складності допоміжних технологічних процесів формозміни та розкриття;

- Власна частота коливань КПО може бути істотно (до 2 разів) підвищена шляхом збільшення пологості профілю твірної кінцевих секцій;

- наближення КПО до циліндричної форми є найбільш ефективним шляхом збільшення власної частоти коливань конструкції, але має жорсткі технологічні обмеження;

- Внесок у збільшення власних частот робить зменшення кількості ділянок сполучення кінцевих секцій, в яких величини деформацій є

максимальними (найменші діаметри КПО, найбільш близькі до зони жорсткого закріплення).

Таким чином, раціональним підходом до оптимізації конструктивної схеми КПО може бути зменшення числа конічних секцій при одночасному зниженні конусності в напрямку більш жорсткої циліндричної конструкції. Далі, жорсткість КПО може бути підвищена локально, на ділянках сполучення з найбільшими величинами деформацій, а переміщення подібних ділянок поблизу консольного закріплення можуть бути примусово обмежені додатковими конструктивними засобами. Нарешті, КПО може компонуватися з конічних секцій різної товщини, жорсткіші з яких розташовані в зоні з найбільшими деформаціями, а менш жорсткі і меншою масою, що володіють, - в зоні незакріпленого торця, де переміщення максимальні. З урахуванням викладених вище міркувань виконана попередня конструктивна схема КПО; визначення найбільш раціональної конструктивної схеми КПО та її коригування буде здійснено після остаточного вибору матеріалу оболонки конструкції на підставі його фізико-механічних характеристик та технологічних особливостей.

### **2.1.3 Визначення фізико-механічних характеристик матеріалів оболонки КПО**

В якості модельних матеріалів при визначенні конструктивної схеми КПО обрані нержавіюча сталь і титан, що широко використовуються в космічному апаратобудуванні. Для виготовлення екстремально деформованої оболонки КПО може бути використаний досить широкий діапазон металів із запасом пластичності, тобто. відношенням умовної межі плинності  $\sigma_{0,2}$  ( $H_K$ ) до межі міцності  $\sigma_u$  в діапазоні  $R_{p0,2}/\sigma_u = 0,3 \div 0,8$ . Для титану марки ВТ1-0 значення межі плинності та межі міцності перебувають у досить вузькому діапазоні ( $R_{p0,2} = 250 \dots 300$  МПа,  $\sigma_u = 400 \dots 450$  МПа, запас пластичності  $0,55 \dots 0,75$ ). Для нержавіючих сталей із близьким хімічним складом та



різними видами термообробки запас пластичності може відповідати всьому діапазону 0,3...0,8. Крім того, сталі з різним рівнем  $R_{p0,2}$  і  $\sigma_u$  мають істотно різні значення відносного подовження, і вибір оптимального матеріалу конструкції повинен враховувати як його прийнятність для утворення складок, так і відповідність характеристик міцності рівню діючих експлуатаційних навантажень.

При розрахунках чисельними методами та для остаточної порівняльної оцінки модельних матеріалів використовувалися результати натурних випробувань їх фізико-механічних характеристик, проведені за гармонізованими методиками випробування металів на розтягування:

- ASTM International Designational E 8/E 8M-08 «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials»;

- ISO 6892-1: 2016(E) «Metallic materials-Tensile testing».

Апаратним забезпеченням досліджень було обладнання INSTRON, що працює за вказаними стандартами. Загальний вид обладнання з максимальним осьовим навантаженням 5 кН.

Випробування проводилися на однотипних зразках тонколистових заготовок нержавіючих сталей і титану BT1-0 практично важливому діапазоні товщин  $\delta \sim 0,15 \dots 0,4$  мм, розглянутому в варіантних скінченно-елементних моделях КПО (Рис.2.3). Певна відмінність у фактичній товщині матеріалів від стандартних товщин, характерна для різних станів постачання тонколистового прокату, враховувалася при уточненні чисельних моделей у подальших розрахунках КПО.

У дослідях застосовувалося 5-кратне дублювання для кожного типорозміру випробуваного матеріалу. Довірчими значеннями розрахункових характеристик напружено деформованого стану приймалися середньоарифметичні величини для кожного типорозміру зразків. З обліку виключалися експериментальні значення, які у категорію промахів. На графіках представлені діаграми розтягування характерних неукріплених нержавіючих сталей, які були розглянуті як перспективні матеріали для

виготовлення КПО, а також титану BT1-0. Порівняння встановлює типову для м'яких аустенітних сталей істотно розширену область пластичної деформації, граничні значення відносного подовження матеріалу, в якій досягають 60%. Зазначена властивість щодо вищої пластичності сталей порівняно з титаном наочно ілюструється візуальним зіставленням геометрично однотипних зразків зазначених матеріалів у станах до і після розриву розтягуванням.

Привертає увагу характерне для титану практичне виродження залежності ступеня деформації від напруження в області існування пластичного стану матеріалу, що позбавляє технологічні процеси формозміни металевих оболонок можливості організації негативних зворотних зв'язків за характеристиками формуючого зусилля і змушує у технологічному процесі формоперетворення вдаватися до одноімпульсного керування за заданими геометричними параметрами без врахування поточного напружено-деформованого стану матеріалу.

Отримані експериментальні значення фізико-механічних характеристик модельних матеріалів та діаграми статичного розтягування (Таблиця 5) були використані за подальших розрахунків НДС конструкції чисельними методами. На прикладі чисельної моделі проведено розрахункову оцінку впливу модуля пружності конструкційного матеріалу оболонки КПО (нержавіюча сталь) на величину частоти власних коливань (Рис.2.15). Як видно з представленого графіка, вибір матеріалу з більш високим значенням модуля пружності за інших рівних умов дозволяє суттєво (на ~10% для розглянутого діапазону модельних матеріалів) підвищити частоту власних коливань КПО.

**Таблиця 5** Результати дослідження фізико-механічних характеристик модельних матеріалів оболонки КПО

№ п/п	Матеріал	$R_{p0,2}$ , МПа	$\sigma_u$ , МПа	$R_{p0,2}/\sigma_u$	$\epsilon$ , %	Е, ГПа
1	AISI321(1.4541) (2R-BA), $\delta = 0,15$ мм	243	651	0,37	52,1	203
2	AISI321 (1.4541) (2R-BA), $\delta = 0,25$ мм	250	672	0,37	65,9	213
3	AISI321 (1.4541) (2B), $\delta = 0,4$ мм	309	715	0,43	60,2	229
4	Титан BT1-0, $\delta = 0,15$ мм	281	424	0,66	24,3	141

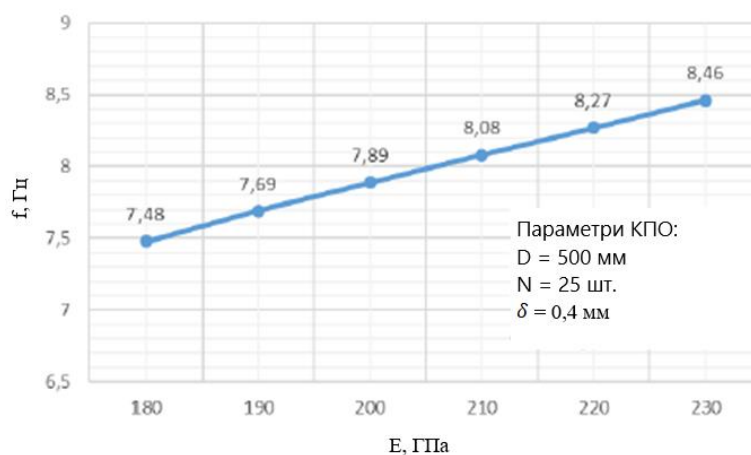


Рис.2.15 Залежність частоти власних коливань для КПО від величини модуля пружності конструкційного матеріалу  $\delta$

Як було зазначено раніше, власна частота коливань конструкції і, отже, її жорсткість залежить від гладкості профілю твірної конічної секції КПО в розкритому стані. Одним з основних критеріїв застосування матеріалу при проектуванні КПО є оцінка його поведінки при розкритті конструкції, із цією метою було побудовано модель розкриття одного з конусів в осесиметричній постановці (Рис.2.16). Були розглянуті нержавіючі сталі AISI 321 (м'яка) та

X10CrNi1809 (зміцнена), а також титан BT1-0, основні механічні характеристики яких наведені у Таблиці 6.

**Таблиця 6**

Основні фізико-механічні властивості розрахункових матеріалів КПО

Матеріал	$R_{p0,2}$ , МПа	$\sigma_u$ , МПа	$R_{p0,2} / \sigma_u$	$\varepsilon$ , %	$E$ , ГПа	$\nu$
Сталь AISI321	309	715	0,43	60,2	229	0,3
Сталь X10CrNi 1809	686	863	0,8	12	229	0,3
Титан BT1-0	281	424	0,66	24,3	141	0,3

Результати моделювання показали, що для забезпечення більш гладкого профілю складки сталь AISI 321 (1.4541) з відносним подовженням 60,2%, що значно перевершує інші розглянуті матеріали та не руйнується в процесі розкриття, коефіцієнт запасу відносно межі міцності дорівнює 1,3. Використання даної сталі дозволяє значно збільшити і жорсткість конструкції, і її компактність

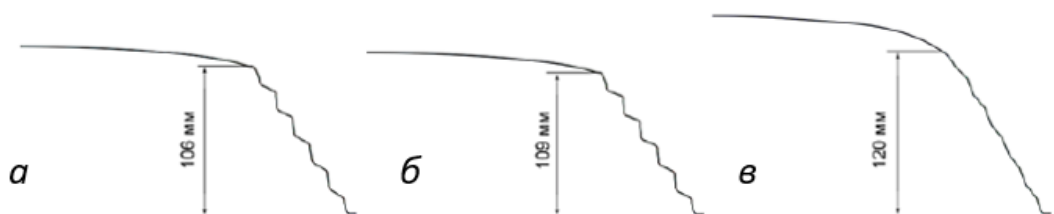


Рис.2.16 Профіль розкритого гофру при однаковому заданому тиску:

а) титановий сплав BT1-0; б) зміцнена нержавіюча сталь марки X10CrNi1809; в) м'яка нержавіюча сталь марки AISI 321 (1.4541)

Для остаточного вибору конструкційного матеріалу оболонки, що перетворюється, були розглянуті додаткові фактори, пов'язані з основними аспектами виготовлення і подальшої експлуатації КПО. В результаті було обрано в якості основного матеріалу нержавіючу сталь марки AISI321 компанії Arinox.

## **2.2 Моделювання процесу формоперетворення та аналіз напружено-деформованих станів металевої оболонки**

Після визначення попередньої геометричної моделі конструкції (п.2.1) завдання дослідження полягало у реалізації послідовних кроків з оптимізації її масово-габаритних характеристик; пріоритетом було визначено зниження маси конструкції, що не призводить до виникнення нерегламентованих відхилень у зоні із максимальними переміщеннями та критичних напружень у зоні із максимальними деформаціями (в околах жорсткого закріплення). Так, початкові вимоги до рівня базової частоти власних коливань КПО можуть бути переглянуті у бік зменшення, якщо їх амплітуда суттєво не зростає при одночасному поліпшенні рівномірності розкриття, обумовленому менш консервативними умовами формування радіальних складок (гофрів) оболонки.

### **2.2.1 Формування чисельної моделі КПО, чисельне моделювання напружено-деформованого стану елементів КПО та конструкції в цілому.**

На підставі розглянутих у попередніх розділах факторів, що впливають на жорсткість та цілісність конструкції, була створена попередня геометрична модель КПО, що складається з 25 конічних оболонкових елементів висотою 120 мм та товщиною стінки 0,4 мм. Матеріал – нержавіюча сталь із фізико-механічними характеристиками, визначеними у процесі натурних експериментів. Частота власних коливань такої конструкції без внесення додаткових конструктивних рішень (збільшення жорсткості з'єднувальних контурів тощо) становить  $f=5,1$  Гц; варіанти посилення оболонки КПО будуть розглянуті далі. За виконання цього етапу роботи було розглянуто два варіанти КПО. Перший отримано в результаті оптимізації базових геометричних параметрів, а другий містить додаткові конструктивні рішення. При цьому локальне збільшення жорсткості конструкції

проводилося на підставі загальних міркувань, пов'язаних з положенням її центру мас щодо ділянки жорсткого закріплення і шляхом збільшення товщини матеріалу КПО в зоні кільцевих зварних швів нижче за центр маси конструкції. При формуванні геометричної моделі тонкостінної КПО були використані оболонкові геометричні елементи гофрованих конусів, що повторюються (Рис.2.17). Завдання вирішувалося в пружнопластичній постановці із застосуванням скінченно-елементного моделювання. Аналіз зміни напружено-деформованого стану проводився шляхом чисельного простеження пружнопластичних деформацій.

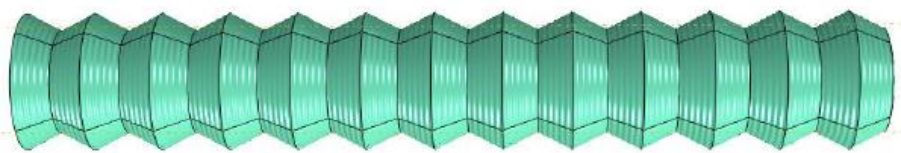


Рис. 2.17 Геометрична модель КПО для чисельного аналізу конструкції

Як критерій оцінки міцності КПО використовувалася умова  $\sigma_e < R_{p0.2}$ , де  $R_{p0.2}$  - межа плинності матеріалу;  $\sigma_e$  – еквівалентні напруження.

Навантаження. Згідно з стандартами одними з основних навантажень, що діють на обладнання, встановлене всередині і поза модулями МКС є інерційні навантаження, викликані силовим впливом на конструкцію МКС (контактні сили від стикувань і відстикувань КА, впливу від роботи виконавчих органів систем керування (ВО СК), а також від внутрішньої та позакорабельної діяльності космонавтів), які задаються у вигляді кутових та лінійних прискорень. Крім того, при механічному аналізі конструкції прикладається корисне навантаження, що має еквівалентну вагу 10 Н у наземних умовах.

Для моделювання НДС КПО було розглянуто експлуатаційні лінійні прискорення у поперечному та осьовому напрямках. Відповідно рекомендована жорсткість кріплення устаткування, що встановлюється, повинна відповідати частотам власних коливань не нижче 20 Гц, при цьому експлуатаційні лінійні прискорення в осьовому напрямку становлять 4,5 м/с<sup>2</sup>,

в поперечному напрямку  $6,0 \text{ м/с}^2$ . Коефіцієнт безпеки щодо розрахункових навантажень слід приймати рівним 2. Отже, розрахункові лінійні прискорення в осьовому напрямку становлять  $9,0 \text{ м/с}^2$ , у поперечному напрямку  $12,0 \text{ м/с}^2$ ; кожен із варіантів навантаження лінійними прискореннями було розглянуто окремо

Скінченно-елементна модель КПО. КПО є тонкостінною (співвідношення максимальної товщини в зоні кріплення шпангоутів до мінімального діаметру приблизно становить 1 до 147), тому модель створювалася з оболонкових елементів. Застосування плоских скінченних елементів дає досить точні результати при моделюванні напружено-деформованого стану оболонкових елементів. Була створена скінченно-елементна модель, яка точно повторює геометрію гофрованих ділянок. Модель складається з 99490 оболонкових чотирикутних елементів типу S4R. Якість розрахункової сітки впливає на точність одержуваних результатів і збіжність завдання.

Як граничні умови використовувалося жорстке закріплення в основі конструкції. Навантаження у вигляді відповідних осьових або поперечних прискорень прикладалися до об'єму всієї конструкції.

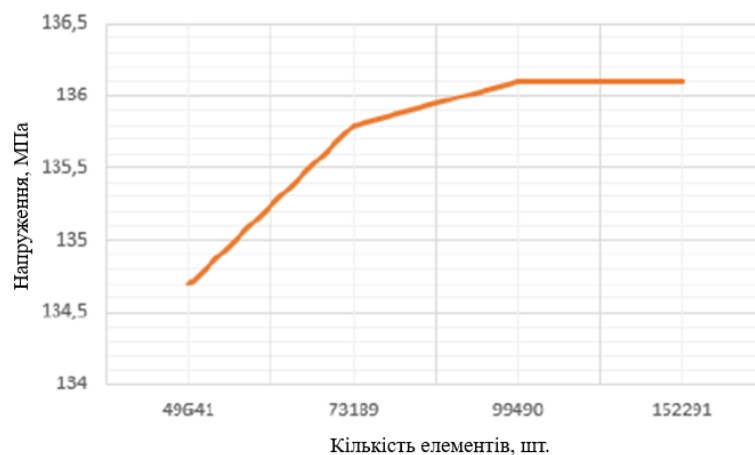


Рис.2.18 Збіжність скінченно-елементної моделі

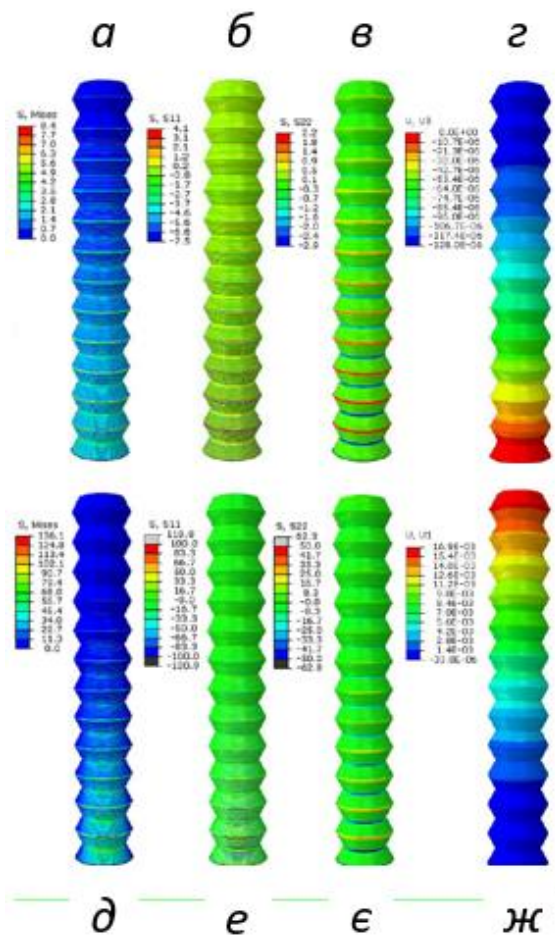


Рис.2.19 Результати розрахунку НДС конструкції КПО. Осьове навантаження: напруження за Мізесом, МПа (а); осьове напруження, МПа (б); радіальні напруження, МПа (в); осьові переміщення, м (г). Поперечне навантаження: напруження за Мізесом, МПа (д); осьове напруження, МПа (е); радіальні напруження, МПа (ж); поперечні переміщення, м(ж)

Результати розрахунку НДС. Результати розрахунку напружено-деформованого стану для випадку навантаження осьовим лінійним прискоренням показали, що максимальні еквівалентні напруження КПО не перевищують 8,4 МПа, пік напружень знаходиться в області зварного шва на стику другого і третього конуса з переважанням осьових стискаючих напружень 7,5 МПа (Рис. 2.19, б). Максимальні переміщення в осьовому напрямку вільного кінця КПО незначні і становлять 0,13 мм (Рис. 2.19, г).

Для випадку навантаження лінійним прискоренням у поперечному напрямку отримані досить високі еквівалентні напруження з піком 136 МПа в



області зварного шва на стику другого і третього конуса з переважанням осьових стискаючих і розтягуючих напружень, які в цій області досягають порядку 120 МПа. Максимальні переміщення у поперечному напрямку незакріпленого кінця КПО досягають 17 мм (Рис. 2.19,е).

Для КПО із внесенням додаткових конструктивних рішень щодо збільшення жорсткості, власна частота коливань якої склала  $f = 6.2$  Гц, змінився як якісний характер розподілу еквівалентних напружень (von Mises), так і їх кількісна складова.

Як видно з Рис.2.20, збільшення жорсткості конструкції сприяє зменшенню напружень в зоні кільцевого зварного з'єднання між 2 і 3 конусом. Максимальні напруження розташовані в гофрованій зоні на нижніх конусах для обох розрахункових випадків. Максимальні переміщення у поперечному напрямку незакріпленого кінця КПО знизилися до 11,4 мм.

Таким чином, основне завдання остаточної оптимізації попередньої геометричної моделі може полягати в коригуванні конструктивних доповнень, що дозволяє чергу досягти необхідних жорсткісних характеристик КПО.

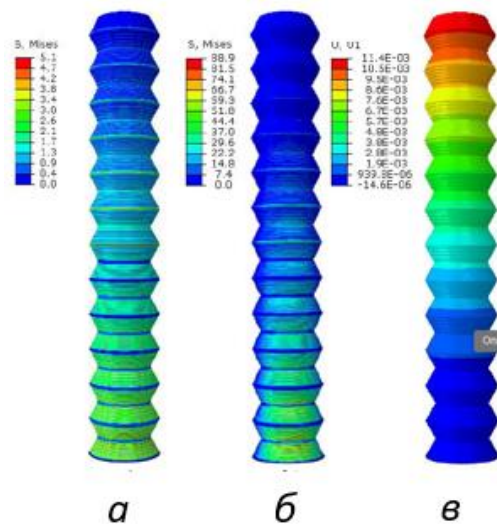


Рис. 2.20 Результати розрахунку НДС конструкції КПО із додатковими посиленнями. Осьове навантаження: напруження за Мізесом, МПа (а). Поперечне навантаження: напруження за Мізесом, МПа (б), поперечні переміщення, м (в)

Отримані результати демонструють здатність конструкція з частотою власних коливань  $f = 5.1$  Гц витримувати досить високі, регламентовані для експлуатації на МКС, лінійні прискорення з коефіцієнтом запасу більше 2.0.

### 2.2.2 Коригування конструктивної схеми КПО на підставі отриманих експериментальних та розрахункових даних

Оптимізація розташування елементів жорсткості (шпангоутів). Для підвищення жорсткості конструкції були додані підсилювальні елементи у вигляді шпангоутів. Їх оптимізація проводилася на КПО, що складається з 25 конусів, геометричні характеристики якої були наведені раніше. Була визначена залежність значення рівня першої (базової) частоти власних коливань від кількості розташованих шпангоутів в конструкції (Рис. 2.21).

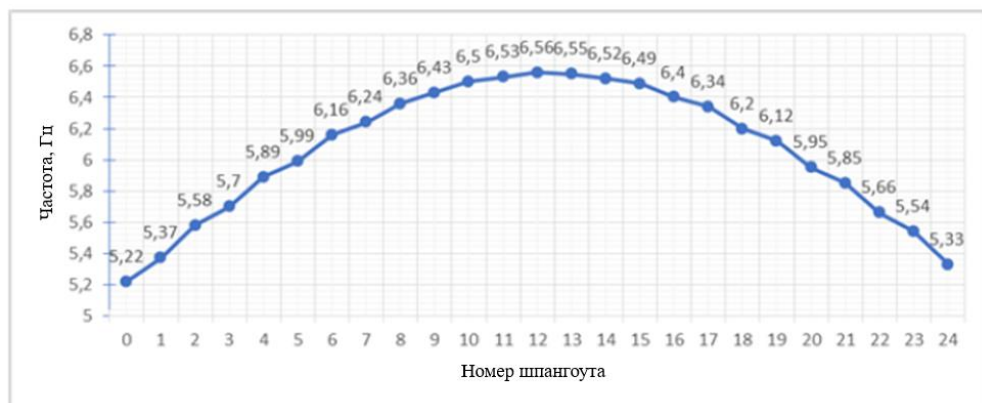


Рис. 2.21 Залежність першої частоти власних коливань КПО від кількості доданих шпангоутів (нумерація починається з основи КПО)

Оптимальним для 25 конусної конструкції з точки зору підвищення її жорсткості в зоні кільцевих зварних з'єднань малих діаметрів є розташування шпангоутів включно до 11 конічної секції (Рис. 2.23), в зоні кільцевих зварних з'єднань великих діаметрів до 8 конусів включно (додавання шпангоутів великих діаметрів в районі 10 та 12 конусів істотно збільшує масу КПО при незначному підвищенні частоти КПО).

Зі збільшенням товщини шпангоуту зростає значення першої частоти власних коливань КПО, проте залежність не є прямо пропорційною, а при досягненні товщини 2.5 мм власна частота знижується (Рис. 2.22).

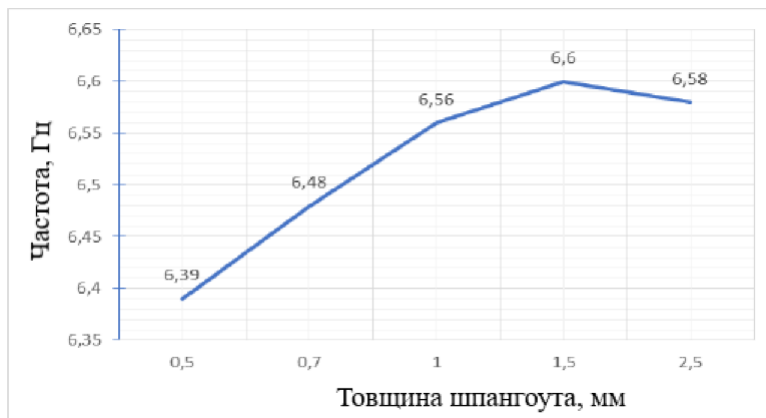


Рис. 2.22 Залежність першої частоти власних коливань КПО від товщини шпангоутів за умови їх оптимальної кількості та розташування

Оптимальною товщиною шпангоуту з огляду на масогабаритні характеристики конструкції є сталь завтовшки 1 мм, збільшення товщини до 2 мм суттєво збільшує масу конструкції загалом (приблизно на 7 кг). Використання сталі з товщиною 0,5 мм не забезпечує необхідної жорсткості КПО.

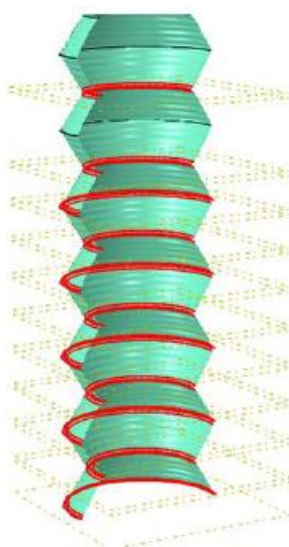


Рис. 2.23 Зони розташування шпангоутів

Коригування конструктивної схеми КПО для покращення кінцевих функціональних характеристик. Як результат проведеного аналізу геометричних параметрів та конструктивної схеми КПО з метою зниження власної маси було внесено зміни до пропорцій із збереженням довжини  $L$  та коефіцієнту  $K_T$  (подані в Таблиці 7 для порівняльної оцінки). Так, у використаних керуючих документах базові вихідні значення розрахункових навантажень, коефіцієнтів безпеки та ін. регламентовано для певних діапазонів визначальних параметрів конструкцій (наприклад, діапазони базових частот власних коливань  $\leq 10$  Гц та  $\geq 10$  Гц). Отже, консервативність жорсткісних характеристик може бути знижено в межах означеного діапазону за умови виконання прийнятого критерія міцності, збереження стійкості КПО та відсутності якісних змін у відхиленні її вільного (робочого) торця у стані коливань.

**Таблиця 7** Оновлені вимоги до КПО, що розробляється

№	Параметр	Одиниці вимірювання	Початкові вимоги	Нові вимоги
1	Максимальний діаметр $D$	мм	$\geq 300$	$300 \leq D \leq 400$
2	Товщина матеріалу оболонки	мм	-	$\leq 0.3$
3	Перша частота власних коливань, $f$	Гц	$\geq 10$	$\geq 2$
4	Маса оболонки	кг	-	$m \geq 8$ кг
5	Відношення довжин КПО в компактному і розкритому стані	-	$> 1:10 \pm 0.25$	$> 1:10$
6	Умови механічного навантаження	-	Відповідно до вимог для МКС	Інерційне навантаження у вигляді лінійного прискорення, рівного $1g$ ( $9.8 \text{ м/с}^2$ ), прикладена до вершини КПО в області кріплення корисного навантаження і спрямована перпендикулярно до осі КПО в точці закріплення корисного навантаження (вільний торець КПО)

Найбільш істотною зміною, що впливає на конструктивні параметри КПО, є зменшення товщини матеріалу оболонки конструкції до 0,3 мм, використане заради бажаного зниження її власної маси. При практично незмінному значенні  $K_T$  зменшення величини приводить до зменшення висоти конічної секції  $i$ , відповідно, збільшення кількості секцій КПО. Уявлення про зміну загальної конфігурації КПО дають варіантні моделі б і в, представлені на Рис.2.4. Загальна конфігурація профілю складки за умови коригування параметра  $b$  збережена незмінною (Рис.2.2), оскільки кількість складок  $n=5+(0,5)$  теоретично дозволяє забезпечити необхідне значення  $K_T$  (див.Ф.(1)). Слід зазначити, що остаточне коригування профілю поверхні гофрованого диска може бути зроблено лише після перших натурних експериментів щодо його розкриття. Це з тим, що на теоретичне значення  $K_T$  незначною мірою впливає на пологість профілю, що залежить від величини внутрішнього тиску та від фізико-механічних властивостей фактично використаного матеріалу оболонки.

Визначення геометричних параметрів КПО відповідно до внесених змін. Як було визначено в п. 2.1, необхідне збільшення кількості ділянок поєднання конічних секцій, у яких величини деформацій є максимальними, призводить до зниження власних частот коливань багатосекційної конструкції (Рис. 2.13). Зниженню власної частоти сприяє також і необхідне зменшення товщини оболонки, значення якої попередньо вибрано як  $\delta = 0,3$  мм. Навпаки, збільшення діаметра  $D$  конструкції призводить до підвищення величини  $f$  (Рис. 2.12), тому попередньо було обрано максимальне значення діаметра заданого діапазону  $D=400$  мм. За більшим і меншим периметром секцій після гофрування передбачаються плоскі з'єднувальні ділянки шириною 5 мм, необхідні для подальшого герметичного з'єднання між собою і надання конструкції додаткової жорсткості. Різниця радіусів ( $R - r$ ) вихідного зрізаного конуса (заготівлі) секції КПО становить  $\sim 49,3$  мм без урахування з'єднувальних ділянок шириною 5 мм при товщині матеріалу оболонки  $\delta = 0,3$  мм, а величина кроку  $b$  при даній товщині попередньо

визначена як  $b = 9$ . На Рис.2.24 представлена геометрична модель конічної секції в компактному (а) та розкритому (б) стані.

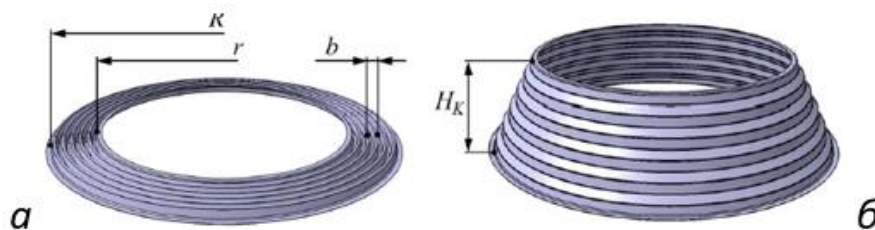


Рис.2.24 Геометрична модель конічної секції КПО

Для попереднього визначення висоти конічної секції  $H_K$  було реалізовано чисельне моделювання процесу розкриття трьох плоских дисків (Рис. 2.24, а) конструкції з кутом конусності  $\alpha = 27^\circ$ , герметично з'єднаних по периметрах більшої і меншої основ. Скінченно-елементна модель виконана в осесиметричній постановці з використанням 4736 білінійних чотирикутних осесиметричних плоских елементів типу SAX4R розміром  $0.075 \times 0.5 \text{ мм}$  і  $0.075 \times 0.2 \text{ мм}$  в області складки. Завдання вирішувалося за умов зневажування вертикально орієнтованої конструкції з жорстким закріпленням периметра нижньої основи за умов рівномірного підвищення внутрішнього тиску розкриття до  $P = 0,2 \text{ МПа}$ . У якості замикаючого елемента (денця) був використаний диск товщиною  $0.3 \text{ мм}$  з кільцевим посиленням по зовнішньому контуру. Прийняті у моделі граничні умови і навантаження показані на Рис.2.25, а.

З урахуванням існуючої нелінійної залежності між напруженнями та деформаціями була прийнята пружно-пластична модель матеріалу, заснована на асоційованому законі пластичної течії з критерієм плинності Мізеса та правилом ізотропного зміцнення. Як відомо, врахування геометричної нелінійності дозволяє значно скоротити похибку, характерну для використання лінійних моделей при розрахунку НДС оболонок при великих навантаженнях. Як модельний матеріал була прийнята нержавіюча сталь марки AISI 321 ( $E=213 \text{ ГПа}$ ,  $\nu=0.3$ ,  $R_{p0.2}=233 \text{ МПа}$ ,  $\sigma_B=672 \text{ МПа}$ ) із запасом пластичності  $R_{p0.2}/\sigma_u \approx 0.37$  та відносним подовженням  $66\%$ , що забезпечує

основні вимоги до можливостей формоперетворення розглянутої конструкції. Геометрична нелінійність поведінки трисекційної конструкції враховувалася в розрахунковій моделі шляхом введення квадратичних членів у вирази для деформацій.

Слід зазначити, що досить високий ступінь пологості (гладкості) отриманої твірної дозволяє забезпечити практично граничні характеристики жорсткості для конструкції, що розглядається. Однак, дана модель сформована без урахування залишкових напружень, які виникають після формування компактного диска і можуть внести деякі корективи як у величини розрахункового тиску розкриття, так і в характеристики КПО. Таким чином, метою наведених результатів розрахунку було попереднє визначення геометричних характеристик повнорозмірної КПО з 31 конічної секції, представленої Рис. 2.25,а.

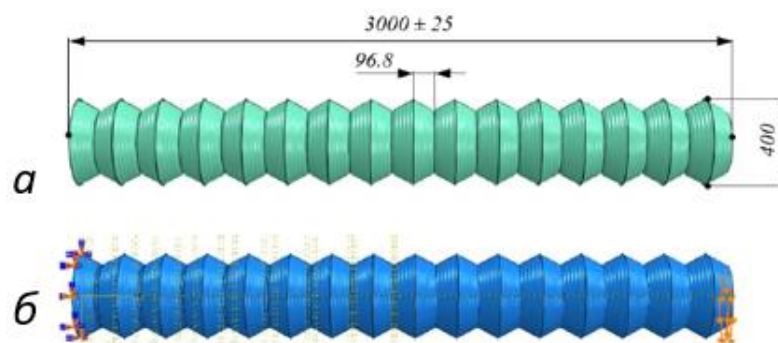


Рис.2.25 Геометрична модель КПО при  $\alpha=27^\circ$  (а); граничні умови та навантаження КПО для завдання визначення НДС конструкції (б)

Скінченно-елементна модель конструкції складається з 180734 чотирикутних оболонкових елементів типу S4R розміром  $12 \times 2$  мм. Власна частота за умови дії корисного навантаження  $m_{pl} = 10$  кг становить  $f = 2.2$  Гц, власна маса оболонки  $m \leq 10$  кг при товщині  $= 0,3$  мм, що відповідає шуканим характеристикам КПО (Таблиця 7).

Відповідно до заданих умов механічного навантаження (Табл.7) було вирішено завдання визначення НДС при дії прискорення  $g=9.81$  м/с<sup>2</sup> у зоні кріплення корисного навантаження. Завдання вирішувалося за умов



зневажування, поля розподілу еквівалентних напружень (von Mises, МПа) представлені на Рис.2.26,*а*. Як видно, максимальні еквівалентні напруження досягають величини  $\sigma_e = 197$  МПа і для прийнятого розрахункового значення  $R_{p0,2} = 233$  МПа дотримується критерій міцності. Фактичне значення межі плинності сталі може бути визначено при випробуваннях на статичний розтяг, і при допустимому його значенні подальше підсилення конструкції не потрібно. В іншому випадку в конструкцію КПО рекомендується внести елементи жорсткості у вигляді шпангоутів та/або додаткового циліндра, що обмежує горизонтальні переміщення КПО в області зварних кільцевих з'єднань малих діаметрів (Рис.2.26 *б, в, г*). При цьому, у разі спільної інтеграції двох елементів жорсткості кільцевий шпангоут зміщується на перше з кільцевих з'єднань меншого діаметра, яке розташоване вище циліндра і не обмежене з його допомогою в переміщеннях (Рис..2.26, *б* та *г*). Додавання значної кількості додаткових шпангоутів, які є поєднанням трьох профільних кілець V-подібного перерізу з товщиною  $2 \cdot \delta$  на кожному зі стиків конічних секцій, є в принципі небажаним з точки зору масогабаритних характеристик конструкції.

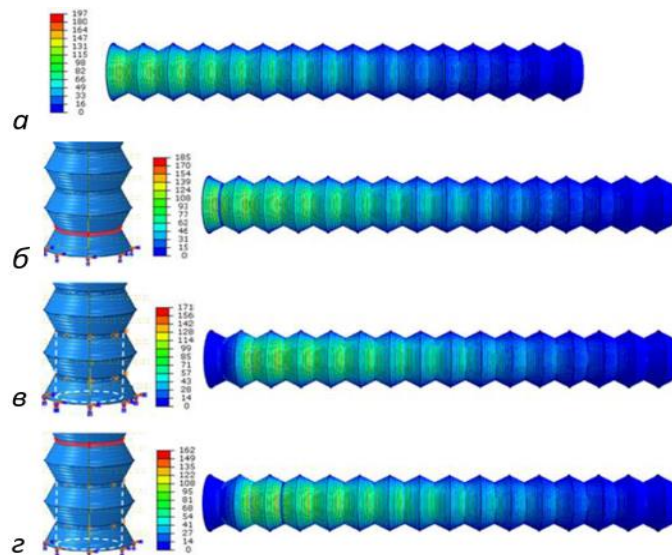


Рис.2.26 Поля розподілу еквівалентних напружень (von Mises), МПа, за заданих умов механічного навантаження в КПО без додаткового посилення (*а*), з додаванням шпангоуту (*б*), циліндричного обмежувального елемента (*в*) і (*г*) - з одночасним застосуванням елементів жорсткості (*б*) та (*в*)



Основні характеристики КПО доопрацьованої конструктивної схеми представлені в Таблиці 8. Слід зазначити, що отримані результати оптимізації багатосекційних КПО дозволяють суттєво спростити алгоритм послідовного наближення найбільш раціонального варіанту конструкції. Для більшої наочності були додатково зроблені розрахунки НДС варіантів нової конструкції, в яких завдання оптимізації вирішувалося за допомогою використаних підходів - зменшення діаметра і товщини оболонки, у тому числі товщини по довжині КПО. Отримані результати дозволяють зробити висновок про недоцільність варіювання конструктивних параметрів, що потенційно призводить до незначного покращення характеристик жорсткості при одночасному збільшенні масогабаритних характеристик або технологічних складнощів при виготовленні.

**Таблиця 8.**

Основні характеристики КПО доопрацьованої конструктивної схеми

№	Параметр	Одиниці вимірювання	Початкова модель	Модель після змін
1	Висота	мм	3000±25	3000±25
2	Маса	кг	~24	~10
3	Товщина оболонки	мм	~ 0.4 мм	≤ 0.3 мм
4	Зовнішній діаметр	мм	500	400
5	Кількість конусів	шт.	21	31
6	Висота конуса	мм	~142,5	~96,8
7	Перша частота власних коливань	Гц	10,08 (без урахування корисного навантаження)	2,18
8	Максимальні напруження при механічному навантаженні	МПа	-	~197

Коригування оптимізованої конструктивної схеми КПО. Наведені в Табл.8 результати ілюструють існування запасу жорсткості в новій моделі КПО, що дозволило провести її додаткове коригування. Так, незначне збільшення кута конусності  $\alpha$  не призводить до небажаного збільшення відносних кільцевих деформацій матеріалу у вершині складки  $\epsilon_K$ , але суттєво спрощує технологічний процес компактного складання, що особливо

актуально при подальшому натурному макетуванні масштабної КПО. Разом із тим, супутнє збільшення кількості секцій КПО негативно впливає на її жорсткість, і відповідність значення  $f$  вимогам до конструкції має бути підтверджено розрахунковим шляхом.

Геометрична модель КПО зі збільшеним до  $30^\circ$  значенням кута представлена на Рис.2.27,а. Кількість секцій конструкції збільшено до 35 за висотою секції  $H_K = 85,7$  мм. Величина першої частоти власних коливань у такому разі залишається практично незмінною - 2.16 Гц (частота вихідної КПО - 2.18 Гц), проте величина максимальних напружень від механічного навантаження зменшується (з 197 до 173 МПа) за рахунок перерозподілу локальних навантажених ділянок КПО в зонах малих діаметрів (Рис.2.27, б, в). Зазначений перерозподіл можна пояснити наближенням КПО до циліндричної форми за рахунок збільшення числа конусів конструкції. Такий підхід дозволяє зменшити довжину ребра складки гофрованого диска, що може спричинити збільшення жорсткості конструкції в цілому.

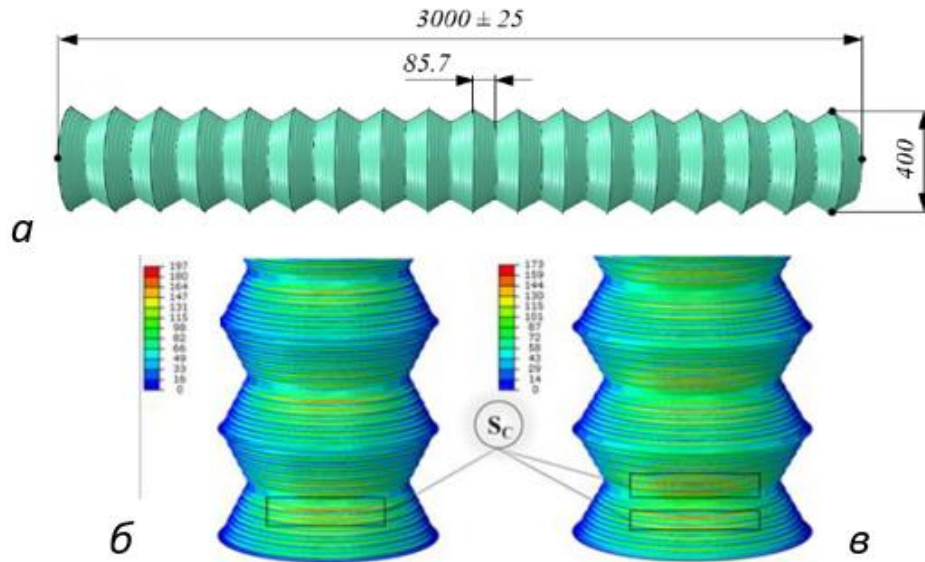


Рис.2.27 Геометрична модель КПО при  $\alpha \approx 30^\circ$  (а) і результати розрахунку НДС КПО ( $\sigma_c$ , МПа) в області жорсткого закріплення при  $\alpha \approx 27^\circ$  (б) і  $\alpha \approx 30^\circ$  (в).  $S_c$  – концентратори напружень, МПа

Представлені результати дозволяють зробити висновок про доцільність виготовлення макету КПО, в відповідності з конструктивною схемою

Рис.2.27,а, в якій необхідне осесиметричне розкриття багатосекційної конструкції є більш імовірним.

### 2.2.3 Проектування та виготовлення дослідної конструкції

Дослідна конструкція (макет) КПО повинна відтворювати основні технологічні стадії виготовлення пробного зразка КПО, та відповідати за діапазоном прийнятих фізико-механічних характеристик матеріалу. Критерієм подібності є пропорційне співвідношення геометричних параметрів конструкції та їх взаємних пропорцій. Макет КПО виготовляється в масштабі 1:2, що дозволяє на стадії лабораторно-відпрацювальних випробувань суттєво економити конструкційні матеріали дослідних зразків та використовувати при їх виготовленні спрощені комплекти технологічного обладнання. Тим не менш, масштабний макет на відміну від повнорозмірного зразка забезпечує більш складні умови (збільшення кільцевих деформацій у складках при зменшенні діаметра та зростання пластичних деформацій при зменшенні їх кроку) при компактному складанні та подальшому розкритті КПО. При формуванні складок плоского диска макета технологічні зазори також приймають мінімально можливі значення, оскільки пропорційне зменшення габаритів формуючого інструменту може бути нереалізованим виходячи з умов його міцності.

На Рис.2.28 представлена геометрична модель макета КПО з 35 конічних секцій з вихідним кутом конусності  $\alpha \approx 30^\circ$  та товщиною  $\delta \approx 0,15$  мм.

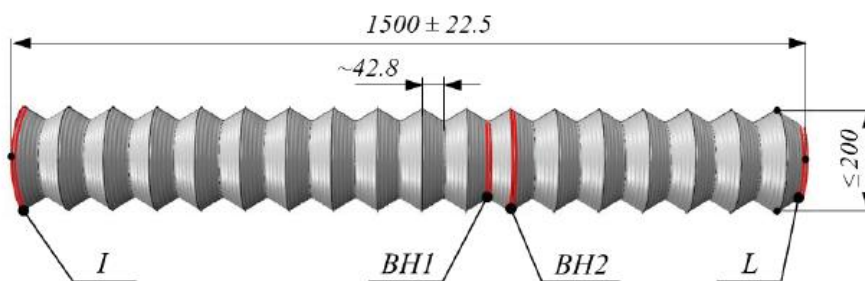


Рис.2.28 Геометрична модель дослідної конструкції (макета) КПО

Однією з цілей виготовлення макета є апробація раціональних конструктивних рішень для контуру жорсткого закріплення (І), замикаючого елемента (денце) (L) і герметичних з'єднань конічних секцій КПО по контурах менших (BH1) і великих (BH2) основ, що виконують додаткову функцію. Для контурів BH1 і BH2 макета були відпрацьовані кілька можливих схем нероз'ємних з'єднань, включаючи зварні, паяні та клейові. Пошук альтернативи зварному шву був обумовлений необхідністю оперативного складання герметичних багатосекційних дослідних конструкцій, що передують створенню дослідного обладнання для кільцевого зварювання. Дослідження кінетики розкриття макетів з достатньою для очікуваного внутрішнього тиску  $P_{\text{depl}} \sim 100$  кПа міцністю кільцевих з'єднань та кількістю секцій  $\geq 3$  дозволяють простежити відповідність розрахункової та фактичної геометрії оболонки при конкретних властивостях її матеріалу та, при необхідності, зробити необхідну корекцію моделі.

Моделювання процесу розкриття секції макета КПО. Конструкція замикаючого елемента (денця). Оскільки геометричні параметри макета КПО були отримані в результаті масштабування скоригованої конструктивної схеми (Рис.2.27,а), для уточнення висоти  $H_K$  секції макета додатково проводилося моделювання процесу її розкриття внутрішнім надлишковим тиском. Рис.2.29 а демонструє схему вихідного перетворення гладкої конічної заготовки в плоский диск з параметрами  $b = 4,5$  мм,  $(R - r) = 24,6$  мм без урахування з'єднувальних ділянок шириною 2.5 ... 3.0 мм при товщині матеріалу оболонки  $\delta = 0,15$  мм. Слід зазначити, що більшість доступних м'яких нержавіючих фольг розглянутого типорозміру мають позитивний допуск по товщині. Якщо фактична товщина матеріалу відповідає полю допуску  $^{+0,01}_{-0,02}$ , величину кроку складки також доцільно збільшити до значення  $b = 5$  мм і  $(R - r) = 29,3$  мм.

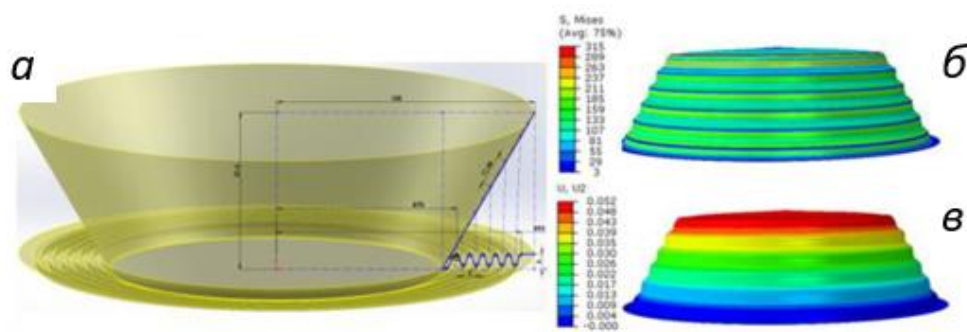


Рис.2.29 Геометричні параметри вихідної (гладкої) конічної заготовки секції КПО та відповідної їй по ізометрії компактного диска (а); поля розподілу залишкових напружень після розкриття диска, МПа (б) і переміщення в осьовому напрямку після зняття тиску, м (в)

Моделювання процесу розкриття плоского диска з жорстким закріпленням по периметру більшої основи проводилося в пружно-пластичній постановці при максимальному внутрішньому тиску  $P_{\text{depl}} \leq 100$  кПа. З урахуванням існуючої нелінійної складової була прийнята пружнопластична модель матеріалу, що базується на асоційованому законі пластичної течії з критерієм плинності Мізеса та правилом ізотропного зміцнення. Розрахункове значення залишкових (після скидання тиску) переміщень вздовж осі симетрії оболонки становить  $U_{\text{max}} \approx 43$  мм без урахування додаткового розміру денця. Після скидання тиску максимальні значення еквівалентних залишкових напружень  $\sigma_e$  (von Mises) відзначаються в області вершин кільцевої складки з найменшим діаметром, сполученою з денцем (Рис.2.29,б). Наявність яскраво виражених кільцевих концентраторів напружень у цій зоні ( $\sigma_{\text{emax}} = 289$  МПа) поєднується з утворенням нерівномірних пластичних деформацій до 5 % по периметру суміжного замикаючого денця, які при натурному експерименті можуть призводити до втрати герметичності оболонки. Вочевидь, подібне явище має спостерігатися і у повнорозмірній моделі.

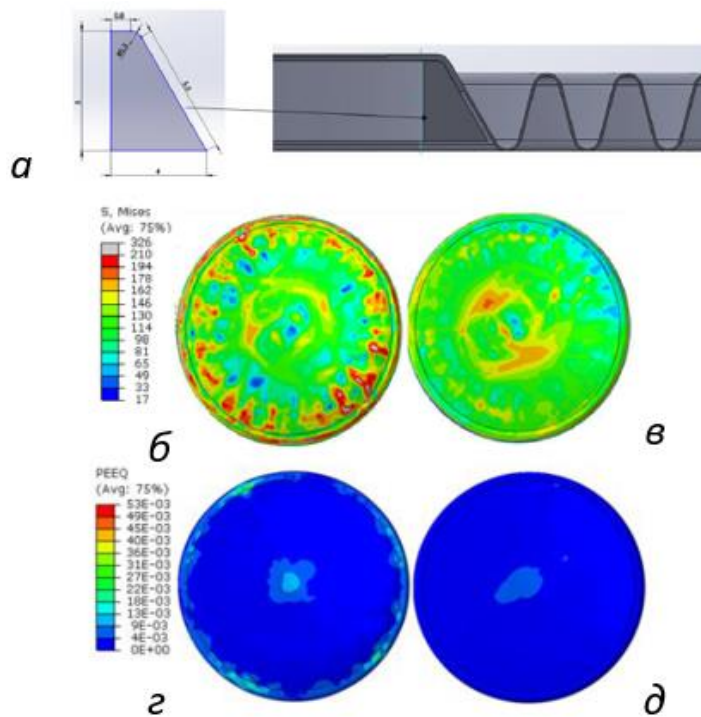


Рис.2.30 Зміцнююче кільце на периметрі денця макета КПО (а); розподіл полів еквівалентних напружень  $\sigma_e$  (von Mises), МПа, у денці при максимальному тиску розкриття без зміцнюючого кільця (б) та з кільцем (в); поля накопичених еквівалентних пластичних деформацій  $U_e$  без зміцнюючого кільця (з) та з кільцем (д)

Для підвищення кільцевої жорсткості периметру замикаючого елемента в зонах кільцевих концентраторів було використано додаткове зміцнююче кільце з алюмінію марки Д16Т (Рис.2.30,а), що дозволяє уникнути потовщення денця і обтяження конструкції. На Рис.2.30 представлені результати порівняльних розрахунків НДС у КПО з підсиленням денця ((в), (д)) та без нього (б), (з).

Слід зазначити значне зниження накопичених пластичних деформацій для розрахункового випадку зі зміцнюючим кільцем ( $U_e = 0,8\%$ , Рис.2.30, (д)) і більш рівномірну якісну картину розподілу деформацій по краях денця. Так, у варіанті без кільця деформації досягають  $U_e = 5.3\%$  (Рис.2.30, (з)) з нерівномірним розподілом по краях денця.

Виготовлення макету КПО. Об'ємне деформування та калібрування.

Параметри зварювання як базового технологічного процесу при виготовленні конічної заготовки секції КПО (Рис.2.29,*а*) розглядаються у п.3.1.1; перетворення зварної гладкої конічної заготовки в компактний диск реалізується за допомогою процесу холодного об'ємного деформування, умовою якого є мінімізація розтягів та стиснень серединної поверхні тонколистового матеріалу. Послідовне, у бік збільшення радіусу, подання формуючого зусилля за допомогою формуючого інструменту (пуансона (1)) дозволяє реалізувати незворотні деформації конічної заготовки (2) на опорних ребрах матриці (3) (Рис.2.31,*а*). У процесі формозміни тонкої металевої оболонки, зони виражених пластичних деформацій локалізовані на околах вершин кільцевих складок на внутрішній та зовнішній лицьових поверхнях (Рис.2.31,*б*), при цьому, мінімальні залишкові напруження на серединній (нейтральній) поверхні є одним з факторів, що забезпечують стабільність геометричних параметрів плоского диска.

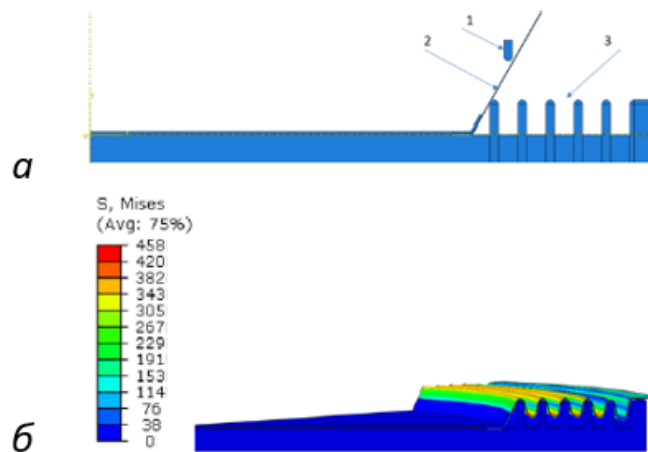


Рис.2.31 Схема об'ємного деформування конічної заготівлі (*а*) та розподіл полів залишкових напружень у перетвореному диску (*б*), МПа

Тестове чисельне моделювання процесу формування плоского диска в осесиметричній постановці дозволило оцінити кінетику напруженого стану для трьох точок по товщині оболонки в зоні вершин першої кільцевої складки найменшого діаметра, що характеризується складнішими умовами формування також через більш консервативні умови жорсткого закріплення.

Так, графік на Рис.2.32,*а* демонструє тимчасову залежність еквівалентних напружень від кроку формування. Перший крок (від 0 до 1 осі абсцис) відповідає процесу деформування складки, тобто вертикальному переміщенню формуючого інструменту у задане положення, другий крок відповідає його поверненню у вихідне положення для формування другої складки і т.д. послідовно для усіх кільцевих складок. Отримане в результаті розрахунку поле залишкового НДС (Рис.2.31,*б*) ілюструє неоднорідність розподілу напружень як у межах кожної зі складок, так і у складках різного діаметра. З графіка Рис.2.32,*а* видно, що реалізація кожного наступного кроку формування складки диска впливає на напружений стан у зоні першої кільцевої складки найменшого діаметра. Відносно невисокі (35...150 МПа) напруження після формування першої складки зростають до значень 280...350 МПа після формування наступних складок. Характер розподілу залишкових напружень для перших чотирьох складок є близьким, але в останній складці рівень еквівалентних напружень (Рис.2.31,*б*) значно нижчий.

Варто відзначити, що при рівних переміщеннях формуючого інструменту максимальні залишкові переміщення кожної з п'яти складок різні, що впливає на їх кінцеві геометричні параметри. Так, отримана в результаті чисельного моделювання глибина складок знаходиться в інтервалі відхилень від  $(a-0,38)$  мм до  $(a+0,4)$  мм (Рис.2.32,*в*) при розрахунковій глибині  $a$  (Рис.2.32,*б*). Як наслідок, змінюється довжина фланцевого відборткування і максимальна товщина диска  $((a+0,55)$  замість розрахункового значення  $(a+0,16))$ , що спричиняє зменшення компактності.



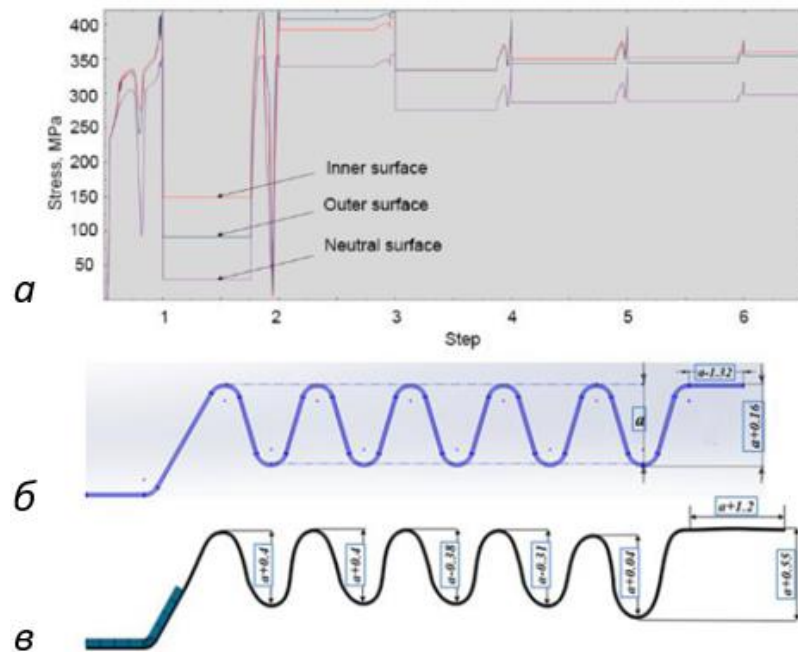


Рис.2.32 Кінетика напруженого стану у зоні вершин складок у процесі формування диска (а) та моделювання відхилення геометричних параметрів складок (в) від теоретичної моделі (б)

Подібні величини відхилень геометричних параметрів диска від теоретичних розмірів пов'язані, перш за все, з урахуванням у чисельної моделі оборотних пружних деформацій після пластичного деформування. Результат розрахунку наочно демонструє необхідність використання алгоритму формування компактного диска, при якому осесиметричні переміщення формуючого інструменту різні на кожному з наступних кроків і вектор формуючого зусилля не орієнтований строго по нормалі до площини диска в межах окремого кроку. Очевидно, що точне уявлення про коректну процедуру формоутворення може бути отримано на підставі експериментальних даних процесу макетування КПО.

Експериментальний процес об'ємного деформування конічних заготовок макета КПО проводився на дослідній установці (Рис.2.33). Матриця (3) з параметрами опорних ребер, еквівалентними геометрії кільцевих складок компактного диска (за Рис.2.31,а (3)), встановлюється на планшайбі редуктора (4) і обертається електродвигуном (5).

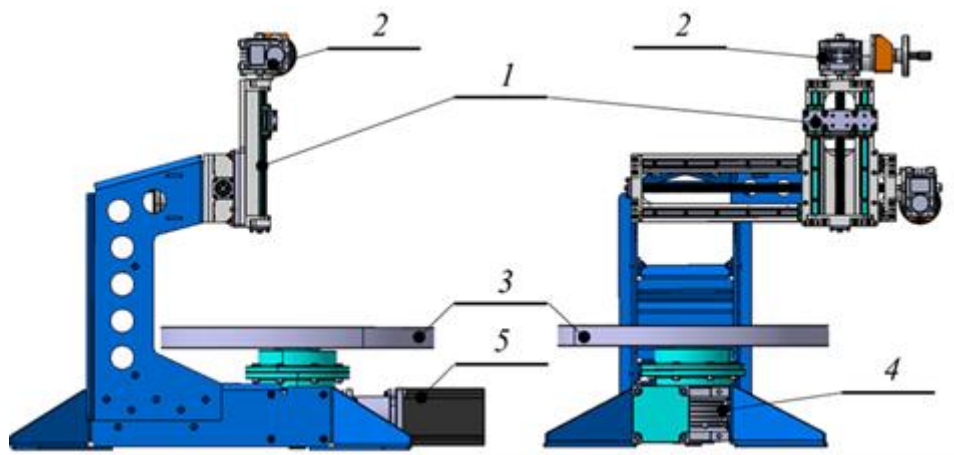


Рис.2.33. Установка для об'ємного деформування заготовок конічних секцій КПО.

Для передачі зусилля формозміни був виготовлений дослідний комплект формуючого обладнання: знімні пуансони з контактною ділянкою (1) у вигляді фасонної пластини з матеріалу з високим коефіцієнтом тертя ковзання (Рис.2.34, *а,б*) або профільного ободу, що обертається на компактному підшипнику кочення (Рис. 2.34 *в*), які жорстко кріпляться на робочому майданчику актуатора вертикального переміщення установки. У свою чергу, кріплення контактної ділянки на швидкознімній напрямній (2) дозволяє при необхідності швидко змінювати конфігурацію комплекту обладнання. Пуансони різних типів можуть використовуватися для формування складок різного радіусу, а також фланцевого відборткування, що завершує складку найбільшого радіусу. У зв'язку з зазначеною вище неоднорідністю НДС у різних складках (Рис.2.32,*в*), для дослідження алгоритму формування компактного диска змінні пуансони типу (*б*) і (*в*) додатково оснащені S-подібними тензорезисторними датчиками НЗ-СЗ-ЗВ-D41 (ZEMIC) (3) та вторинним показуючим пристроєм – ваговим контролером SMART-P (ESIT) (4).

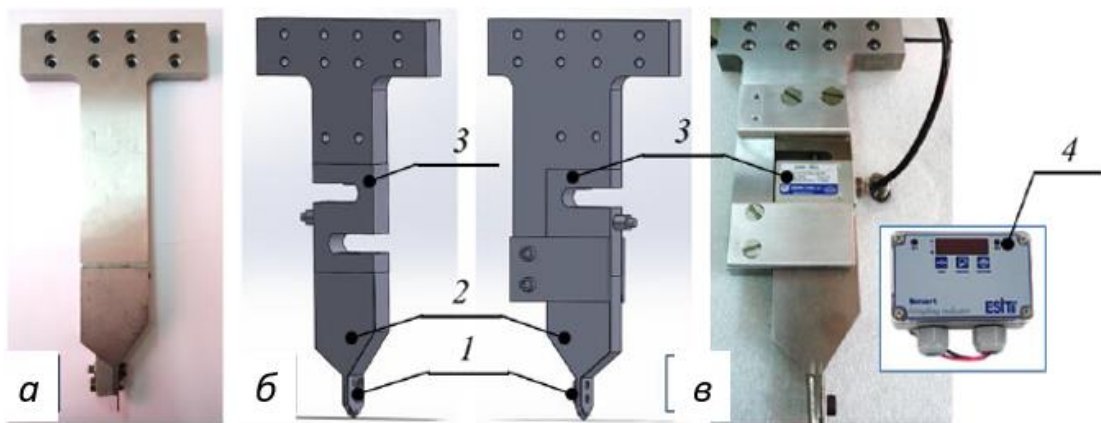


Рис.2.34. Знімні пуансони з тертям ковзання (а, б) та кочення (в) на контактній ділянці (1)

Рис. 2.35 ілюструє результат описаних вище експериментальних робіт: розкрий гладкої заготовки секції макета КПО з нержавіючої сталі з параметрами  $R_I = 130$  мм,  $R_O = 200$  мм,  $\varphi = 180^\circ$ ,  $\delta = 0,15$  мм та конічна заготовка після мікроплазмового зварювання (а); компактна секція (диск) КПО після процедури об'ємного холодного деформування (б) і пакет геометрично еквівалентних дисків після операцій калібрування, готових до подальшого об'єднання в єдину герметичну структуру (в). Технологічне відборткування кромки заготівлі під зварювання ( $f_w$ ) показано на Рис. 2.35(а); фланцеві відборткування компактної секції  $F_I$  і  $F_O$  – на Рис. 2.35(б).

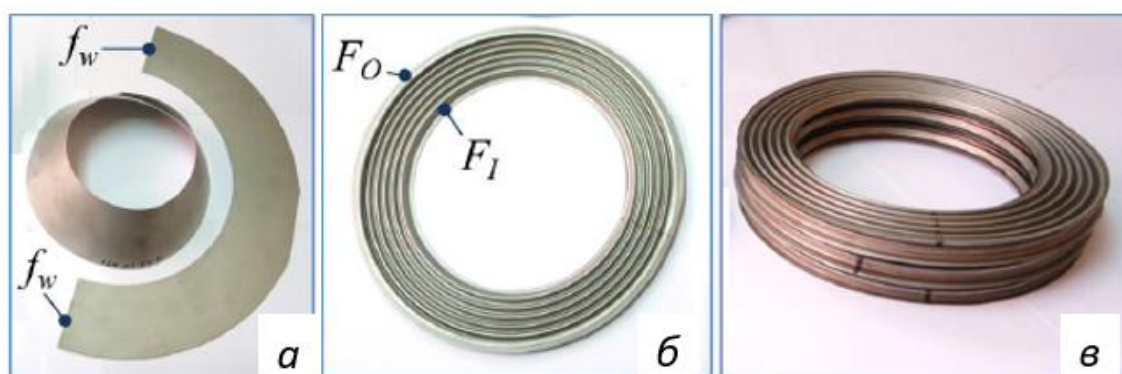


Рис.2.35. Технологічна послідовність виготовлення компактних секцій макета КПО.

Подальше поєднання компактних секцій Рис. 2.35,(в) по площинах відповідних фланцевих відборткувань виконувалося, в першу чергу, для створення герметичного випробувального макета, дослідження кінетики

процесу зворотного перетворення оболонки та експериментальної верифікації чисельної моделі розкриття.

Експерименти з розкриття макетів КПО з п'яти секцій на стенді розкриття (Рис.2.36) продемонстрували збереження структурної цілісності багатосекційної оболонки. Висота повністю перетвореної внутрішнім тиском  $U_{\max} \leq 100$  кПа конічної секції після скидання внутрішнього тиску знаходилася в діапазоні  $H_K = 44 \dots 46$  мм, що дозволяє зробити висновок про відповідність компактності КПО вихідним вимогам.

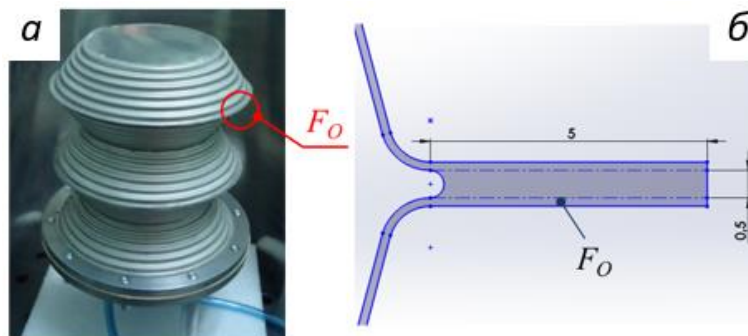


Рис.2.36. Макет КПО з діаметром  $D=200$  мм з 5 секцій після скидання внутрішнього тиску (а) та схема з'єднання фланцевих відбортувань  $F_O$  (б)

Коригування оптимізованої конструктивної схеми КПО. Результати випробувань макета КПО продемонстрували відповідність розрахункових геометричних параметрів конструкції основним вимогам. Так, компактність конічної секції відповідає необхідному співвідношенню 1:10, її висота після розкриття надлишковим тиском і його скидання склала  $H_K = 43,5 \dots 44$  мм при вихідній товщині компактного диска  $h_D = 4,3 \dots 4,4$  мм за винятком секції з замикаючим елементом (денцем), висота якої становить 7,5 мм. Тим не менш, відповідно до результатів досліджень п.2.1.3 (Рис. 2.16), фізико-механічні властивості конкретного конструкційного матеріалу оболонки істотно впливають на величину її зворотних пружних деформацій, гладкість профілю і ступінь розкриття. Очевидно, що поєднання пружно-пластичних властивостей обраного натурального матеріалу ( $E = 203$  ГПа,  $R_{0.2} = 230$  МПа,  $R_m$  ( $\sigma_u$ ) = 651 ГПа,  $\varepsilon = 52\%$ ) макета КПО не може точно відповідати

властивостям повномасштабної конструкції, тобто схильне до деяких коливань як при різних станах поставки однієї марки матеріалу, так й у різних партіях матеріалу одного стану поставки. З цієї причини коригування конструктивної схеми КПО за результатами випробування макета полягало у наданні конструкції запасу компактності (коефіцієнта трансформації)  $K_T$ . Відповідно до П.2.1, найбільш раціональним способом підвищення компактності є збільшення числа  $n$  кільцевих складок компактної секції. Додавання додаткової складки компактної секції КПО при незмінному значенні кроку  $b$  тягне зміну радіуса  $r$ , величина якого є одним з основних факторів, що впливають на власну частоту конструкції. Зменшення кроку  $b$  в межах регламентованого діапазону ((4) п.2.1) призводить до зменшення висоти розкритого конуса, збільшення кількості конічних секцій КПО і, як було показано раніше, сприяє зниженню власної частоти всієї конструкції. Таким чином, при коригуванні профілю необхідно враховувати всі вищеописані фактори, щоб при вищому коефіцієнті трансформації  $K_T$  забезпечити власну частоту КПО не нижче за отриману раніше (2,2 Гц). Було розглянуто три різні варіанти геометричних характеристик складки компактної секції (Рис. 2.37).

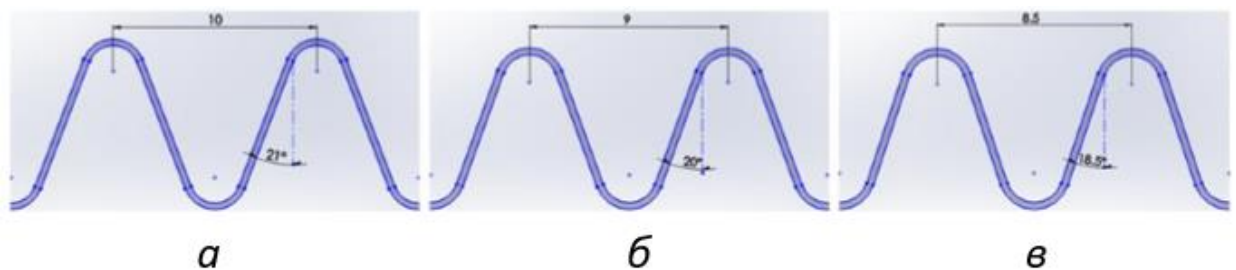


Рис. 2.37. Геометричні характеристики складки компактної секції КПО з кроком кільцевої складки 10 мм (а), 9 мм (б) та 8,5 мм (в)

Основним параметром, що варіюється, є розмір кроку  $b$ , який впливає як на кут нахилу перетвореної поверхні між вершинами складок, так і на висоту отриманих складок (Рис. 2.37). Для кожного з розглянутих варіантів геометричних характеристик складки були побудовані моделі розкриття компактної секції, основні параметри яких представлені в Таблиці 9.



**Таблиця 9** Основні параметри КПО з різним кроком складок

№	Параметр	Од. вим.	Модель 1	Модель 2	Модель 3
1	Крок складки	мм	8,5	9	10
2	Висота конуса	мм	96,16	101,3	120,12
3	Кількість секцій	шт	31	30	27
4	Висота КПО	мм	2991	3039	3030
5	Малий діаметр	мм	278,14	271,76	258,56
6	Маса	кг	9,49	-	9,31
7	Власна частота	Гц	2,18	-	1,92

Конструктивна схема КПО ґрунтується на наявності в ній непарної кількості конусів. Висота конуса з кроком складки  $b = 9$  мм визначає наявність 30 компактних секцій, що не відповідає конструктиву КПО. Отже, як порівняння розглядалися два варіанти розміру кроку складок -  $b=8,5$  мм та  $b=10$  мм. Як очевидно з Таблиці 9 модель 1 ( $b=8,5$  мм) має у порівнянні з моделлю 3 ( $b=10$  мм) на 4 секції більше, і збільшений розмір малого діаметра на 19.58 мм, при цьому її власна частота КПО на 14 % вище. Таким чином, можна дійти висновку, що збільшення малого діаметра робить більш істотний вплив підвищення власної частоти КПО, ніж зменшення кількості секцій.

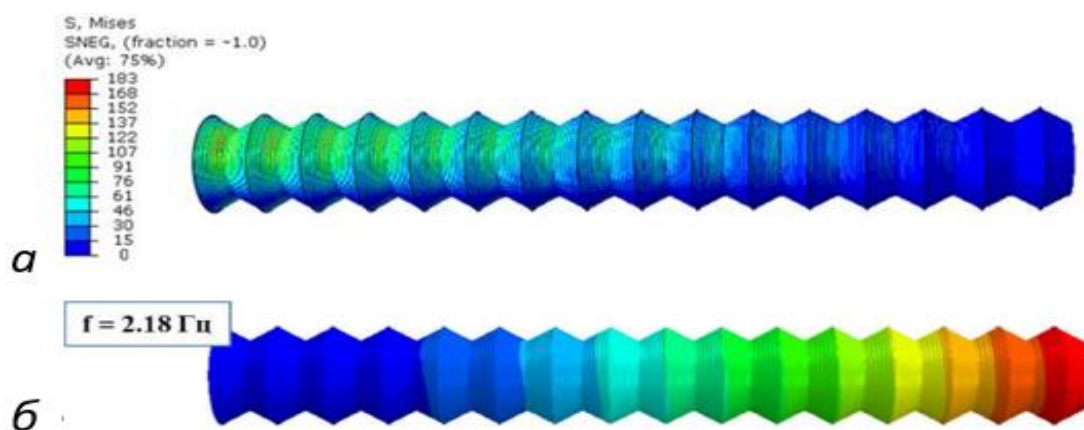


Рис. 2.38 Поле еквівалентних напружень у КПО, МПа (модель 1) при дії регламентованого інерційного навантаження, МПа (а) та поле переміщень конструкції КПО при виконанні модального аналізу (б)

Для КПО з кроком складки 8,5 мм було отримано поле напруженого стану за умов інерційного навантаження 1g, прикладеного до вершини КПО і

спрямованого перпендикулярно до осі конструкції. Максимальні еквівалентні напруження в цьому випадку в зоні концентраторів не перевищують межу плинності матеріалу і становлять 183 МПа (Рис. 2.38).

На Рис. 2.39 представлені перерізи складчастих профілів компактних секцій (дисків) вихідної конструктивної схеми КПО (за Рис.2.28) після коригування (а), дослідної конструкції (макета) КПО в масштабі 1:2 (б) і КПО після остаточного коригування (в).

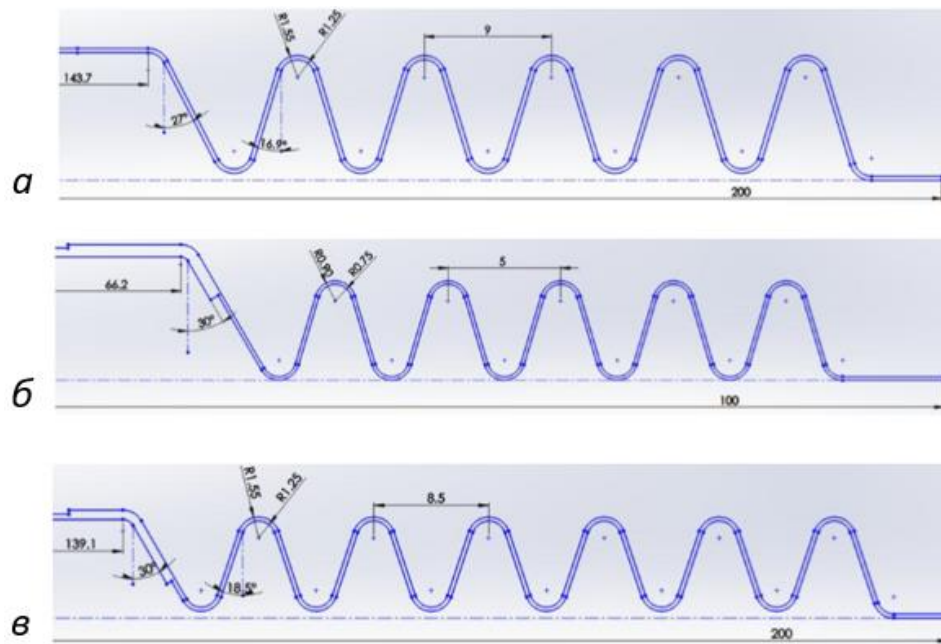


Рис. 2.39. Складчастий профіль компактної секції (диска) КПО відповідно до вихідних даних Табл.8 (а); профіль диска масштабного макета (б) та профіль по Табл.9, відкоригований за результатами натурних випробувань макета (в)

Як було зазначено вище, відсутність чіткого масштабування всіх геометричних параметрів профілів (а), (б) і (в) пояснюється допуском на точність по товщині прокату модельного матеріалу, особливостями з'єднання секцій по фланцевому відбортунню, яке може змінюватись для секцій різного розміру без зниження відносної жорсткості КПО, а також ряд інших факторів. Так, КПО повинна мати непарну кількість секцій, і варіювання локальних геометричних параметрів ( $b$ ,  $r_r$ ,  $r_c$ ) у межах представлених у п.2.1 діапазонів, дозволяє при заданому куті  $\alpha$  забезпечити базові величини ( $L$ ,  $K_T$ ),

що впливають на різницю радіусів ( $R - r$ ) і, отже, висоту конічної секції. Для моделі (а) відповідно до розрахункових залежностей співвідношення  $r_c/\delta \approx 4,7$ , і розрахункова величина кроку складки  $b = 8,6$  мм. Збільшення  $b$  до 9,0 мм дозволило забезпечити необхідний допуск по довжині  $L$  без зміни кута  $\alpha$ . У масштабній натурній моделі (б) збільшення кута на  $3^\circ$ , навпаки, було доцільним, а профіль формувався з урахуванням фактичної товщини модельного матеріалу (для  $\delta = 0,17$  мм  $r_c/\delta \approx 4,9$ , розрахункова величина  $b = 5,04$  мм). В остаточному варіанті моделі кут збережений збільшеним, а величина  $b$  наближена до розрахункового значення ( $b = 8,6$  мм); у порівнянні з моделлю (а), це стало можливим завдяки збільшенню кільцевих складок до  $n = 6$  і, відповідно, збільшенню різниці ( $R - r$ ).

Серед інших факторів, варіювання локальних параметрів може бути викликане і такими суто технологічними міркуваннями, як кратність типорозмірів стандартного металообробного оснащення. Наприклад, при строгому масштабуванні у співвідношенні 1:2 величина радіусу гофра в моделі (б) склала б  $r_r = 0,625$  мм, що викликає очевидні труднощі при токарній обробці контактних поверхонь формуючої оснастки. Крім того, є відмінності фізико-механічних властивостей модельних матеріалів різної товщини, отриманих експериментальним шляхом і використаних при розрахунках чисельними методами. Так, під час розрахунків КПО з профілем Рис. 2.39,а були прийняті властивості сталі AISI 321:  $E = 213$  МПа,  $R_{p0.2} = 233$  МПа,  $\sigma_U = 672$  МПа,  $\epsilon = 66\%$ ; для КПО з профілем Рис. 2.39,б та в:  $E = 203$  МПа,  $R_{p0.2} = 230$  МПа,  $\sigma_u = 651$  МПа,  $\epsilon = 52\%$ . При використанні сталей з іншими властивостями (наприклад, сталь X10CrNi1809) висота розкритої конічної секції становитиме 88,92 мм, і дотримання регламентованої довжини  $\sim 3000$  мм вимагає збільшення кількості секцій на 3 (до 34), що вплине на масогабаритні характеристики КПО як у компактному, так і розкритому стані. Еквівалентні напруження в оболонці конструкції в цьому випадку в процесі розкриття досягають межі міцності матеріалу, що веде до його розміцнення і подальшої втрати цілісності перетворюваної оболонки. Крім



того, раціональним підходом з огляду на експлуатаційні особливості конструкції може бути зниження тиску розкриття та, відповідно, ступеню розкриття складчастої поверхні. У цьому випадку кількість секцій збільшується (до 37), але, додаткового аналізу потребує рівень супутнього зниження жорсткості оболонки, для чого були виконані додаткові дослідження впливу параметрів гофрів на кінетику процесу розкриття.

Порівняльному аналізу підлягали перетворювані оболонки рівної товщини  $\delta = 0,17$  мм, що відповідає товщині матеріалу макета (Рис. 2.28), із співвідношенням  $b/\delta = 34, 26$  і  $20$ . Фрагменти скінченно-елементних моделей даних оболонок, виконані в тривимірній постановці із використанням лінійних чотирикутних скінченних елементів, представлені на Рис. 2,40,а, де  $b/\delta = 34$  (I),  $b/\delta = 26$  (II) та  $b/\delta = 20$  (III).

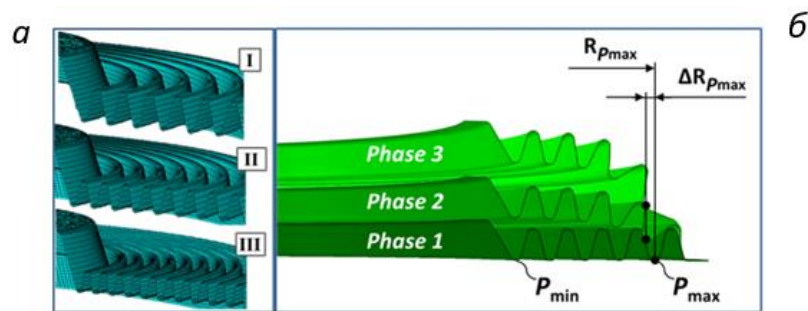


Рис.2.40 Фрагменти скінченно-елементних моделей оболонок із співвідношенням  $b/\delta=34$  (I),  $b/\delta = 26$  (II) і  $b/\delta = 20$  (III) (а) та початкові фази процесу розкриття кільцевої складки оболонки з радіусом  $R_{pmax}$ , відповідним контрольній точці  $P_{max}$  (б)

Основною причиною спотворення поверхні розкривної оболонки є відмінність кінетики складання та розкриття. Рис.2.40,б ілюструє механізм виникнення зон локальної втрати в оболонці, що розкривається. Технологічний процес компактного складання дозволяє змінювати як точку, так і вектор застосування формувальних зусиль. В результаті, на остаточній стадії формування складки в її вершині в околах точок  $P_i$  спостерігаються виражені пластичні деформації та утворюється кільцеве ребро жорсткості. При зворотному розкритті (Рис.2.40,б) ребро здійснює переміщення по траєкторії,

що відповідає різним радіусам конічної оболонки, тобто, зазнає розтягувань і стискань, що породжують викривлення суміжних ділянок оболонки з меншою жорсткістю. На Рис.2.41,*а,б* наведені результати чисельних розрахунків НДС оболонок типу I, II і III в характерних точках  $P_{\min}$  і  $P_{\max}$ . В оболонці типу III ( $b/\delta = 20$ ) мінімальними є як переміщення характерних точок ( $\Delta R_P = \min$ ), так і величини еквівалентних напружень (von Mises)  $\sigma_e$  у точці  $P_{\min}$  (Рис.2.41,*б*). Разом з тим, спостерігається стрибкоподібне розкриття найменшої та найбільшої складок (два піки кривих на Рис. 2.41,*а* (III)), при цьому  $\Delta R_{P_{\max}}$  більш ніж утричі перевищує величину  $\Delta R_{P_{\min}}$ .

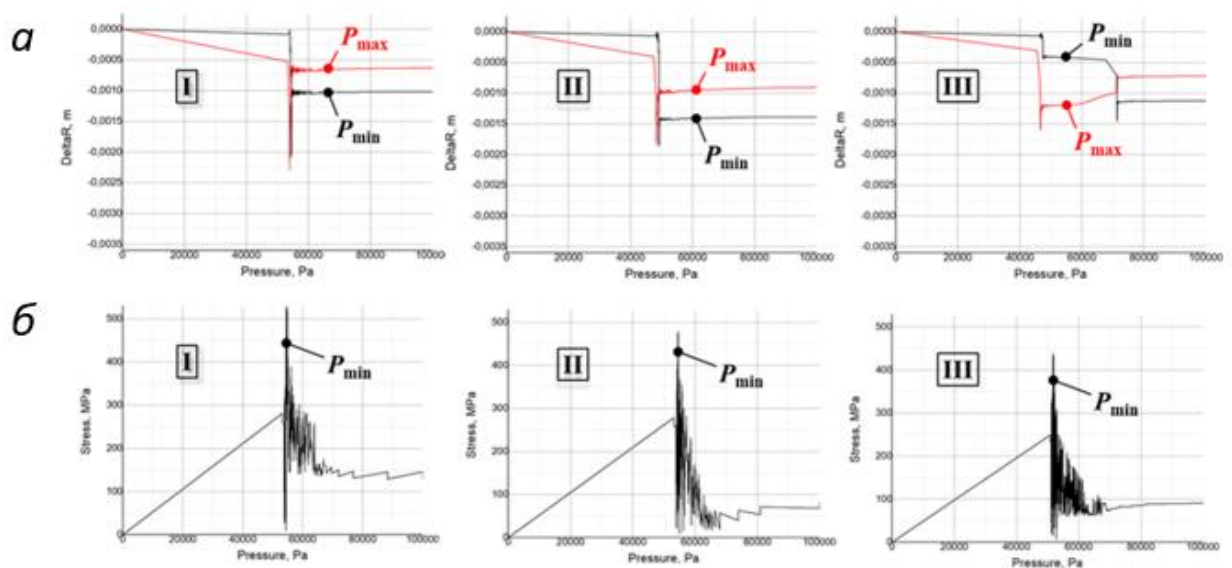


Рис.2.41 Графіки зміни радіусу складки  $\Delta R_P$  у характерних точках  $P_{\min}$  та  $P_{\max}$  оболонок типу I, II та III (по Рис.2.40) при зростанні тиску розкриття (*а*) та графіки зміни еквівалентних напружень  $\sigma_e$  у точках  $P_{\min}$  при зростанні тиску розкриття (*б*)

На Рис. 2.42,*а,б* представлені результати співставлення чисельних моделей розкриття оболонок типу I (6 кільцевих складок,  $b/\delta = 34$ ) та II (8 кільцевих складок,  $b/\delta = 26$ ) з натурними експериментами з розкриття аналогічних оболонок з нержавіючої сталі. Для проведення натурних експериментів більші основи оболонок були закріплені герметично на контурі розкриття, а менші оснащувалися герметичними денцями.

Стадії розкриття оболонки типу I (Рис.2.42,*a*) наочно демонструють утворення геометричних особливостей у вигляді хвилеподібних деформацій на перетвореній поверхні, які не є оборотними після зняття надлишкового внутрішнього тиску. Навпаки, при аналогічному процесі в оболонках типу II (Рис. 2.42,*б*) спостерігаються виключно регулярні вигини у меридіональному напрямку без ознак локальної втрати стійкості як під час розкриття, так і після його завершення. Як видно з результатів чисельного (*a*) та натурного

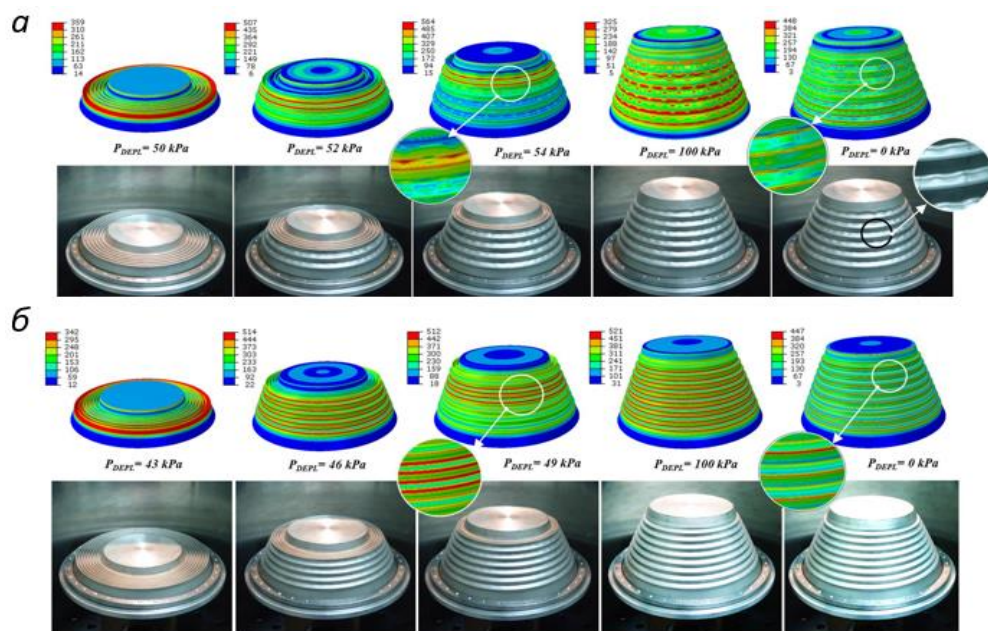


Рис. 2.42 Чисельне моделювання полів еквівалентних напружень  $\sigma_e$  (МПа) та натурний експеримент процесу розкриття при зростанні тиску розкриття  $P_{DEPL}$  (кПа) оболонок типу I (*a*) та типу II (*б*)

(*б*) експериментів, при величині зміни радіусу  $\Delta R_{pi} > 10\delta$  виявляються яскраво виражені незворотні спотворення геометрії поверхні оболонки після розкриття. Однак, при співвідношеннях  $b < 26\delta$  ця залежність не дотримується, оскільки в цьому випадку зменшення глибини складки призводить до збільшення її жорсткості і, як наслідок, до нерівномірності розкриття складок з різними радіусами (Рис. 2.40,*a*, (III)). Таким чином, прагнення більшої компактності оболонки за інших рівних умов призводить до найбільших складнощів в її експлуатації, і відхилення за межі діапазону співвідношень  $26\delta \leq b \leq 29\delta$  можливе у бік збільшення кроку  $b$ . Остаточна

конструктивна схема КПО може бути відкоригована в межах варіацій геометричних параметрів, викликаних описаним вище впливом фізико-механічних властивостей фактичного конструкційного матеріалу.

## Висновки

- 1) В результаті послідовної оптимізації розроблювана КПО зберегла вихідну несну здатність при одночасному збільшенні компактності і дотриманні всієї сукупності вимог до конструкції. Результат оптимізації КПО підтверджує отримані висновки про вклад кількості ділянок сполучення конічних секцій, їх діаметра і товщини матеріалу в зміну жорстких характеристик багатосекційної конструкції. Зокрема, було визначено, що величина малого радіуса  $r$  більш істотно впливає на жорсткість у порівнянні зі зміною кількості конічних секцій. Модифікована конструктивна схема дозволила спростити технологічний процес виготовлення КПО та знизити її масу, уникнувши використання додаткових елементів жорсткості (кільцевих шпангоутів).
- 2) Наведено оцінку впливу ключових параметрів процесу імпульсного мікроплазмового зварювання на структурні особливості шва до та після деформації. Визначено умови формування якісного зварного шва для всіх використаних типів з'єднань, виявлено необхідність впровадження контролю прихованих дефектів безпосередньо в процесі зварювання з метою їх оперативного усунення.
- 3) Продемонстровано, що відмінність кінетики процесу складання та подальшого розкриття визначає той факт, що уникнути спотворень поверхні розкритої оболонки можна тільки за дотримання вузького діапазону відносин кроку кільцевої складки до її товщини ( $b/\delta$ ), який був визначений як  $26 \delta \leq b \leq 29 \delta$  та підтверджений у роботі розрахунковим і експериментальним методом. Визначено, що менш критичним є збільшення кроку при незмінній товщині оболонки, оскільки в цьому випадку при розкритті не повинні спостерігатися різкі відхилення багатосекційної конструкції від осі симетрії.

### **Розділ 3. РОЗРОБКА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ ВИГОТОВЛЕННЯ КПО І ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ЇХ РЕАЛІЗАЦІЇ**

У попередніх розділах на послідовних етапах визначення найбільш раціональної конструктивної схеми КПО було проведено загальний аналіз базових функціональних властивостей довгомірної перетворюваної оболонки – її компактності, несної здатності та герметичності критичних вузлів. Тим не менш, унікальною особливістю досліджуваного класу конструкцій є відсутність практичної можливості перевірки зазначених властивостей у її кінцевому (робочому) стані, який набувається поза досяжністю оперування відомими експериментальними методами – зокрема, у вакуумі космічного простору. З іншого боку, перехід в робочий стан (процес розкриття) супроводжується екстремальним деформуванням оболонкової поверхні та зварних з'єднань, що суттєво впливає на механічні властивості конструкції та, потенційно, на її цілісність. Зазначене протиріччя вимагає залучення методів попередньої оцінки та прогнозування кінцевих жорсткісних властивостей КПО, їх взаємозв'язку із ступенем розкриття, а також дотримання критеріїв якості вихідних зварних з'єднань, що забезпечують їх необхідну вакуумну щільність після проходження деформаційних циклів.

#### **3.1. Технологія зварювання та об'ємного деформування структурних елементів КПО**

##### **3.1.1. Зварювання прямолінійних швів секцій КПО**

При аналізі здатності до зварювання матеріалів оболонки розглядалися ряд факторів, основними з яких є хімічний склад матеріалу, що визначає температурний інтервал його кристалізації, фазовий склад і структурні перетворення під час нагрівання та охолодження, а також механічні властивості, що визначають здатність матеріалу сприймати навантаження,

що виникають внаслідок неоднорідності нагрівання та охолодження, жорсткості конструкції і т. ін.

Експериментальне зварювання заготовок проводилося за допомогою мікроплазмового способу на прямій полярності з можливістю регулювання тепловкладень шляхом зміни частоти та шпаруватості струму дуги, який у порівнянні з іншими способами зварювання з високою концентрацією енергії джерела тепла (LBW, EBW) дозволяє отримати більш якісне з'єднання за більш низьких вимог до якості збирання заготовок і є більш технологічним з погляду механізації процесу.

Передбачувані області використання конічних КПО вимагають особливої ретельності у відпрацюванні завдань надійності та довговічності тонких оболонок, складання яких передбачає наявність зварних прецизійних швів великої протяжності.

Для зварювання заготовок конічних секцій макета КПО із прогнозованою товщиною матеріалу на етапі дослідного виготовлення було використано експериментальне складально-зварювальне оснащення (див. Рис. 3.2) з системою лінійного переміщення плазмотрона. Орієнтовне значення погонної енергії

$$Q_1 = \frac{I_{eq} \cdot U_w \cdot \eta}{V_w} \quad (7)$$

де  $U_w$  - зварювальна напруга, [A],  $\eta$  - ефективний ККД, що приймається для процесу мікроплазмового зварювання  $\eta = 80\%$  [20],  $V_w$  - швидкість зварювального процесу [мм/с],  $I_{eq}$  - еквівалентне значення струму зварювання, що враховує тривалість імпульсу струму, паузи та період циклу  $T$  при зварюванні в імпульсному режимі,

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_w^2 dt}, \quad (8)$$

де  $I_w$  – струм зварювання, [A],  $T = (\tau_i + \tau_p)$  – період циклу, [мс], при імпульсному зварюванні з частотою  $f_{рс} = 25$  Гц і швидкості зварювання  $V_{св} \approx 3$  мм/с склало  $Q_1 \approx 17.9$  Дж/мм. Як видно з наведених на Рис. 3.1 результатів експериментального зварювання досліджуваних з'єднань, при збільшенні

значень  $Q_I$  від рекомендованих на 25% (25,2 Дж/мм) різко знижується ймовірність формування якісного з'єднання, при цьому також розширюється зона перекристалізації, в якій знижується його міцність .

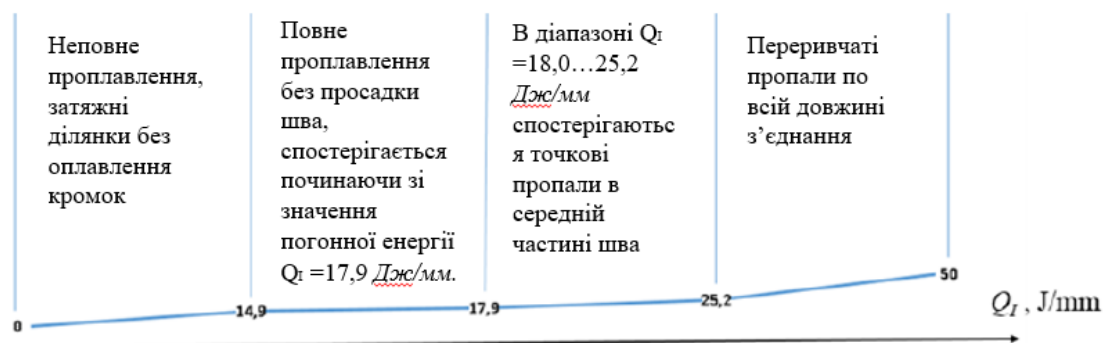


Рис.3.1 Характеристики зварного з'єднання при різних значеннях погонної енергії зварювання  $Q_I$  (Дж/мм)

Зниження значень  $Q_I$  на 17% (14,9 Дж/мм) і більше від рекомендованого призводить до неповного проплавлення при зварюванні, та ймовірності розривів при деформуванні. Отримані на стадії макетування результати будуть використані при зварюванні секцій повнорозмірної КПО. При загальній низькій (до 8% у режимі налагодження) кількості відбракованих зварних з'єднань, штатна експлуатація оснастки із системою переміщення дозволила визначити ряд недоліків дослідного обладнання. У їх числі - відсутність достатнього ступеня свобод взаємного прецизійного переміщення компонентів установки та відсутність тривалої геометричної стабільності притискних та тепловідвідних поверхонь складально-зварювального оснащення. Так, фіксуюче зусилля мідних притискних елементів існуючого оснащення забезпечувалося тільки в 4-х точках при гвинтовому затиску з крутним моментом  $\sim 8 \dots 10$  Н×м на кожній з них. Результатом оптимізації є спроектована установка для зварювання прямолінійних швів (Рис.3.2,а) та пристрій для складання та захисту швів з клавійними притисками (Рис.3.2,б).





Рис. 3.2 Загальний вид установки для зварювання прямолінійних швів (а) та пристрій для збирання та захисту прямолінійних швів секцій КПО при зварюванні (б)

Установка оснащена додатковим вертикальним позиціонером та прецизійним позиціонером плазмотрона, що дозволяють оперативно орієнтувати джерело зварювального нагріву по осі шва в трьох площинах переміщення. Система керування лінійного актуатора спрощує нівелювання можливих дефектів зварних з'єднань у зоні дії крайових ефектів.

Конструкція складально-зварювального оснащення дозволяє створювати розподілене нормоване зусилля притискання по всій довжині кромek кінчної секції КПО, що зварюється, за допомогою клавiш. Клавiшний притиск реалізований окремим модулем, який налаштовується перед процесом зварювання та фіксується на підкладці за допомогою прецизійних штифтів-фіксаторів. Пристрій включає також редукційну камеру для ламінаризації потоку захисного газу ( $Ar$ ) до кореня шва.

Зварювання структурних елементів багатосекційної КПО є найефективнішим способом надання конструкції необхідного комплексу властивостей – структурної цілісності, герметичності, жорсткості та довготривалої надійності. Виконання різних типів нероз'ємних з'єднань методом зварювання було логічним етапом експериментальних робіт, що дозволили відпрацювати технологію виготовлення повнорозмірної конструкції, методи забезпечення її надійності, а також уникнути зайвих витрат на модельні матеріали.



Перевага в технології мікроплазмового методу зварювання (МРАВ) перед лазерним або електронно-променевим зварюванням була обумовлена необхідністю використовувати відбортовку зварюваних кромок, що зменшують теплові деформації навколошовної зони, а також формують підсилення шва і, як наслідок, збільшують його поперечну міцність на розрив. З іншого боку, надмірне посилення шва є вкрай небажаним через поверхневий контакт звареної заготовки з формуючим обладнанням у процесі ротаційного формування гофрів оболонки. Геометрія шва з попередньою відбортовкою кромок на величину, що дорівнює двом товщинам матеріалу, коригувалася за допомогою варіацій імпульсних режимів зварювання, що дозволили також впливати на структурно-фазові стани зварного з'єднання і досягти його найкращих фізико-механічних характеристик. Підтвердження доцільності та необхідності використання відбортування було виконано шляхом проведення додаткових чисельних розрахунків НДС досліджуваних з'єднань.

Моделювання було виконано для зразків із сталі AISI 321 товщиною  $\delta=0,175$  мм, що відповідає товщині виконаної в масштабі 1:2 модельної конструкції, і шириною 30 мм, довжина зразків (175 мм) відповідала довжині зварного з'єднання кінчної заготівлі макету перетворюваної конструкції. Для моделювання процесу зварювання була побудована скінчено-елементна модель заготовок на основі об'ємних кубічних 4-х вузлових елементів, що використовуються для вирішення термомеханічних завдань. Розміри осередку в зоні дії джерела тепла (в ЗТВ) становлять  $0,2 \times 0,2 \times 0,2$  мм, розміри осередку в основному металі в будь-якому напрямку не перевищують 2 мм. Моделювання виконано для форсованих режимів охолодження тонколистової аустенітної сталі в повітряному середовищі (коефіцієнти конвективної та контактної (кондуктивної) теплопередачі відповідно  $25 \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}$  та  $1000 \text{ Вт/м}^2 \times \text{К}$ ). У реальних умовах зварювального процесу рівномірність охолодження кореня шва захисним газом (Ar) через серію профільованих сопел клавішного зварювального оснащення діаметром 1 мм і

кроком 5 мм попередньо контролювалася за рівномірністю розподілу тиску газового середовища на кожному із сопел ( $P \approx 40 \dots 45 \text{ Pa}$ ) за допомогою стандартної трубки Прандтля. Слід зазначити, що вища швидкість охолодження металу шва при  $f_{pc} = 200 \text{ Hz}$  і  $\tau_i/\tau_p = 2,5/2,5$  при повторному нагріванні металу шва в імпульсному режимі до температури, що не перевищує верхньої критичної точки (в діапазоні  $900 \div 1100 \text{ }^\circ\text{C}$ ), може відповідати процесу нормалізації для аустенітної сталі AISI 321.

Рис.3.3 ілюструє характер розподілу еквівалентних зварювальних напружень у зразках заготовок без умов жорсткого закріплення без посилення відборткуванням кромки, що зварюється (а,б) і з посиленням (в,г). Зазначений симетричний розподіл напружень при наявності відборткування висотою  $\sim 0.5 \text{ mm}$  при зварюванні з жорстким закріпленням заготовок в оснастці (моделі в,г) забезпечує достатню геометричну стабільність лінії сплавлення. Зона перегріву основного металу заготовки з відборткуванням суттєво звужується, що сприяє вкрай важливому для подальшої технології компактного складання зниженню поперечної опуклості шва.

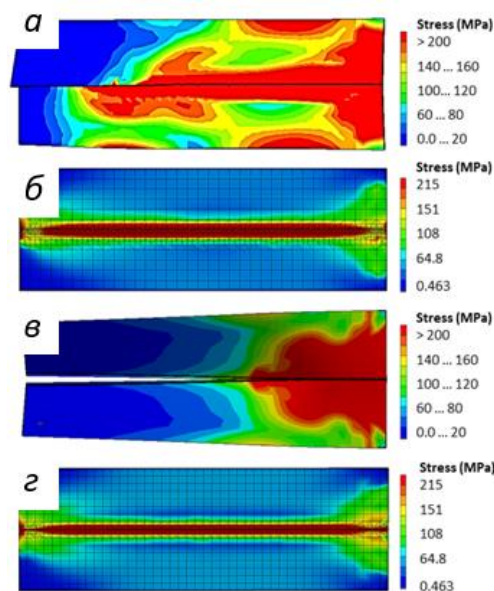


Рис.3.3 Розподіл еквівалентних напружень (von Mises) у зразках товщиною  $\delta=0,175 \text{ mm}$  без посилення кромки, що зварюється, відборткування (а,б) і з відборткуванням (в,г). Показано еквівалентні напруження в процесі

зварювання зразка у вільному стані (а,в) та еквівалентні залишкові напруження у зразках при жорсткому закріпленні (б,в)

Визначення діапазону погонних енергій, за яких при використанні мікроплазмового зварювання можливе стійке формування якісних прямолінійних нероз'ємних з'єднань з металевої фольгової стрічки, є достатньо дослідженим питанням та описано в роботах [21],[22] та ін. Разом з тим, бажана величина погонної енергії може досягатися при різних комбінаціях параметрів імпульсних режимів, що визначають різний ступінь неоднорідності мікроструктури і розподілу легуючих елементів у металі шва і навколошовній зоні, а також коливань мікротвердості в перерізі шва. За інших рівних умов оптимальність зазначених характеристик, а також їх поєднання з кращими пружно-пластичними властивостями і властивостями міцності нероз'ємних з'єднань була основним критерієм вибору між групами параметрів зварювального процесу.

При розрахунковому визначенні значення погонної енергії зварювального процесу еквівалентне значення зварювального струму в імпульсному режимі визначалося як:

$$I_{EQ} = \sqrt{\frac{1}{T} (\int_0^{T_i} I_{dp}^2 dt + \int_{T_i}^T I_{pa}^2 dt)}, \quad (9)$$

де  $I_{dp}$  – зварювальний струм, [А],  $I_{pa}$  – струм чергової дуги, [А],  $T = (T_i + T_p)$  – період циклу зварювання, [мс],  $T_i$  – тривалість імпульсу, [мс],  $T_p$  – тривалість паузи, [мс].

Попередньо було досліджено процес зварювання для сталевих фольг, відповідних до масштабного макету (1:2) повнорозмірної конструкції. У Таблиці 10 представлені групи параметрів імпульсного процесу зварювання для послідовності зростаючих частот зварювання  $f_{pc} = 10, 25, 100$  та  $200$  Hz. Наприклад, при експериментальному зварюванні заготовок, з товщиною  $\delta = 0,175$  мм в імпульсному режимі при величині  $I_{eq} = 7,6$  А,  $U_w = 12$  В і  $V_w = 2$  мм/с оптимальний результат досягався при  $Q_I = 36.5$  Дж /мм, що за частоти

$f_{pc} = 25$  Гц відповідає тривалості імпульсу  $\tau_i = 20$  мс і паузи  $\tau_p = 20$  мс (9). Наведені у Таблиці 10 групи параметрів відповідають величині  $Q_I = 36.5$  Дж/мм і дозволяють досягти стійкого формування шва при різній частоті імпульсного зварювання. Для кожної з груп такі параметри як: діаметр сопла = 2 мм, діаметр електрода = 1 мм, відстань від сопла до зварюваних кромek = 2 мм, газ – аргон вищого сорту, витрати захисного газу = 0,4 л/хв є незмінними. Слід зазначити, що при подальшому збільшенні  $f_{pc}$  не спостерігалось принципового підвищення якості зварних з'єднань, а при оцінці вакуумної щільності швів після деформування достатнє значення коефіцієнта витoku ( $\sim 1,3 \times 10^{-6}$  Па $\times$ м<sup>3</sup>/с) повітря через зони фіксації конструкції до стенду розкриття та зони зварних швів, було зафіксовано на зразках, зварених на частоті  $f_{pc} > 10$  Гц.

Сумарний коефіцієнт витoku в зварній оболонковій конструкції оцінювався за величиною зниження надлишкового тиску в її внутрішньому обсязі, яке було виміряно за допомогою датчика тиску Kobold SEN-9601 0 B045 A з точністю  $\leq \pm 0.5\%$  від повної шкали на відрізку часу в кілька годин. Далі, зварні з'єднання оболонки детально досліджувалися на герметичність методом щупа за допомогою течешукача Agilent HLD MR15, що дозволяє в режимі реального часу здійснити індикацію величини витoku у виявленій точці можливої нещільності шва.

**Таблиця 10.** Групи параметрів імпульсного процесу зварювання

$I_w$ [A]	$f_{pc}$ [Hz]	$\tau_i$ [ms]	$\tau_p$ [ms]	$Q_I$ [Дж/мм]
10	10	50	50	36.5
10	25	20	20	36.5
10	100	5	5	36.5
10	200	2.5	2.5	36.5

При постійній величині погонної енергії, чергування циклів нагріву та охолодження при відповідному поєднанні значень  $\tau_i/\tau_p$  при різних значеннях  $f_{pc}$  дозволяє здійснювати повторну термообробку металу шва в ванні, що

утворилася при впливі попереднього імпульсу таким чином, щоб була досягнута перекристалізація структури металу, підвищивши рівноосність та рівномірність розмірів структурних одиниць (кристалітів). Разом з тим зміна  $f_{pc}$ , і, отже, характеру динамічного впливу плазмового стовпа на ділянку розплавленої ванни, що у стані кристалізації, також сприяє поліпшенню її структури, зменшенню розміру зерен (кристалітів), розбиваючи осередки (ядра) їх утворення. Таким чином, при відомому  $Q_1$  завдання дослідження зводилася до визначення конкретного значення  $f_{pc}$ , що відповідає оптимальній макро-і мікроструктурі вакуум-щільного зварного з'єднання.

Наступна ітерація розробки технології зварювання полягала в перенесенні отриманих результатів на фольгові металеві матеріали зі збільшеною вдвічі товщиною, що відповідає орієнтовному діапазону товщин повнорозмірної конструкції. Для складання та зварювання гладких конічних заготовок було використано установку для зварювання прямолінійних швів, що має модульну конструкцію і надалі використовується також для зварювання кільцевих швів. Перед складанням та зварюванням на пристрої, плоска заготовка секції проходить операцію формування мікровідборткування прямолінійних ділянок розкрою на пристосуванні для формування відборткування. При виготовленні макета КПО використовувався ручний пристрій для відборткування кромки (Рис.3.4).

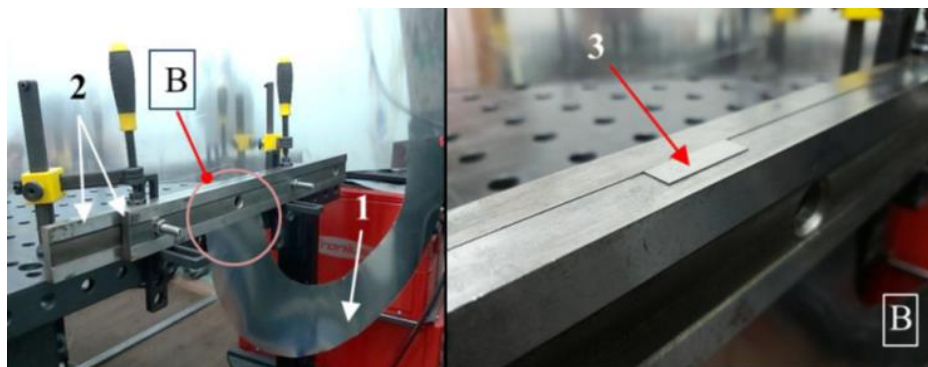


Рис.3.4. Пристрій для відборткування кромки заготовок під зварювання

Гладка заготовка секції КПО (Рис.3.4) фіксувалася в притискних плитах з шліфованою робочою поверхнею (поз.2) таким чином, щоб прямолінійна кромка заготовки була вищою за площину кромки плит на висоту 0,5 мм, що забезпечувалося порівнянням з мірним еталоном аналогічної товщини (Поз.3). Потім виконувався формуючий прохід ручним пуансоном із заокругленою формуючою поверхнею по кромці заготівлі секції в поздовжньому напрямку з орієнтацією пуансону під кутом 45° до напрямку проходу. Якість формування відборткування визначається емпіричним шляхом, і кількість формувальних проходів залежить від зусилля притискання пуансона оператором. Критерієм завершення операції є гладкість торцевої кромки отриманої відбортки та її щільне прилягання до робочої поверхні притискної плити. По завершенню гладка секція КПО звільняється з оснастки та виконується аналогічна послідовність операцій для другої кромки.

Перед наступним зварюванням, а також між подальшими тривалими циклами зварювання проводиться перевірка рівномірності витоку захисного газу (Ar) з послідовних отворів піддуву оснастки для складання та захисту прямолінійних секцій КПО (Рис.3.5, поз.А). При підготовці обладнання до процесу зварювання було використано стандартну трубку Прандтля (Рис.3.5, Поз.Д) з мікроманометром у якості вторинного приладу. Пристосування звільняється від притискних секцій В і С, і трубка (Д) жорстко фіксується у кріпленні системи переміщення так, щоб її вимірювальний канал був співвісним з вектором витоку газу кожному з отворів каналу піддуву А, тобто орієнтований по нормалі до робочої площини оснастки, і послідовно встановлюється над кожним отвором за допомогою системи переміщення. Величина повного тиску ( $P_a$ ) за показаннями мікроманометра на кожному з отворів може бути переведена у величину швидкості потоку  $v$  (і, відповідно, витрати середовища) з використанням Ф.(10):

$$v = 1,41K \sqrt{\frac{p_{в.д}}{\rho}} \quad (10)$$

де  $v$  – швидкість потоку, м/с;  $K$  - коефіцієнт напірної трубки,  $K=1$ ;  $p_{в.д.} = 0,001\rho g \sin \alpha$ , [Па] - видимий динамічний тиск потоку (при  $K=1$ );  $\rho$  – щільність захисного газу (Ar), кг/м<sup>3</sup>.

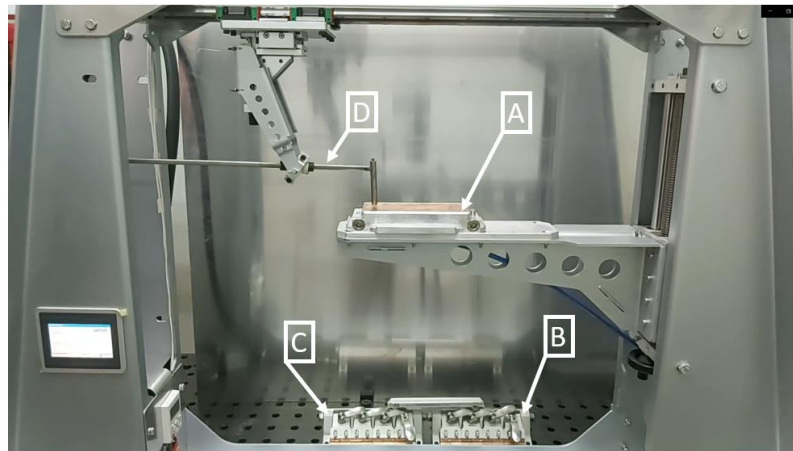


Рис.3.5 Перевірка рівномірності витоку захисного газу; А - канал подачі захисного газу оснастки; В и С – притискні секції; D – трубка Прандтля.

Через штуцер оснастки для складання та захисту було здійснено подачу захисного газу (Ar) з нормативною витратою 0,4 л/хв, контролюваною ротаметром Dwyer RMA-14-SSV, необхідним критерієм є рівність витрат при витоку Ar в кожному з отворів каналу піддуву. Ця процедура дозволила якісно і кількісно підтвердити вкрай важливу для зварювання матеріалу товщин фольгового класу рівномірність витоку на кожному з послідовних отворів піддуву. Після формування відборткування гладкі конічні заготовки позиціонувалися і фіксувалися на пристрої (поз.3) установки (Рис.3.6).

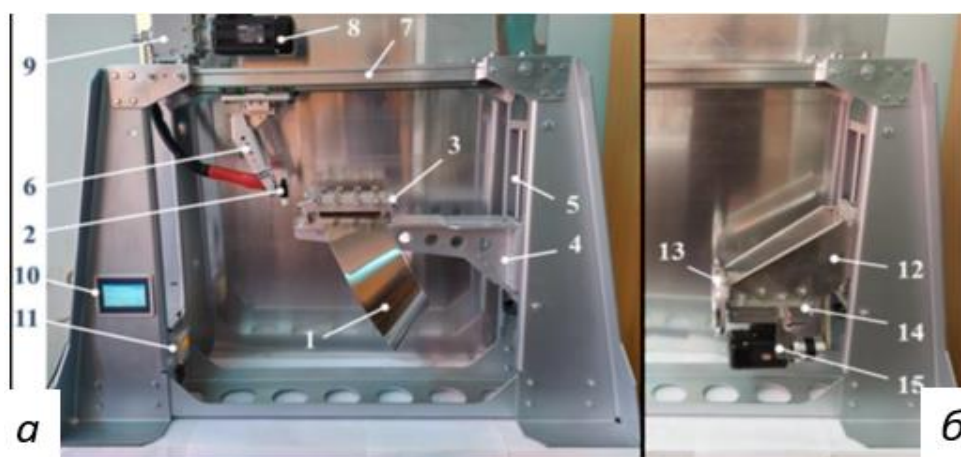


Рис.3.6. Загальний вигляд установки для зварювання прямолінійних швів у конфігурації з пристосуванням фіксації та захисту кореня шва у процесі зварювання конічної заготовлі секцій КПО (а) та обертач установки для збирання та зварювання кільцевих швів (б)

Зварювання заготовки (1) здійснюється плазмотроном (2) у пристрої фіксації та захисту кореня шва (3), розміщеному на консолі (4) вертикального позиціонера (5). Джерело зварювального нагріву на позиціонері (6) пов'язане з актуатором горизонтального переміщення (7), асинхронним двигуном (8) та з циліндричним редуктором (9) які керуються за допомогою програмованого логічного контролера (ПЛК) (10) з сенсорним монітором. Так як операції зварювання прямолінійних і кільцевих швів секцій КПО виконуються по черзі, рама установки для зварювання прямолінійних швів використовується також і як несуча основа для обертача (Рис.3.6,б) установки зварювання кільцевих швів. Відповідно, управління обертанням установки зварювання кільцевих швів після завершення циклу зварювання прямолінійних швів може здійснюватися за допомогою ПЛК (10) та контуром керування з текстовим дисплеєм та кнопковим введенням, яке може використовуватися для локального управління, параметризації та діагностики (11). При зварюванні кільцевих з'єднань (Рис.3.6,б) на опорну плиту станини встановлюється кронштейн (12) з планшайбою обертача (13) на корпусі обертача асинхронним двигуном (15) із планетарним редуктором. Почергове встановлення на планшайбу (13) пристосування для зварювання внутрішніх та зовнішніх швів дозволяє послідовно здійснити зварювання компактних секцій КПО в єдину структуру. Після фіксації конічної заготовки секції КПО (Рис. 3.6 (1)) у пристрої (Рис. 3.6, (3)) схема розташування кромки, що зварюються, має вигляд, представлений на Рис. 3.7, б.



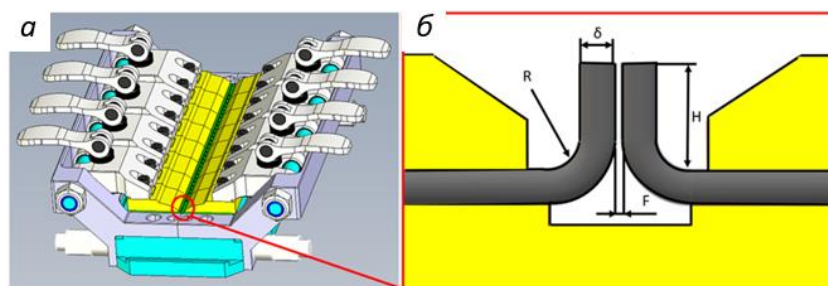


Рис.3.7 Схема розташування кромки, що зварюються.  $\delta$  – товщина металу,  $R$  – радіус згину,  $F$  – максимально допустимий зазор між зварюваними кромками,  $H$  – висота технологічного відборткування.

Орієнтовні геометричні параметри вузла, що зварюється (за Рис.3.7):  $\delta = 0,3 \dots 0,4$  мм;  $H = 0,5$  мм;  $R = 0,2$  мм;  $F = 0,01$  мм. При зварюванні мікроплазмовим способом заготовок з нержавіючої сталі товщиною  $\sim 0,3 \dots 0,4$  мм важливо дотримуватися точності складальних операцій і суворо дотримуватися наведених в Таблиці 11 параметрів  $X$  (3 мм) та  $Z$  (2,5 мм), а також  $F$  (0,01 мм) та  $H$  (0,5 мм), відхилення від даних параметрів призводять до ряду дефектів зварного з'єднання.

**Таблиця 11.** Параметри процесу зварювання прямолінійних швів заготовок

К, мм	$I_s$ , А	$T_{up}$ , с	$I$ , А	$T_{down}$ , с	$V$ , мм /с	$d_{cy}$ , %	$I-G$ , Г, %	$F-P$ , Гц	$I_p$ , А	$X$ , мм	$Z$ , мм	$q_p$ , л/ хв	$q_t$ , л/ хв	$d$ , мм
0,3	11	off	10	off	20	50	50	200	4	3	2.5	0.5	6	1

Наведені в Табл.11 параметри є стандартними для використаного зварювального пристрою Fronius TransTig 800 Job:  $K$  – товщина матеріалу, що зварюється,  $I_s$  – стартовий струм,  $T_{up}$  – час наростання струму,  $I$  – зварювальний струм,  $T_{down}$  – час спаду струму,  $V$  – швидкість зварювання,  $d_{cy}$  – відношення імпульсу до паузи,  $I-G$  – базовий струм,  $F-P$  – частота імпульсу,  $I_p$  – струм чергової дуги,  $X$  – відстань між притискними губками,  $Z$  – відстань від електрода до виробу, що зварюється,  $q_p$  – витрата плазмоутворюючого газу,  $q_t$  – витрата захисного газу,  $d$  – діаметр електрода.

У якості плазмоутворюючого і захисного газу було використано аргон вищого сорту.

### 3.1.2 Технологія ізометричного формоперетворення вихідних структурних елементів КПО

Практична реалізація процесу ізометричного формоперетворення усічених зварних конічних секцій КПО є найбільш критичним елементом послідовності створення перетворюваної конструкції та підтвердження достовірності розглянутих в п.2.1 методологічних аспектів технології. Після завершення процесу зварювання та процедури попередньої перевірки герметичності зварних з'єднань капілярним методом контролю проводилося формування так званого фланцевого відбортування заготовок (див. Рис.3.7). Фланцеві відбортування належать площинам, нормальним до осі симетрії конічної заготовки, і служать для об'єднання кільцевих контурів секцій КПО в єдиний вакуумно-щільний елемент жорсткості - кільцевий шпангоут. Для формування відбортувань методом холодного об'ємного деформування було розроблено комплект знімного оснащення, яке інтегровано в конструкцію установки (Рис.3.9) для збереження базової точності позиціонування заготівель КПО. Схематичне зображення оснастки представлено на Рис. 3.8.

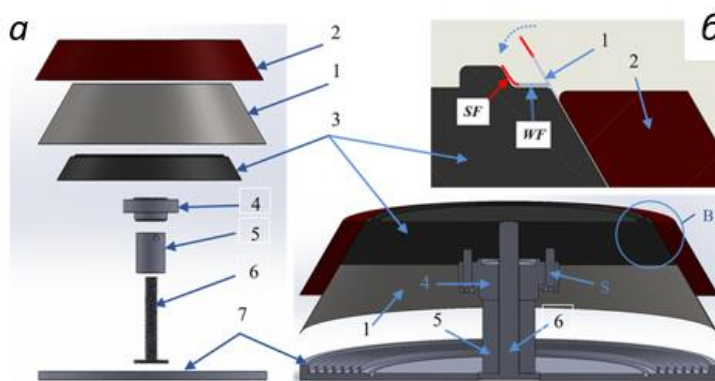


Рис.3.8 Комплект оснастки для формування фланцевого відбортування на гладких конічних заготівлях секцій КПО

З урахуванням значної кількості технологічних операцій при виготовленні, калібруванні та складанні секцій КПО в єдину структуру, було виконано дублювання установки для формування кільцевих складок (гофрів) оболонки КПО з модифікуванням вузлів переміщення. Так, між рамою і основою горизонтального актуатора (Рис.3.9,б,(1)) інтегрована несуча поворотна панель, що дозволяє змінювати КПО кут атаки ( $\pm\psi$ ) контактних ділянок формуючого або калібрувального інструменту по відношенню до заготовок секцій, що фіксуються і приводяться в обертання. Установки для операцій гофрування (Рис.3.9,а) та відборткування/калібрування (Рис.3.9,б) мають модульну конструкцію із взаємною заміністю вузлів реалізації переміщення. Так, редуктор актуатора PMRV03063B14 (2) може мати як ручний привід (маховик Elesa GN92380K12RSR) (3), більш доцільний для операцій калібрування, так і сервопривід з кроковими двигунами 23HS2430 NEMA23 (4), керованими за допомогою пульта Manual pulse generator MPG100 (5).

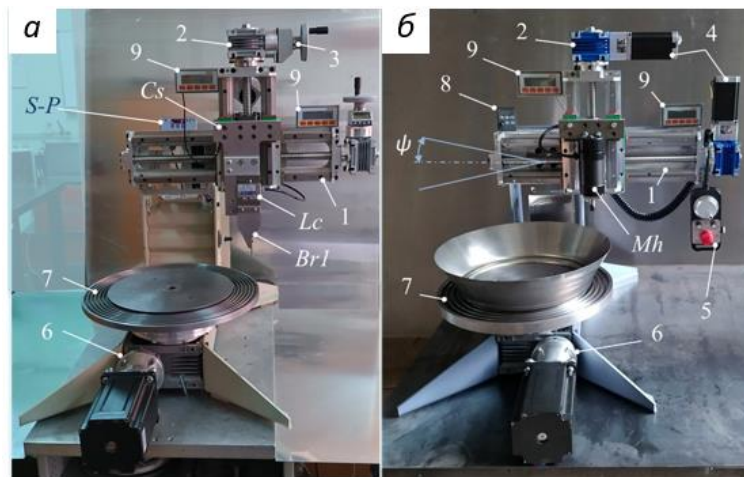


Рис.3.9 Установка для формування кільцевих складок (гофрів) оболонки КПО (а) та її модифікована версія, яка використовується в операціях відборткування, калібрування та складання секцій КПО (б)

Крім можливості нахилу актуатора, установка (б) має симетрично зміщений щодо осі редуктора фланець двигуна приводу (6), що дає більший операційний простір для операцій калібрування, і більшу товщину матриці

(7) з кільцевою канавкою для загину фланцевого відбортування. Можливість взаємної заміни вузлів установок (а) та (б) дозволяє, при одночасному використанні, оперативно змінювати їх конфігурацію та функціональне призначення відповідно до технологічної потреби.

При виготовленні КПО були використані два основні типи формуючої оснастки, основою для яких є загальний швидкознімний кронштейн (Рис.3.10, (Br1)), що приєднується до S-подібного тензорезисторного датчика НЗ- СЗ-3В-D41 (Lc) на консолі пуансона (Cs) із вторинним приладом – ваговим контролером SMART-P (S-P). Найкращі результати процесу для об'ємного деформування кільцевих складок (гофрів) оболонки були отримані при використанні пуансонів з тертям ковзання (RP1), виконаних у вигляді профільних пластин з листової бронзи (наприклад, безолов'яної бронзи марки БрАМц9-2). Пуансони з тертям кочення (RP2) являють собою радіально-упорні підшипники різного типорозміру, що встановлюються на кронштейн, і використовуються при операціях формування фланцевої відбортовки. Третій тип знімного оснащення – кронштейн (Br2) високошвидкісної фрезерної головки 400W, ER8 з драйвером NVBDL (Mh), керованої за допомогою пульта генератора імпульсів MPG100 (8), що має уніфіковане роз'ємне з'єднання с датчиком (Lc) та використовується в операціях калібрування фланцевих відбортувань секцій КПО. Для контролю переміщень оснастки в горизонтальній та вертикальній площинах з точністю  $\pm 0,1$  мм у двох установках використані абсолютні енкодери Elesa Ganter MPI - 15 (9).

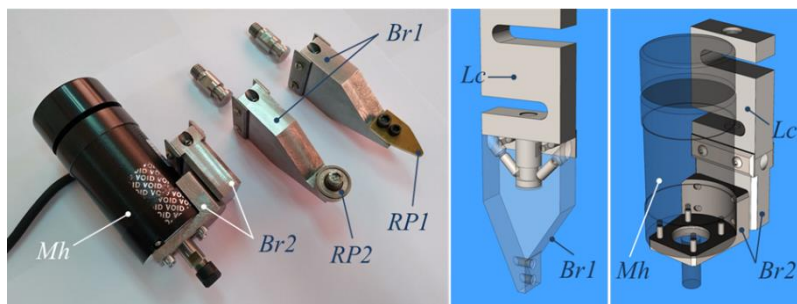


Рис.3.10 Розроблене швидкознімне формувальне та калібрувальне оснащення установок для формування кільцевих складок

Послідовність операцій із формування фланцевих відбортовок представлена на Рис.3.11. Для реалізації процесу деформування кромки гладкої заготовки використовувалися знімні пуансони з тертям кочення (RP2). Комплект оснастки (Рис.3.8) встановлюється на вісь (6), яка співвісно сполучається з матрицею (7) за допомогою роз'ємного (різьбового) з'єднання. Проставка (5) та конектор (4) з кріпленнями служать для вертикального позиціонування конічної основи (3), на яку встановлюється та жорстко співвісно фіксується за допомогою притискного фланця (2) гладка конічна заготовка (1). Далі, оснащення приводиться в обертання, і відбортування двох типів формується контактною ділянкою знімного пуансона, що переміщується у вертикальній та горизонтальній площинах актуаторами установки. В результаті наведених операцій були підготовлені для подальшого формоперетворення (гофрування) пари гладких конічних заготовок (Рис.3.12,а), що сполучаються по контурах меншої основи за допомогою кільцевого з'єднання.

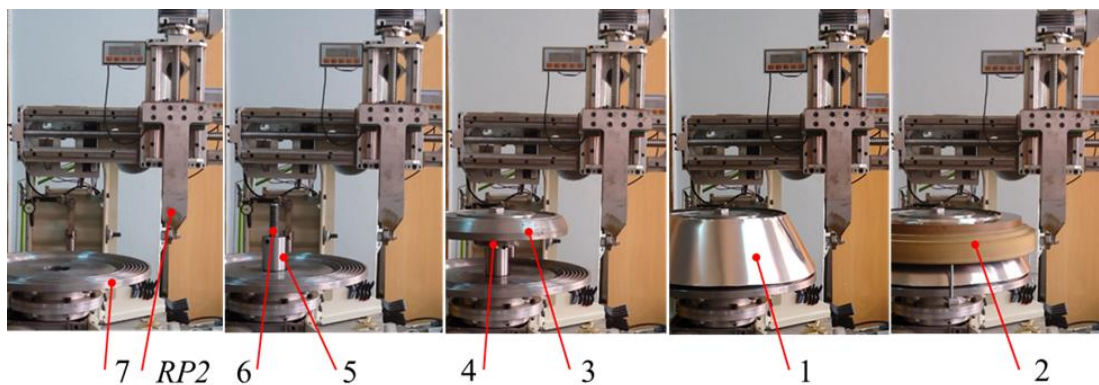


Рис.3.11 Послідовність процесу відбортування гладких конічних заготовок секцій КПО зі сталі AISI321 товщиною  $\delta = 0,3$  мм.

Далі, конічна заготовка зі сформованою фланцевою відбортовкою жорстко співвісно закріплювалася в матриці за допомогою притискного диска (Рис.3.12,б,(D)) і за допомогою формуючого зусилля знімних пуансонів з тертям ковзання (RP1) реалізувався процес утворення кільцевих складок (гофрування, (б), (в)). Наприкінці процесу формування диска зовнішні торці



заготовок (Рис.3.12,в), які можуть мати незначні хвилеподібні деформації, перетворюються на зовнішньому контурі матриці за допомогою пуансонів RP1, RP2 у відбортуння з конфігурацією, аналогічною фланцевим відбортунням внутрішнього (меншого) діаметра. Після повного формування пари складчастих дисків (на Рис.3.12,г показана пара з одним сформованим диском) на їх внутрішніх та зовнішніх торцях зберігаються відбортовки, які можуть бути об'єднані у жорсткі кільцеві з'єднання багатосекційної КПО.

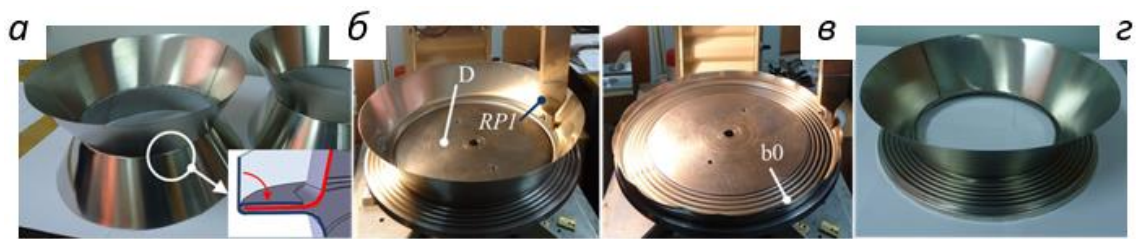


Рис.3.12 Процес формоперетворення (гофрування) гладких конічних заготовок з фланцевою відбортункою

Варіювання розглянутого в п.3.1.3 подальшого процесу зварювання фланцевих відбортунк суміжних плоских дисків (секцій) КПО дозволяє використати з'єднані пари відбортунк у якості ефективного елемента жорсткості, здатного суттєво підвищити базову частоту власних коливань конструкції в цілому.

### 3.1.3 Зварювання внутрішніх та зовнішніх кільцевих швів

Кільцеві внутрішні шви. Зварювання замкнутих просторових конструкцій з фольгових матеріалів товщиною 0,3 мм мікроплазмовим методом є процесом, що вимагає точної фіксації заготовок, що не мають достатньої власної жорсткості, ефективного охолодження зони з'єднання та їх прецизійного переміщення в оснастці, в якій відбувається позиціонування і зварювання. Базові дослідження цієї технології належали до стадії виготовлення масштабного макета КПО. З переходом до виготовлення повнорозмірного варіанту конструкції більшого діаметра була вирішена

проблема пошуку компромісу між необхідною жорсткістю та масивністю складальної оснастки з достатньою теплопровідністю зон фіксації заготовок, а також наявністю операційного простору для зварювального джерела нагріву. Для зварювання внутрішніх кільцевих з'єднань було розроблено спеціальне оснащення (Рис.3.13), яке забезпечує рівномірну швидкість обертання, регульоване зусилля притиску зварювальних кромek і належне тепловідведення в зоні зварювання.

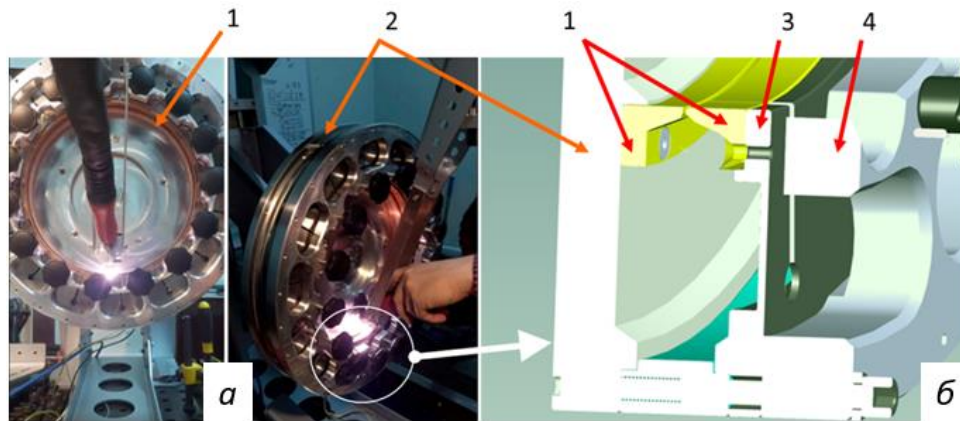


Рис.3.13 Оснащення установки в процесі зварювання внутрішнього кільцевого шва (а) та розріз зони фіксації та зварювання шва (б)

Тепловідведення при зварюванні проводиться мідними тепловідвідними притискачами (Рис.3.13, (1)), один з яких жорстко закріплений на основі (Рис.3.13, (2)), а другий базується по зовнішньому диску 1 (Рис.3.13, (3)), що дозволяє здійснити первинне стискування заготовок з точним позиціонуванням. Для остаточного стиснення пари плоских секцій під зварювання використовується жорсткий зовнішній диск 2 (Рис.3.13, (4)). Для внутрішніх зварних з'єднань меншого радіусу протестовано ряд технологічних параметрів, що впливають на процес формування шва. В ході експериментальних зварювальних тестів були досліджені критичні параметри, які необхідно ретельно контролювати крім власне режимів зварювання: це швидкість і рівномірність обертання привідної системи, висота кромки компактних секцій (висота зварюваної кромки над кільцевим клавішним притиском) і відстань від зварювальної

кромки до сопла PTW 500. Наслідком порушення рівномірності обертання привідної системи є коливання погонної енергії процесу, при цьому порушується регулярність мініатюрної зварювальної ванни, що утримується здебільшого силами поверхневого натягу, аж до появи нещільностей шва і непроварів.

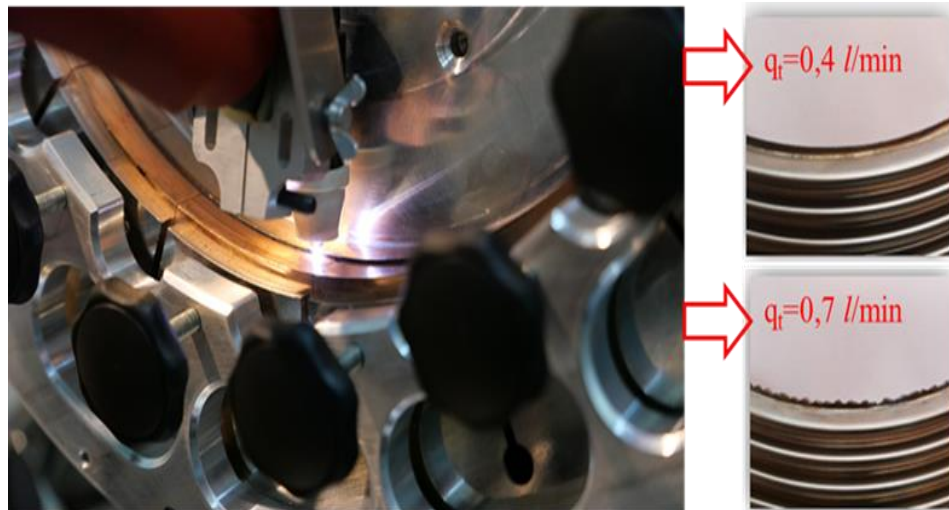


Рис.3.14 Формування кільцевого зварного з'єднання на оснастці для внутрішніх кільцевих швів та вплив витрати захисного газу (Ar) на формування шва

Подібний негативний вплив на якість шва може надавати ненормована висота кромки, що зварюється над притиском, яка впливає на режим відведення тепла; оптимальне значення цього параметру становить 1 мм. Нерівномірне формування шва може бути викликане також недотриманням відстані від зварюваної кромки до сопла плазмотрона (значення параметра 2 мм) і відсутністю співвісності осі плазмотрона і зазором кромки ((F) на Рис. 3.14) у будь-який момент процесу зварювання, що провокує появу деформованої кромки. Останній з основних негативних факторів при формуванні кромки, що зварюється, - надлишковий динамічний тиск стовпа захисного газу плазмотрона (див. Рис.3.14).



**Таблиця 12** Параметри процесу зварювання внутрішніх кільцевих швів заготовок КПО

K, мм	I <sub>s</sub> , А	N <sub>up</sub> , с	I, А	T <sub>down</sub> , с	V, мм/с	d <sub>cy</sub> , %	I-G, %	F-P, Гц	I <sub>p</sub> , А	X, мм	Z, мм	q <sub>p</sub> , л/хв	q <sub>t</sub> , л/хв	d, мм
0,3	11	off	10	off	2,5	50	50	200	4	3	2.5	0.4	6	1

Наведені в Табл.12 параметри є стандартними для джерела Fronius TransTig 800 Job і використовуються при введенні на кнопковій панелі пристрою. Тут, K – товщина матеріалу, що зварюється, I<sub>s</sub> – стартовий струм, T<sub>up</sub> – час наростання струму, I – зварювальний струм, T<sub>down</sub> – час спаду струму, V – швидкість зварювання, d<sub>cy</sub> – відношення імпульсу до паузи, I-G – базовий струм, F-P – частота імпульсу, I<sub>p</sub> – струм чергової дуги, X – відстань між притискними губками, Z – відстань від електрода до виробу, що зварюється, q<sub>p</sub> – витрата плазмоутворюючого газу, q<sub>t</sub> – витрата захисного газу, d – діаметр електрода. У якості плазмоутворюючого і захисного газу використовується аргон вищого сорту. Як і у разі порушення точності складання, порушення режимів зварювання призводить до механічних дефектів (нещільностей) шва або порушення механічних характеристик зварної зони, шва та ЗТВ, що породжує виникнення дефектів мікроструктури при наступних циклах деформування конструкції.

Привідна система оснастки для зварювання як внутрішнього, так і зовнішнього шва представлена на Рис. 3.15. У даній конфігурації вона дозволяє забезпечити рівномірність процесу обертання та точний контроль переміщень джерела зварювального нагріву.

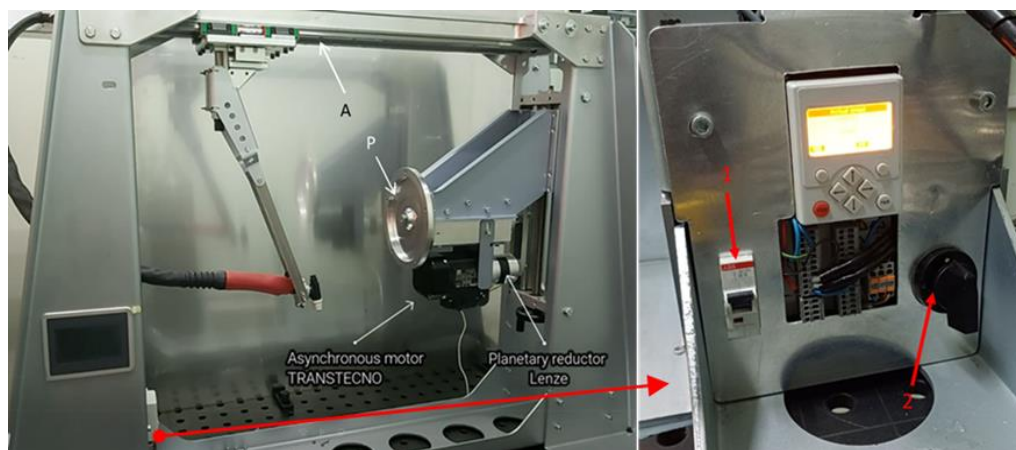


Рис.3.15 Привідна система для зварювання внутрішніх та зовнішніх кільцевих швів.

Після виготовлення пари компактних плоских секцій КПО проходить процес калібрування в зборі в оснащенні за допомогою фрези ER8 400W, що встановлюється на високошвидкісній фрезерній головці на кронштейні. Секції жорстко фіксуються, приводяться в обертання на матриці установки для гофрування, і кромки секцій зводяться в контакт з фрезою при швидкості її обертання 8000 об/хв. Секції готові до подальшого зварювання, коли висота оброблюваної кромки досягає 1,5 мм від мідних притискачів.

Далі, оснастка встановлюється в посадкове місце встановленої на блоці підшипників планшайби приводної системи (Рис.3.15,(P)) і жорстко закріплюється. Переміщенням актуатора (Рис.3.15,(A)) і точними ручними регулюваннями проводиться орієнтація плазмотрона по осі з'єднання, що зварюється згідно з даними Табл.13, після чого може бути розпочато процес зварювання внутрішнього кільцевого з'єднання з використанням параметрів Таблиці 12. Після завершення процесів позиціонування переводимо живлення з двигуна актуатора на двигун обертача переключивши тумблер у вертикальне положення при увімкненому тумблері живлення (1).

Кільцеві зовнішні шви. Зварювання секцій КПО по зовнішньому периметру принципово відповідає внутрішньому шву за схемою з'єднання, але відрізняється необхідністю створення більшого стискаючого зусилля при різному поперечному розмірі оснастки, а також віддалення опорної площини

від базових стрижневих консольних елементів. Для зварювання такого типу швів було виготовлено оснащення Рис.3.16, яке забезпечує щільне компонування зварних секцій між собою по всьому діаметру з'єднання. Саме точність позиціонування та контролю геометрії зварюваних кромок разом з режимом зварювання є критичною для отримання якісного шва.

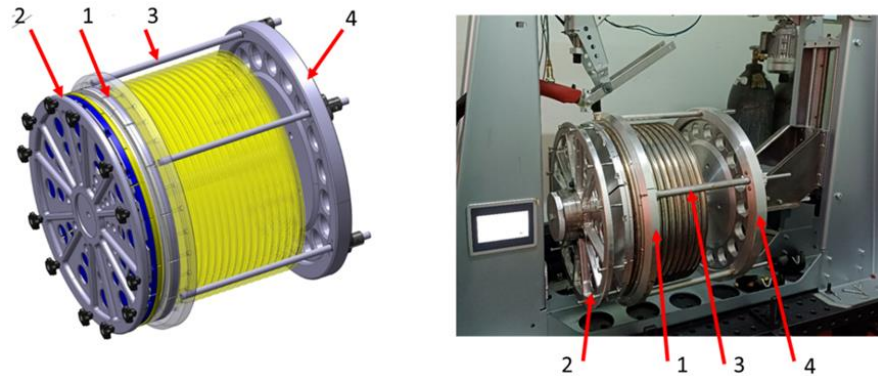


Рис.3.16 Пристрій для збирання та зварювання зовнішніх кільцевих швів.

З'єднання секцій КПО по зовнішньому діаметру виконується попарно, в оснастку закладаються дві пари попередньо з'єднаних внутрішнім швом секцій і зварюються між собою зовнішнім швом. Кромки, що зварюються, попередньо проходять процедуру калібрування (Рис.3.17,*а*) за допомогою торцевої механічної обробки високошвидкісною фрезерною головкою з фрезею з торцевою насічкою зубців. Дана операція усуває різновисотність кромки, що зварюються після їх позиціонування в оснастці, це забезпечує рівномірність оплавлення і формування шва. Після операції калібрування можливе утворення металевих буртиків на кромках, його видалення не є обов'язковим, оскільки додатковий об'єм металу сприяє кращому формуванню шва для зварних товщин, при яких зварювальна ванна утримується в основному завдяки силам поверхневого натягу.

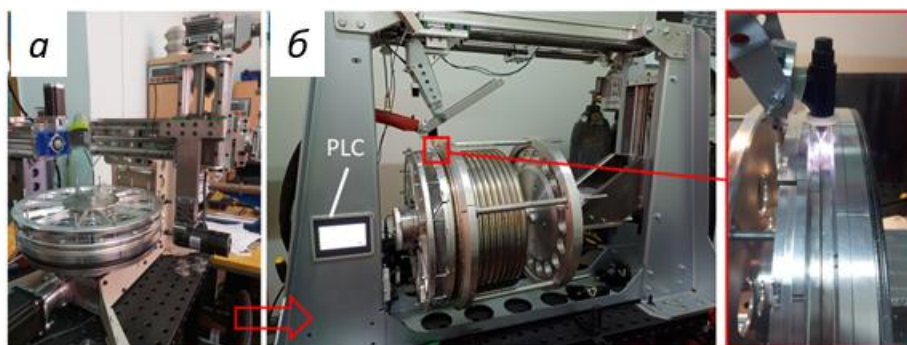


Рис.3.17 Послідовність операцій при з'єднанні пар секцій КПО по зовнішньому периметру; *а* – процедура калібрування; *б* – процедура зварювання.

Послідовність зварювання: спочатку зварюються по зовнішньому периметру дві пари попередньо з'єднаних внутрішнім швом (Табл.13) секцій, стиснутих між притискним кільцем (Рис.3.16,(1)) і зовнішньою планшайбою (Рис.3.16,(2)), після чого рухома частина оснастки відводиться по напрямних осях (Рис.3.16,(3)) від внутрішньої планшайби (Рис.3.16,(4)), звільняючи простір для наступної пари зварюваних секцій.

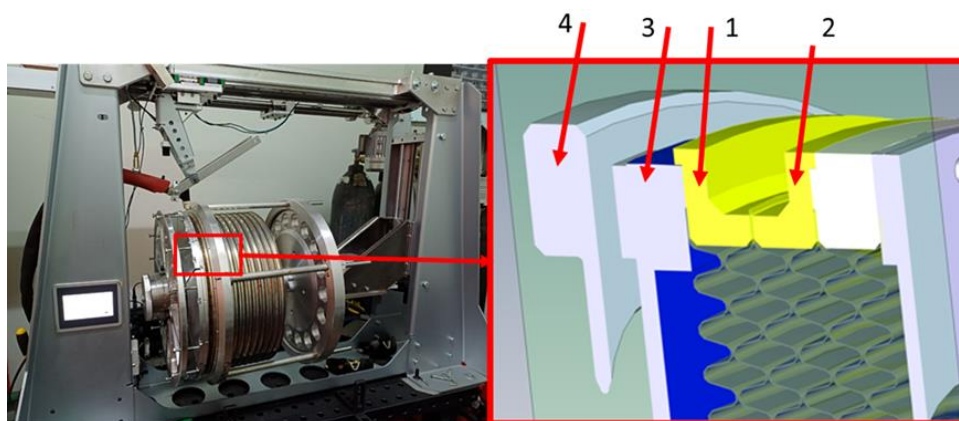


Рис.3.18 Установка для складання та зварювання зовнішніх кільцевих швів, схематичне розташування зварних секцій (6 шт) у пристрої.

За аналогією зі зварюванням пар компактних секцій на пристосуванні для внутрішніх швів, оснащення зовнішніх швів для щільного стиснення і позиціонування суміжних кромek зварюваних секцій, має мідний ложемент (Рис.3.18, (1,2)), який базується на оковці (Рис.3.18, (3)). Необхідне зусилля

притиску кромок в кільцевих мідних деталях (1) і (2) знімної частини оснащення забезпечується зовнішньою планшайбою (Рис.3.18,(4)).

Зі збільшенням кількості зварених між собою секцій в оснастці слід враховувати збільшення відстані від консолі, на якій утримується оснастка, до зони зварювання. Цей факт впливає на чутливість дуги до будь-яких вібраційних та ударних впливів, тому потрібно мінімізувати зайві рухи та переміщення поблизу оснастки. Режим, на якому відбувається процес зварювання, представлений у Табл.13; важливим є дотримання параметру витрати захисного газу  $q_t$ .

**Таблиця 13**

Параметри процесу зварювання зовнішніх кільцевих швів заготовок КПО

K, мм	I <sub>s</sub> , А	N <sub>up</sub> , с	I, А	T <sub>down</sub> , с	V, мм/с	d <sub>cy</sub> , %	I- G, %	F- P, Гц	I <sub>p</sub> , А	X, мм	Z, мм	q <sub>p</sub> , л/хв	q <sub>t</sub> , л/хв	d, мм
0,3	11	off	10	off	2	50	50	200	4	3	2.5	0.4	6	1

Параметри, наведені в Табл.13, аналогічні наведеним у Табл.12, є стандартними для джерела Fronius TransTig 800 Job і використовуються при введенні на кнопковій панелі пристрою. Порухення вищезгаданих характеристик призводить до виникнення дефектів, аналогічних до випадку зварювання внутрішніх кільцевих швів.

Замикаюча секція (кришка, або дно (див. Рис.2.30) приєднується в останню чергу до секцій, зібраних у тому ж оснащенні. Отримання якісного зварного шва по зовнішньому діаметру залежить від точності складальних операцій та дотримання наведеного в Табл.14 режиму зварювання.

**Таблиця 14** Параметри процесу зварювання замикаючої секції (дно)

K, мм	I <sub>s</sub> , А	N <sub>up</sub> , с	I, А	T <sub>down</sub> , с	V, мм/с	d <sub>cy</sub> , %	I- G, %	F- P, Гц	I <sub>p</sub> , А	X, мм	Z, мм	q <sub>p</sub> , л/хв	q <sub>t</sub> , л/ хв	d, мм

0,3	11	off	175-206	off	5	20	20	30	4	3	2.5	0.4	6	1
-----	----	-----	---------	-----	---	----	----	----	---	---	-----	-----	---	---

Замикаюча секція складається з власне гофрованого диска та кришки (денця), які з'єднуються між собою прорізним швом (TIG) з використанням наступного режиму зварювання: зварювальний струм  $I=175-206$  А; швидкість зварювання  $V = 5$  мм/сек; частота імпульсного струму  $F-P = 30$  Гц; діаметр електрода  $d=2,4$  мм (марка WL-20); висота дуги 1,5 мм. Додатково, співвідношення амплітуди струмів (мінімального до максимального) становить 20%. Зварювання різнотовщинних деталей проводиться описаним спеціальним методом через нерівномірне відведення тепла, отриманого від нагрівання зварювальною дугою. Одним з методів нівелювання (усереднення) тепловідведення є мінімізація різниці в товщинах деталей, що зварюються.

#### Металографічні дослідження зварних з'єднань.

Мета виконаних досліджень полягає у об'єктивному підтвердженні результатів оцінки якості зварних з'єднань, отриманих шляхом візуального контролю та з використанням методів неруйнівного контролю, описаних в п.3.1.4. Загалом, металографічні дослідження, проведені на мікроскопі NEOPHOT-32, показали збільшення структурної однорідності зварних з'єднань при підвищенні частоти імпульсного зварювання. Коливання мікротвердості шва і перехідних зон, вимірюної за Вікерсом ( $HV_{0,05}$ ) на мікротвердомірі Лесо М-400, при зварюванні групи параметрів  $f_{pc} = 10$  Hz (Рис.3.19, а1) є найбільшими - від 192 до 257 при значенні параметра 221 для основного металу. Відсутність вираженого розміцнення металу шва можна пояснити низькими значеннями погонної енергії за високої концентрації джерела нагріву, характерних для МРАW фольгових матеріалів.

Мікроструктура металу шва по всьому його перерізу характеризується нерівномірністю і неспіввісністю кристалітів з розкидом їх розмірів по ширині лінії сплавлення від 5 до 7,5 мкм і від 4÷5 мкм в центрі шва до 25 мкм

у кореня шва. Зі збільшенням частоти імпульсного зварювання відзначалося одночасне зниження посилення шва, що важливо для подальшого деформування оболонки. У групі  $f_{pc} = 200 \text{ Hz}$  (Рис.3.19, *b1*) відзначені найкращі поєднання досліджуваних параметрів - розмір рівноважних осередків відповідає діапазону  $5 \div 7 \text{ мкм}$  у всьому перерізі шва за їх співвідношенні, відхилення виміряної величини мікротвердості в будь-якому з напрямків не перевищує 2.5% для основного металу. Для типового зразка стрічки AISI 321 товщиною 0,175 мм зі зварним швом, виконаним при імпульсному струмі  $f_{pc} = 200 \text{ Гц}$ , міцність на розрив становить 90 % від значення цього параметра для аналогічного зразка основного металу.

Унікальне поєднання технологічних та зовнішніх факторів при експлуатації перетворюваної конструкції не дозволяє обмежитися стандартними методами контролю при оцінці якості зварних з'єднань. Вакуум космічного простору, що викликає в сукупності з впливом радіації десорбцію елементів матеріалу оболонки, може лише умовно вважатися хімічно нейтральним зовнішнім середовищем; при переході світлотіньових кордонів на поверхні конструкції можливе утворення конденсату із включеннями активних речовин, присутніх у власній зовнішній атмосфері базового космічного апарату. Неприпустимі з цієї причини прояви міжкристалітної корозії, пори та мікротріщини можуть бути визначені можливостями оптичної мікроскопії, а також проведенням на різних стадіях виготовлення конструкції капілярним, вихрострумовим контролем та гелієвою пробою. Тим не менш, тривалість дії зазначених зовнішніх факторів (до декількох років), циклічні деформації від коливань температур з діапазоном до  $275^{\circ} \text{ C}$ , а також вплив високих і низьких температур вимагають прогнозування стабільності властивостей зварних з'єднань шляхом їх поглибленого вивчення на всіх структурних рівнях. При оцінці якості зварних з'єднань реалізовано комплексний методичний підхід до досліджень зварних з'єднань на макро- та мікрорівні.



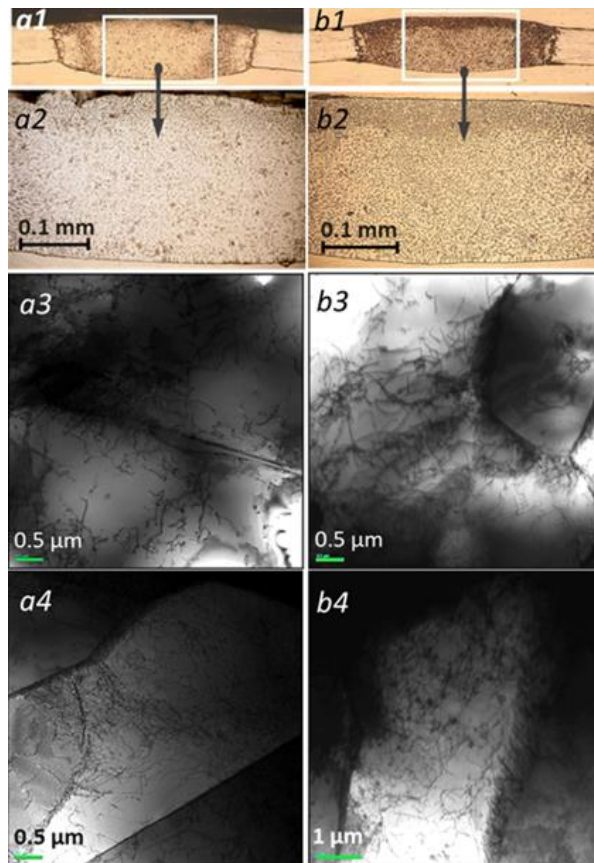


Рис.3.19 Металографічні зображення, характер зеренної та субзеренної структури металу шва та ЗТВ зварних з'єднань при частоті імпульсного струму 10 Hz (*a*) та 200 Hz (*b*)

Оцінка розподілу легуючих елементів у металі шва всіх груп зразків методом мікрорентгеноспектрального аналізу з використанням мікроаналізатора Camebax SX-50 (Cameca®) з діаметром зонда  $\sim 1$  мкм при прискорюючій напрузі 20 кВ і струмі зонда 20 нА показав практичну відповідність) у металі шва та перехідних зонах аналогічним параметрам основного металу. Наступною стадією оцінки якості зварних з'єднань розглянутих груп є дослідження їх тонкої структури, засновані на уявленні про визначальний вплив структурно-фазового стану металу з'єднання на його фізико-механічні властивості.

Завданням досліджень було вивчення особливостей структурно-фазових станів металу, що формуються в різних зонах зварних з'єднань – у



металі шва, зоні термічного впливу (ЗТВ) при різних режимах зварювання та обробки.

Дослідження було сфокусовано на визначенні утворень нерівновісних зернограничних та внутрішньооб'ємних фазових виділень, а також формування протяжних дислокаційних скупчень уздовж міжзеренних кордонів, тобто, потенційних концентраторів внутрішніх напружень, що сприяють тріщиноутворенню.

Для дослідження тонкої (дислокаційної) структури металу шва зварного з'єднання, субструктури, деталей міжзерен і субкордонів використовувався метод трансмісійної електронної мікроскопії. Пряме дослідження тонкої структури на просвіт проводили на приладі JEM-200 CX (JEOL) при прискорювальній напрузі-200кV по всій товщині зразка.

Тонкі фольги для досліджень методом трансмісійної електронної мікроскопії (ТЕМ) готувалися двоступінчастим методом - попереднього електрополірування з подальшим багаторазовим іонним утонченням до моменту прояву зерна на просвіт іонізованими потоками аргону у спеціально розробленій установці. Це дозволило значно розширити сферу досліджень та збільшити статистику отриманих результатів.

В основному в металі всіх зразків, що досліджуються, спостерігається порівняно рівномірний розподіл дислокацій при невисокій її щільності у внутрішніх обсягах зерен ( $\rho$  до  $\sim 10^9 \text{ см}^{-2}$ ) та субструктура розмірами  $\sim 7 \dots 10$  мкм. Крім того, і в обсягах зерен, і в зонах вздовж міжзеренних кордонів спостерігаються виділення дисперсних фаз розміром  $0,14 \dots 0,3$  мкм.

У металі шва зразків, отриманих при частоті імпульсного струму зварювання 10 Hz (Рис.3.19, а3), відзначається формування зерен подовженої форми, градієнт за величиною зерна  $h \cdot l = 5 \dots 7 \cdot 12 \dots 38$  мкм і субзерна (дисперсного розміру до  $h \cdot l = 0,35 \dots 0,71 \cdot 1,7 \dots 2,5$  мкм і більших розмірів до  $\sim 2,5 \dots 4 \cdot 6 \dots 12$  мкм).

**Таблиця 15.** Щільність дислокацій у зоні шва та ЗТВ

Зразки	Градiєнт по щiльностi дислокацiй (см <sup>-2</sup> )			
	Шов		ЗТВ	
	Всерединi зерна	Мiжзереннi границi	Всерединi зерна	Мiжзереннi границi
<i>a</i> (10 Hz)	$\rho \sim 10^9 \dots 4 \cdot 10^9$	$\rho \sim 4 \cdot 10^{10} \dots 10^{11}$	$\rho \sim 2 \cdot 10^9 \dots 6 \cdot 10^9$	$\rho \sim 5 \cdot 10^{10} \dots 10^{11}$
<i>b</i> (200 Hz)	$\rho \sim 10^9 \dots 2 \times 10^9$	$\rho \sim 4 \dots 6 \times 10^9 \dots 10^{10}$	$\rho \sim 2 \dots 3 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$	$\rho \sim 2 \dots 3 \cdot 10^9 \dots 2 \cdot 10^{10}$

За даними Таблиці 15 у металі шва зразка *a* спостерігається більш високий градієнт за щільністю дислокацій у внутрішніх обсягах зерен і у міжзеренних кордонів. щільність дислокацій в обсягах зерен при їх рівномірному розподілі. Уздовж міжзеренних кордонів спостерігається незначне підвищення густини дислокацій. Субструктурні області переважно рівноосного типу, розміром 5...10 мкм.

Далі, для зеренної та субзеренної структури ЗТВ зразків, отриманих при частоті 10 Hz (Рис.3.19, *a4*; Таблиця 15,*a*) характерні різкоградієнтні розміри при формуванні градієнтів за щільністю дислокацій та протяжних дислокаційних скупчень уздовж міжзеренних кордонів. Спостерігається формування структур із чітко вираженою протяжною формою  $h \cdot l = 4 \dots 6 \cdot 10 \dots 14$  мкм. Також як і в металі шва відзначено збільшення щільності дислокацій в обсязі зерен та біля міжзеренних кордонів. У ЗТВ формуються також ділянки двійникових структур.

Навпаки, для ЗТВ зразків, отриманих при частоті 200 Hz (Рис.3.19, *b4*; Таблиця 15, *b*), характерна в основному рівновісна зеренна ( $D_z = 7 \dots 25$  мкм) і субзеренна структура ( $d_s = 6 \dots 12$  мкм) при рівномірному розподілі щільності дислокацій. У ЗТВ формуються окремі ділянки двійникових структур.

У зразках з кращими показниками структури (*b*, 200 Hz) після дворазової деформації вигином, що моделює процес компактного складання

та подальшого розкриття, відзначалося збільшення щільності дислокацій у металі шва до  $\rho \sim 5 \cdot 10^{10} \dots 10^{11} \text{ см}^{-2}$  при їх рівномірному розподілі. Для зразків після деформації відзначено формування структур двійника в металі шва та ЗТВ зі збільшенням загальної густини дислокацій. Тим не менш, ні щільність дислокацій, ні протяжність структур двійникування в них не перевищують відповідних параметрів недеформованих зразків  $f_{pc} = 10 \text{ Hz}$  і не носять критичного характеру. Під час наступних циклів деформацій ускладнено але може відбуватися блукання дислокацій і в результаті їх локальне скупчення до критичного рівня при якому і виникне та сама тріщина, яка є концентратором напружень, це призведе до подальших руйнувань у процесі експлуатації. При дуже низьких температурах, близьких до абсолютного нуля, рух атомів у кристалічній решітці може значно сповільнюватися, що може впливати на ковзання дислокацій. Проте, у більшості практичних випадків, холодне деформування металів все одно відбувається, і ковзання дислокацій залишається важливим процесом для їхньої деформації та механічної обробки.

При розробці технології з'єднань перетворюваної конструкції варіювання імпульсних режимів зварювання дозволяє усунути протиріччя між необхідністю додаткового посилення шва при його достатній пластичності та вимогою зближення геометричних параметрів підсилення та основного металу, що уможливорює подальший процес ротаційного деформування тонкої металевої оболонки. Збільшення імпульсної частоти МРАW в межах досліджуваного діапазону 10-200 Hz дозволило забезпечити достатнє наближення геометричних і фізико-механічних характеристик зварного з'єднання і основного металу, а також підвищити його структурну однорідність. Зі зростанням  $f_{pc}$  відзначається істотне зниження протяжних дислокаційних скупчень уздовж міжзеренних границь, тобто, зниження потенційних концентраторів внутрішніх напружень, що зумовлюють тріщиноутворення. Проведені дослідження підтверджують зниження

локалізованих деформацій та структурних напружень у зразках, отриманих при імпульсному зварюванні зі зростаючою частотою.

Аналіз структурно-фазових змін у досліджених групах зразків у сукупності з їх дослідженнями методами оптичної металографії, оцінкою герметичності, а також з наступним натурним експериментом розкриття дозволяє зробити висновок про перевагу імпульсного зварювального процесу з найбільшою частотою в межах дослідженого діапазону.

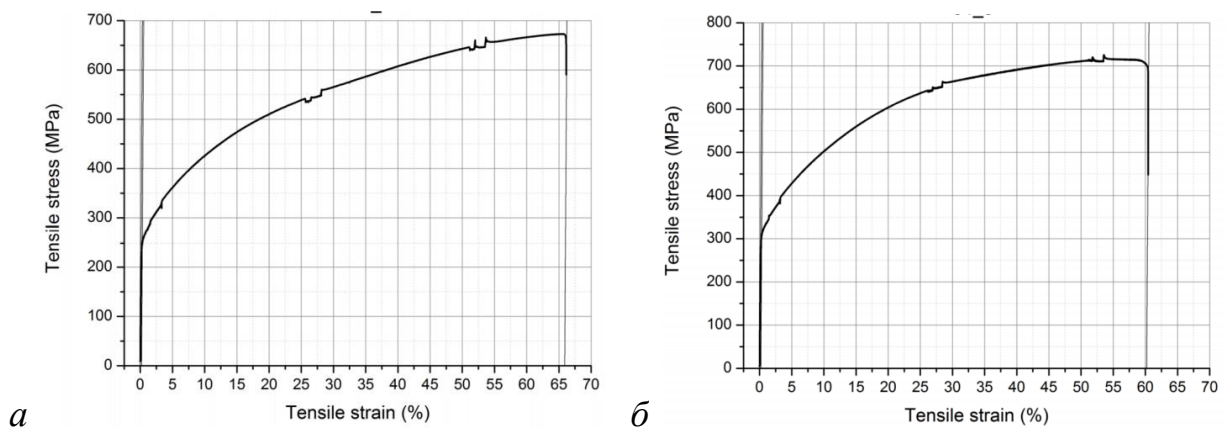


Рис. 3.20 Діаграми статичного розтягу сталі AISI 321: зразок зі зварним швом (а) та аналогічний зразок зі сталевій стрічці без шва (б)

Додатково, було проведено дослідження рівномірності зварного з'єднання - шва ( $\sigma_{вш}$ ) та основного металу ( $\sigma_{вом}$ ) (Рис. 3.20). Згідно з результатом дослідження  $\sigma_{вш}$  - 690 МПа,  $\sigma_{вом}$  - 700 МПа, рівномірність з'єднання дорівнює 95%.

### 3.1.4 Технології контролю якості критичних елементів та параметрів конструкції

Діапазон прийнятних методів та засобів контролю якості зварних з'єднань КПО визначається поєднанням унікальних особливостей конструкції. Оболонка зі сталі фольгового класу товщин піддається неодноразовому екстремальному деформуванню, до неї пред'являються високі вимоги експлуатаційної надійності, і для конструкції або її елементів

прийнятні лише методи неруйнівної діагностики, які можуть послідовно застосовуватися на стадіях її виготовлення. Слід зазначити, що КПО набуває своїх робочих геометричних параметрів після завершення всіх стадій контролю, що нехарактерно для діагностики традиційних оболонкових конструкцій. Тому, важливим є також і прогнозування можливих дефектів зварних з'єднань на стадії компактної конструкції.

Одна з особливостей процесів зварювання при складанні КПО - це циклічність і багаторазова повторюваність однотипних технологічних операцій, таких як зварювання прямолінійного шва гладкої конічної заготовки. Тривалість процедури складання та позиціонування заготовок під зварювання значно перевищує за часом власне процес зварювання, і вибір методу контролю повинен унеможливлувати появу додаткових операцій у встановленому алгоритмі процесу. Так, оперативний контроль прямолінійного шва у пристрої для збирання та захисту дозволяє усунути можливі дефекти повторним зварювальним проходом, не послаблюючи клавішних притисків і не змінюючи взаємного розташування плазмотрона та кромки заготовки, що зварюються. В даному випадку може бути використаний тільки безконтактний метод контролю, так як раціональний для первинного контролю капілярний метод не дозволяє тестувати з'єднання безпосередньо у складально-зварювальному пристрої. З відомих методів прийнятною для оперативного контролю шва на нержавіючій сталі фольгового класу товщин може бути майже виключно вихрострумова дефектоскопія. В експериментальній частині роботи використано дефектоскоп Nortec<sup>®</sup> 600 (Olympus<sup>®</sup>) (Рис.3.21,(1)) з абсолютним датчиком олівцевого типу №9222162 або диференціальними датчиками №9222184 та №9222308 (2). При виконанні роботи було реалізовано оригінальний алгоритм вимірювання, що полягає у жорсткому з'єднанні датчика дефектоскопу із плазмотроном (3) на відстані, що передбачає завершення кристалізації в оснастці (4) металу контрольованого шва (5).

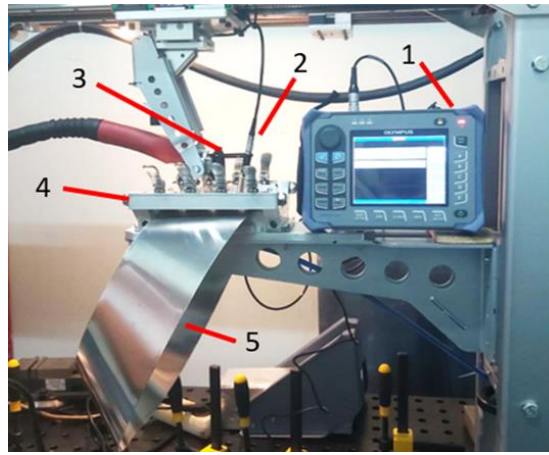


Рис.3.21 Загальний вигляд експериментального стенду для динамічного неруйнівного контролю якості зварних з'єднань вихрострумовим методом

Вихрострумовий метод з використанням дефектоскопа Nortec® 600 з абсолютним датчиком олівцевого типу №9222162 може бути використаний при контролі всіх прямолінійних з'єднань гладких конічних заготовок, а також при контролі кільцевих швів кришки (денця) та фланцевих відбортунів суміжних секцій. При виконанні контролю фіксувалися зміни у фазі та амплітуді вихрових струмів, що викликані змінами електричної провідності та магнітної проникності об'єкта контролю через зміни його складу та структури, наявність поверхневих або прихованих (підповерхневих) дефектів, а також їх характеристик (типу дефекту, його розмірів та глибини залягання); при цьому важливо, що потрібна мінімальна підготовка поверхні об'єкта, що контролюється. Метод дозволяє виключити ймовірність виникнення дефектів структури з'єднань, які можуть вплинути на вакуумну щільність при циклічному деформуванні шляхом неруйнівного контролю шва безпосередньо в ході технологічного процесу, і уникнути розвитку дефектних зон застосуванням багатопрохідного зварювання. Додаткові переваги методу - висока точність та повторюваність виявлення дефектів, висока швидкість контролю, можливість контролю об'єктів зі складною геометрією та в місцях із ускладненим доступом, проведення контролю без безпосереднього контакту датчика з об'єктом, здатність розрізняти типи дефектів, відсутність потреби у витратних матеріалах, а

також безпека для здоров'я оператора. Недоліки методу (максимальна глибина проникнення матеріалу, чутливість до розташування дефектів) не виявляються під час контролю тонкої оболонки КПО. Метод має ряд відмінностей за типом вимірювання сигналу перетворювача (вимір амплітуди, фази сигналу, проекції вектора напруги і т.д.), використовуваних виходячи зі зручності масштабування, візуалізації сигналу та ін. Відповідно, вибір різновиду методу доцільно проводити після калібрування приладу при тестуванні конкретних зварювальних зразків.

Для тестування було використано стандартний сертифікований зразок зі сталі AISI 321, аналогічній до матеріалу КПО, з так званими рисками EDM глибиною 0,5 мм, 1,0 мм і 2,0 мм. Розмір рисок перевищує розміри можливих прихованих або поверхневих дефектів у зварному з'єднанні товщиною  $\sim 0,3$  мм, але процес калібрування дозволив підібрати рівень сигналу і масштабувати координатні осі на моніторі приладу таким чином, щоб сигнал характерного дефекту або несущільності шва мав якісне відображення, що легко зчитується.



Рис.3.22 Сигнали рисок EDM глибиною 0,5 мм (а), 1,0 мм (б) та 2,0 мм (в) при калібруванні дефектоскопа на сертифікованому зразку зі сталі AISI 321

На Рис.3.22 показано відображення в імпедансній площині максимальної амплітуди та кута сигналу рисок EDM із зростаючою глибиною ((а)...(в)) на стандартному сертифікованому зразку зі сталі AISI 321. Після вибору рівня сигналу та його масштабування на моніторі приладу було виконано тестування характерного зварювального зразка прямолінійного з'єднання оболонки КПО, який в експериментальній частині

роботи був розділений на сегменти ((1) ... (4), див. (Рис.3.23), що моделюють вплив на геометрію та структуру шва при зміні комбінацій параметрів зварювального процесу (див. п 3.1.1, Табл. 10).



Рис.3.23 Тестовий (налаштувальний) зразок зварного шва гладкої конічної заготовки секції КПО з товщиною  $\delta=0,3$  мм з фрагментами (1)-(4), що імітують перехідні режими зварювального процесу

Рекомендована процедура контролю зварного з'єднання складається з перевірки зони термічного впливу з використанням до двох сканів (горизонтального та вертикального), якими можна охопити всі нещільності зварного шва. Отже, спочатку основу шва було перевірено поздовжнім скануванням, потім верхню частину шва декількома короткими сканами, потім обстежено можливі тріщини поздовжнім скануванням і, нарешті, досліджено верхню частину зварного шва поздовжнім скануванням, але при орієнтуванні перетворювача (датчика) перпендикулярно скану. Оскільки важливо правильно інтерпретувати сигнал, отриманий на різних етапах сканування, прилад було обнулено для компенсації будь-яких варіацій геометричних параметрів зварного з'єднання. На Рис.3.24 наведено результат сканування зразка Рис.3.23.



Рис.3.24 Результати фіксації максимальної амплітуди та кута сигналу на тестовому (налаштовувальному) зразку зварного шва (за Рис.3.23)



На представлених на Рис.3.26 відображення параметрів сигналу в імпедансній площині показані результати поперечних сканів в зоні (1) (а), в зоні (2) (б), в зоні (3) (в) і в зоні (4) (г) зразка за Рис.3.23; параметр  $V_{pp}$  показує максимальну вертикальну напругу (горизонтальна або вертикальна орієнтація піку напруги регулюється довільно) сигналу від піку до піку, параметр  $\varphi_{pp}$  - кут сигналу від піку до піку. Характерний вид поздовжнього тесту по всій довжині зразка показано на Рис.3.25.



Рис.3.25. Результат фіксації параметрів сигналу в імпедансній площині при поздовжньому скануванні зразка за Рис.3.23

Як видно з результатів сканування зон (1)...(4) шва, зі зміною зварювального режиму, посилення шва знижується при одночасному збільшенні тепловкладення, що запобігає появі підрізів і зменшує ризики подальшого процесу формоутворення плоского диска. Криві напруги сигналу мають похилу траєкторію, що відповідає плавному переходу металу шва до основного металу зразка оболонки.

Для певних типів досліджених дефектів характерні унікальні співвідношення максимальної вертикальної напруги ( $V_{pp}$ ) та кута ( $\varphi_{pp}$ ) (Рис. 3.26). Параметр напруги показує глибину залягання дефекту, кореляцію величини напруги та фактичної глибини дефекту в метричних одиницях ( $10^{-1} \dots 10^{-2}$  мм). Випробовування проводилося за допомогою згаданого вище еталонного зразка з рисками EDM, на якому перед тестуванням дослідного зразка проводиться калібрування і налаштування датчика.

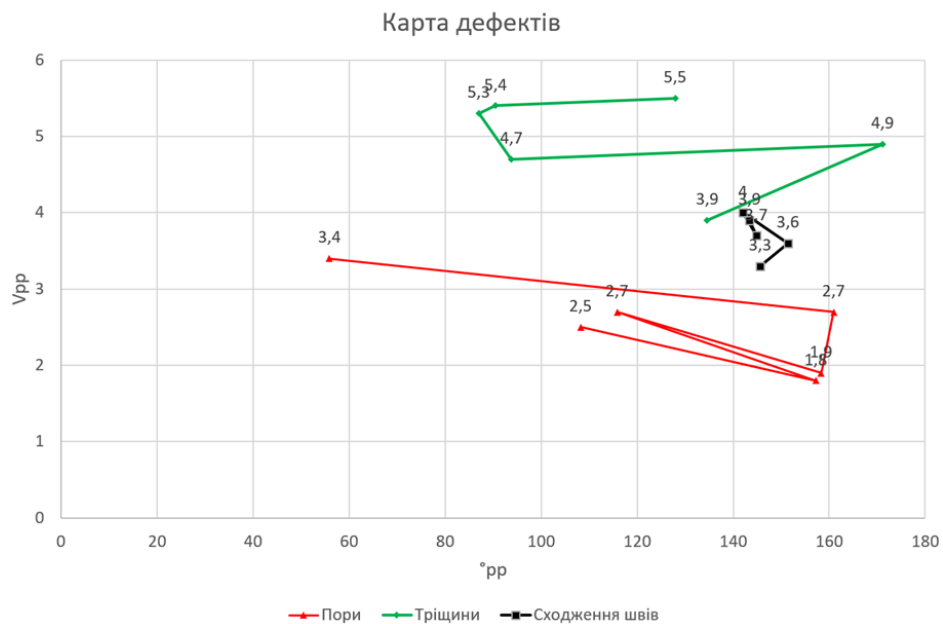


Рис. 3.26 Карта дефектів досліджених зразків з'єднань;  $V_{pp}$  – максимальна вертикальна напруга, від піку до піку;  $^{\circ}pp$  – кут від піку до піку

Як видно з графіка (Рис. 3.26) для дослідного типу з'єднання, глибина залягання таких дефектів як пори знаходиться в діапазоні 1,8-3,4 В, що відповідно до відстані 0,1-0,15 мм, і є поверхневим дефектом, оскільки товщина шва становить  $\approx 0,5-0,6$  мм. Для тріщин характерна більша глибина залягання (3,9-5,5 В), що відповідно до 0,2-0,4 мм – вони можуть бути як поверхневими, так і прихованими по товщині шва. Подібні дефекти є характерними як для прямолінійних, так і для кільцевих швів, а зона напусткового сходження шва можлива тільки в кільцевих типах з'єднання, оскільки у зоні замикання шва можливі утворення підрізів та свищів, їх діапазон глибин становить 3,3-3,9 В, що відповідає відстані 0,15...0,2 мм.

Для кожного з дефектів також характерна власна форма кривої сигналу датчика в імпедансній площині, за допомогою якої його можливо ідентифікувати (Рис.3.27). Так, пори мають пологу криву з плавними переходами (Рис.3.27, а), в той час як відображення сигналу для тріщини є прямолінійними з гострими переходами (Рис.3.27, б), найбільш просту геометрію мають свищі та підрізи - це положиста крива з гострим переходом в напрямку нульової точки (Рис.3.27, в), яка має змінний кут нахилу.



Рис. 3.27 Відображення дефектів в імпедансній площині; а-пора; б-тріщина; в- напусткове сходження швів.

В ході досліджень усіх сегментів зразка (за Рис. 3.23) вихрострумовим методом найгіршим виявився сегмент 1 у зв'язку з великим підсиленням шва та наявністю підрізів та тріщин, а найліпшим сегмент 3, в якому катет шва менший та, відповідно, перехід металу шва та основного металу є плавним, і а також абсолютно відсутні дефекти.

Отже, вихрострумовий метод дефектоскопії дозволив виявити та ідентифікувати дефекти безпосередньо в процесі зварювання, що досягалося інтеграцією скануючого датчика у систему фіксації зварювального пальника одразу за ним у напрямку зварювання (див. Рис 3.21). Зварне з'єднання може бути відбраковано у випадку наявності тріщин, пор або підрізів, але, у випадку виявлення візуально не підтверджених порушеннях однорідності металу шва/ЗТВ (Рис.3.27,в) дефектоскопія безпосередньо в процесі зварювання дозволяє, не змінюючи прецизійної схеми збирання заготовки, виконати її повторний провар або локальне відновлення. Об'єктивне підтвердження та кількісна оцінка виявлених вихрострумовим методом прихованих дефектів було виконано за допомогою методу просвічуючої електронної мікроскопії та представлено далі.

Для верифікації отриманих даних вихрострумового контролю проведено дослідження мікроструктури швів та ЗТВ, аналіз зварних з'єднань AISI 321 після мікроплазмового зварювання проводили з використанням просвічуючої електронної мікроскопії. Досліджувані зварні з'єднання отримані мікроплазмовим зварюванням при режимах  $I=10\text{A}$ ;  $F-P=25\text{Гц}$  (далі

- сегмент №2) та  $I=10\text{A}$ ;  $F-P=200\text{Гц}$  (далі – сегмент №4). Слід зазначити, що жоден з отриманих сегментів тестового зразка не має наочних візуальних ознак наявності дефектів, тому походження виявлених електромагнітним методом контролю неоднорідностей має бути з'ясовано шляхом застосування скануючої (растрової) електронної мікроскопії.

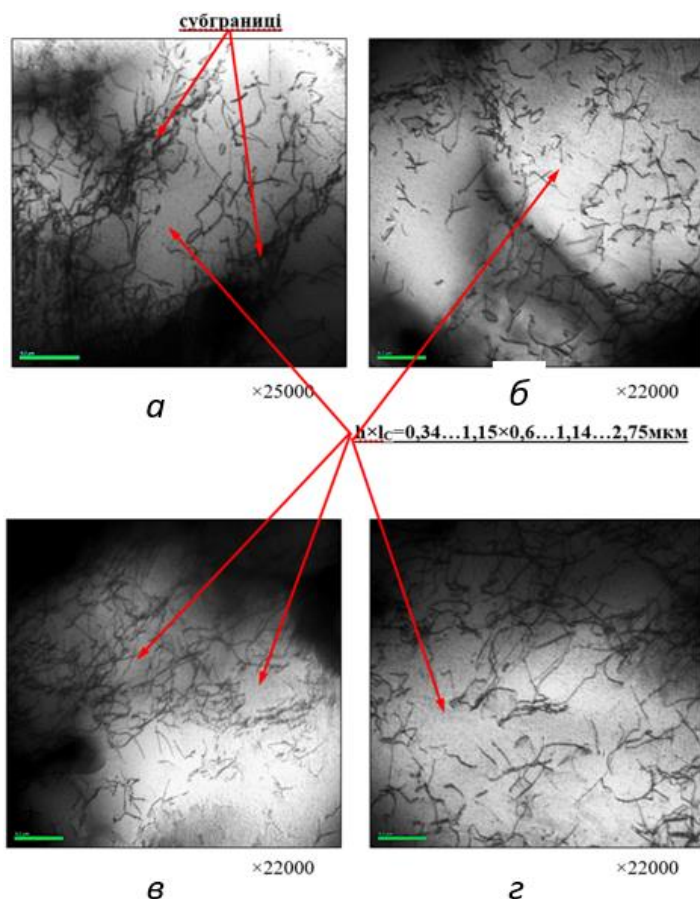


Рис. 3.28 Метал шва на відстані 200 мкм від лінії сплавлення, сегмент №2

Так, в металі шва зварного з'єднання отриманого при режимі  $I=10,5\text{A}$ ;  $F-P=25\text{Гц}$  (сегмент 2 на Рис. 3.23) аустенітні зерна з щільністю дислокацій в об'ємах зерен при нерівномірному їх розподілі  $\rho=10^8\ldots7\times10^9\text{ см}^{-2}$  (Рис. 3.28). Вдovж міжзерених границь спостерігається незначне підвищення щільності дислокацій до  $\rho=10^9\ldots2\times10^{10}\text{ см}^{-2}$ . Також спостерігається формування субграниць (Рис. 3.28, а). Субструктурні області, які утворилися в основному нерівноосного типу, розміром  $h\times lc=0,25\ldots1,6\times0,4\ldots2,75\text{ мкм}$ . В об'ємах зерен та у міжзерених границях виявлені дисперсні фази глобулярного типу

розміром  $D_{\text{ФВ}}=0,02...0,23$  мкм та більш овальної форми  $h \times l_{\text{ФВ}}=0,02...0,23...0,09...0,86 \times 0,2...1,0$  мкм. Також в металі шва були виявлені виділення пластинчатого типу шириною  $h=0,09...0,23$  мкм. В металі шва зафіксовано формування двійникових структур.

На лінії сплавлення спостерігається підвищення щільності дислокацій як в об'ємі зерен так і біля міжзерених границь та в середньому складає  $\rho=2 \times 10^9...6 \times 10^9 \text{см}^{-2}$ , що в подальшому призвело до утворення тріщин, які були ідентифіковані вихрострумовим методом (Рис. 3.28,б). Формується субструктура розміром  $h \times l_c=0,26...0,9 \times 0,35...1,8$  мкм. В ділянці лінії сплавлення також можна спостерігати фази розміром  $h \times l_{\text{ФВ}}=0,35...0,9 \times 0,6...1,0$  мкм. Також було виявлено формування двійникових структур, які зазвичай можна спостерігати в напусткових зонах сходження швів (Рис. 3.28,в).

В навколошовній зоні в порівнянні з металом шва в об'ємі зерен щільність дислокацій складає  $\rho=5 \times 10^8...4 \times 10^9 \text{см}^{-2}$ , а біля міжзерених границь спостерігається підвищення щільності дислокацій  $\rho=2 \times 10^9...4 \times 10^{10} \text{см}^{-2}$ . В біляшовній зоні, як і в металі шва завдяки руху дислокацій відбувається скупчення їх з подальшим формуванням субграниць.

В даній зоні субструктура меншого розміру в порівнянні з металом шва і складає  $h \times l_c=0,2...1,3 \times 0,4...2,0$  мкм. В об'ємах зерен та у міжзерених границь виявлені дисперсні фази рівноосного  $D_{\text{ФВ}}=0,03...0,76$  мкм та подовженого типу  $h \times l_{\text{ФВ}}=0,04...0,67 \times 0,05...1,15$  мкм. В навколошовній зоні також спостерігаються структури двійникування.

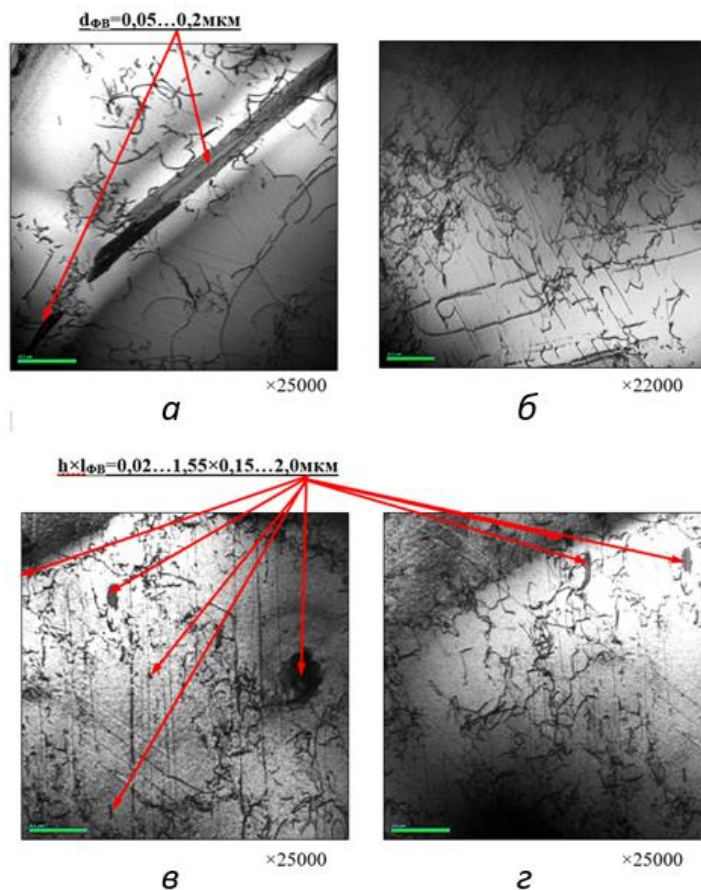


Рис. 3.29 Метал шва на відстані 200 мкм від лінії сплавлення, сегмент №4

В металі шва зварного з'єднання отриманого при режимі  $I=9A$ ;  $F=P=200\text{Гц}$  (сегмент 4 на Рис. 3.23) аустенітні зерна з щільністю дислокацій в об'ємах зерен при більш рівномірному її розподілі в порівнянні з сегментом 2. Щільність дислокацій складає  $\rho=4\times10^8\ldots4\times10^9\text{ см}^{-2}$  (Рис. 3.29). Вздовж міжзеренних границь спостерігається незначне підвищення щільності дислокацій в порівнянні з об'ємом зерен до  $\rho=10^9\ldots8\times10^9\text{ см}^{-2}$ . В об'ємах зерен формуються субграниці (Рис. 3.29 а,б). Субструктура має витягнуту форму розміром  $h\times l_c=0,2\ldots1,9\times0,45\ldots2,6\text{ мкм}$ . В об'ємах зерен та у міжзерених границь як і в сегменті 1 виявлені дисперсні фази різного розміру та форми (рівноосні, витягнуті)  $D_{ФВ}=0,02\ldots0,25\text{ мкм}$ ,  $h\times l_{ФВ}=0,05\ldots1,55\times0,1\ldots2,0\text{ мкм}$  (Рис.3.29,в,г). Також фіксуються виділення пластинчатого типу шириною  $h=0,05\ldots0,22\text{ мкм}$ . В металі шва спостерігається формування структур двійникування.

F-P=200Гц (сегмент 4,,,,,,,,,,,,,)

різких змін по щільності дислокацій при відсутності її градієнтів: в об'ємі

різних режимах мікроплазмового зварювання  $I=10,5\text{A}$ ;  $F-P=25\text{Гц}$  (сегмент 2)

внутрішніх напружень в металі шва в зварному з'єднанні, що отримане при

$\tau_{л/вн} = 10...188$  МПа при наявності їх градієнтів. В навколошовній зоні в об'ємах зерен  $\tau_{л/вн} = 5...38$  МПа. Вздовж міжзерених границь щільність дислокацій підвищується при нерівномірному її розподілі. Це сприяє підвищенню рівня локальних внутрішніх напружень до  $\tau_{л/вн} = 19...376$  МПа при формуванні їх градієнтів.

В металі шва зварного з'єднання, отриманого при режимі  $I=9A$ ;  $F-P=200Гц$  (сегмент 4) рівень локальних внутрішніх напружень складає  $\tau_{л/вн} = 4...38$  МПа в об'ємі зерен. Вздовж міжзерених границь незначне підвищення щільності дислокацій при рівномірному її розподілені, що приводить до підвищення локальних внутрішніх напружень до  $\tau_{л/вн} = 10...75$  МПа без градієнтів по значенню  $\tau_{л/вн}$ . В навколошовній зоні в об'ємах зерен  $\tau_{л/вн} = 3...47$  МПа, а вздовж міжзерених границь рівномірне незначне підвищення щільності дислокацій. Рівень локальних внутрішніх напружень складає  $\tau_{л/вн} = 5...94$  Мпа.

Таким чином, встановлено, що у металі шва та навколошовній зоні у зварному з'єднанні дослідженої сталі AISI 321 після мікроплазмового зварювання отриманого при режимі  $I=10,5A$ ;  $F-P=25Гц$  (сегмент 2) в структурі зафіксовані градієнти по рівню локальних внутрішніх напружень ( $\Delta\tau_{л/вн}$ ). Такі структурні зони є концентраторами внутрішніх напружень і відповідно присутня ймовірність тріщиноутворення. В металі шва та навколошовній зоні у зварному з'єднанні після мікроплазмового зварювання отриманого при режимі  $I=9A$ ;  $F-P=200Гц$  (сегмент 4) рівень локальних внутрішніх напружень невисокий та спостерігається рівномірний їх розподіл.

У цьому випадку відсутня ймовірність формування концентраторів внутрішніх напружень та тріщиноутворення. Це, відповідно, сприяє підвищенню тріщиностійкості металу зварного з'єднання сталі AISI 321, що отримане мікроплазмовим зварюванням.



## **3.2 Контроль відповідності вихідних параметрів КПО до заданих умов**

### **3.2.1 Дослідження кінетики процесу розкриття**

Виконане далі експериментально-розрахункове визначення жорсткісних характеристик КПО та їх співставлення з отриманими в п.3.1.1. даними методом скінченно-елементного аналізу базуються на створенні згідно з положеннями Розділу 2 експериментального зразка конструкції та його розкритті у робочий стан створенням надлишкового тиску у внутрішній порожнині. У ході проведення лабораторних випробувань було виготовлено та випробувано на розкриття дослідний масштабний зразок КПО, що дозволяє попередньо дослідити кореляційні залежності між чисельним та натурним експериментом із визначення основних параметрів конструкції (тиск формоперетворення та ступінь розкриття, власні базові частоти коливань на послідовних стадіях розкриття). Отже, метою проведення серії експериментів щодо вивчення кінетики процесу розкриття багатосекційної КПО була верифікація отриманих розрахункових результатів, а також підтвердження працездатності розроблених конструктивних рішень.

Розроблена та виготовлена система розкриття КПО включає основну (функціональну) частину – стенд розкриття (Рис.3.30) з контуром розкриття на рамі (1), пневматичною (2) і вимірювальною (3) частиною. Вимірювальна частина стенду (3) включає стандартний набір контрольно-вимірювальних приладів (КВП), який може бути укомплектований довільними первинними та вторинними приладами, які відповідають наведеним нижче діапазонам вимірювання, параметрам вихідного сигналу та межах похибки.



Рис.3.30 Основні частини експериментального стану розкриття 11 секційної КПО

Основні контрольовані параметри процесу розкриття КПО – величина надлишкового внутрішнього тиску формоперетворення та довжина багатосекційної оболонки. Для контролю зміни довжини КПО в процесі розкриття був використаний лазерний датчик відстані Leuze ODS110L1.3/LCT-M12 (Рис.3.30, (4)) з діапазоном вимірювання до 0,1...5,0 м, роздільною здатністю 1,0...5, 0 мм, струмом холостого ходу ~60 мА та аналоговим виходом 4...20 мА. Контроль тиску здійснювався датчиком тиску Kobold SEN96010B045 (Рис.3.30, (5)) з діапазоном вимірювання 0...2,5 bar, точністю вимірювання  $\leq \pm 0,5$  % від повної шкали та аналоговим виходом 4...20 мА; датчик встановлюється в різьбове з'єднання (5h) контуру розкриття (1-2). Так як важливою є одночасна фіксація двох зазначених параметрів процесу в єдиній системі координат, для інтерпретації вихідних сигналів первинних приладів (датчиків) використали багатофункціональний двоканальний вимірювач Овен ТРМ200 (Рис.3.30, (6)). Прилад дозволяє виміряти, візуалізувати та обробити дані фізичних параметрів, значення яких надходять від первинних перетворювачів (датчиків) у вигляді уніфікованого сигналу постійного струму або напруги. Час опитування за вхідними сигналами – трохи більше 1 с., тип інтерфейсу RS-485, тип протоколу

передачі Modbus RTU, Modbus ASCII. При вхідному сигналі у вигляді уніфікованих сигналів постійного струму 4...20 mA від датчиків відстані та тиску межа основної наведеної похибки приладу становить  $\pm 0,5$  % при значенні одиниці молодшого розряду 0,1 % та діапазон вимірювань 0...100 %. Крім власне вимірювача Овен ТРМ200 (6), до складу вимірювальної частини (3) входять блок живлення Овен БП60Б-Д4 (7) та аналого-цифровий перетворювач Овен АС 4 RS-485 (8). Для візуалізації параметрів процесу та їхньої графічної інтерпретації використовувався ПК з ПЗ Owen Manager (14).

Для створення надлишкового тиску в процесі розкриття у пневматичній частині стенду (2) може бути використаний стандартний компресор з ресивером Metabo Basic 250-24, штатні прилади захисту та контролю якого дозволяють забезпечити достатні параметри кінетики процесу розкриття та його безпеки на стадії лабораторно-відпрацьованих випробувань.

У процесі формоперетворення довжина багатосекційної оболонки КПО має збільшитись у  $K_T=10$  разів; дана пропорція дотримується для вибраних структурних елементів (секцій) незалежно від кількості в конструкції. Очевидно, що після завершення процесу розкриття довжина КПО повинна збільшитись на величину  $L-l$ , де  $L, [м]$  – довжина конструкції у розкритому стані,  $l, [м]$  – довжина конструкції у вихідному компактному стані. На стенді датчик відстані (Рис.3.30, (4)) встановлюється співвісно з віссю симетрії КПО на висоті над її замикальною пласкою ділянкою, що дорівнює  $(L-l) + \eta$ , де  $\eta$  – сліпа зона обраного датчика, тобто. мінімальна відстань, яку він може виміряти. Вимірювальна вісь датчика може бути зміщена паралельно осі симетрії КПО в межах плоскої поверхні замикаючого елемента (денце), щоб строго по осі (в геометричному центрі денця) був закріплений трос для зневажування конструкції. Відповідно, трос фіксується на системі блоків над прогнозованою верхньою точкою розкритої КПО так, щоб він був геометричним продовженням її осі симетрії, а на вільний кінець троса кріпиться вантаж, еквівалентний власної маси конструкції, що розкривається.

Далі, після комутації та підключення всіх частин стенду, процедура розкриття ініціюється відсікачем потоку подає каналу компресора. На Рис. 3.31,б представлені синхронні графіки зниження величини  $L-l$  ( $L, [м]$ ) при одночасному зростанні внутрішнього тиску формоперетворення у внутрішній порожнині КПО ( $P, [кПа]$ ) на прикладі 11-секційного макета конструкції (Рис.3.31,а). Маючи необхідні критерії подібності, даний макет має достатню кількість секцій для формування уявлень про поведінку повнорозмірної КПО та для попередньої верифікації розрахункових даних власної частоти.

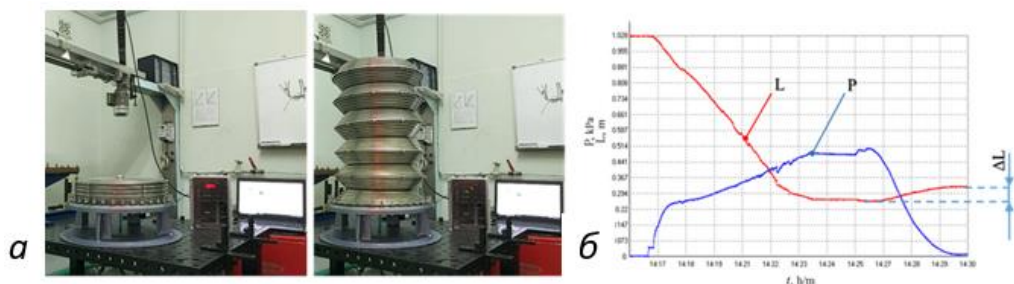


Рис.3.31 Стадії розкриття 11-секційного макета КПО (а) та синхронні графіки довжини конструкції та внутрішнього тиску в процесі розкриття (б)

Як видно з графіка, довжина проектної висоти конструкції на стадії скидання внутрішнього тиску знижується на величину  $\Delta L$  через оборотні пружні деформації тонкостінної складчастої оболонки. З цієї причини, точна фіксація кінетики процесу розкриття та максимального тиску формоперетворення  $P_{max}$  може досягатися тільки шляхом послідовного експерименту зі ступінчастим збільшенням та скиданням величини  $P_i$ .

Додатково, отримані шляхом чисельного експерименту параметри характерних послідовних стадій розкриття 11-секційного макету КПО:

Максимальний тиск розкриття:

1 стадія - 49.6 кПа, 2 стадія - 58.1кПа, 3 стадія 64.7 кПа и 4 стадія 64.1 кПа.

Висота після зняття тиску:

1 стадія - 82,7 см, 2 стадія - 83 см, 3 стадія 85,5 см и 4 стадія 85,9 см.

Перша (базова) власна частота коливань:

1 стадія - 32.19Гц, 2 стадія - 32.27Гц, 3 стадія - 32.96Гц и 4 стадія - 32.17Гц.

Визначення кінетики процесу розкриття повнорозмірної КПО з 37 секцій з урахуванням отриманих даних зворотної деформації  $\Delta L$  (Рис.3.31,б), розглянуто у наступному підрозділі з огляду на специфіку експерименту, що включає паралельні модальні дослідження на послідовних стадіях.

### **3.2.2 Динамічні дослідження власних частот коливань КПО**

Отримання повнорозмірного масштабного макету конструкції дозволило перейти до експериментально-розрахункового визначення жорсткісних характеристик КПО. Модальні випробування та аналіз використовуються у роботі для визначення власної частоти та форми власних коливань. Виміряні параметри збудження та відгуку (або лише відгуку) використовуються в модальному аналізі, потім проводиться динамічний аналіз сигналів та ідентифікація модальних параметрів.

Далі, модуль «Модальне випробування» у застосованому програмному забезпеченні (ПЗ) Dewesoft® [81] використано при аналізі перетворюваної конструкції для вимірювання передавальної функції (амплітуди та фази) у важливому з точки зору оцінки жорсткості КПО діапазоні частот.

Після створення шаблону КПО у вбудованому в модуль «Модальне випробування» редакторі геометрії (Рис. 3.36, 7) було обрано характерні точки збудження та відгуку (Рис.3.36, 7), і на точки збудження було здійснено ударний вплив модальним молотком (Dytran 5800B3T S/N 9520). В режимі аналізу частотного діапазону в точках відгуку фіксуються параметри фази і амплітуди коливань. Функція когерентності показує рівень лінійного зв'язку як міру його якості між двома сигналами залежно від частоти. Вона визначається двома автокореляційними спектрами ( $G_{AA}$ ,  $G_{BB}$ ) та взаємним спектром ( $C_{AB}$ ):

$$\gamma^2(f) = \frac{G_{AB}(f)^2}{G_{AA}(f) \cdot G_{BB}(f)}$$

На кожній частоті когерентність можна прийняти за змінний параметр (у квадраті), який виражає ступінь лінійного зв'язку між двома змінними. Значення когерентності варіюється від нуля до одиниці. Ноль означає повну відсутність зв'язку між входом (А) та виходом, а одиниця означає абсолютно лінійну залежність:

$$0 \leq \gamma^2(f) \leq 1$$

Інструмент «Модальне коло» у ПЗ забезпечує більш високу точність частоти та коефіцієнта демпфування. Для більш детального аналізу дані можуть бути експортовані до декількох форматів файлів. Для визначення небажаних резонансних явищ в досліджуванні використовуються передатні функції. Діапазон частот, в якому напруження матеріалу занадто велике, повинен бути виключений, наприклад, шляхом вказівки на обмеження робочого діапазону. Відношення відгуку до збудження у загальному вигляді представляє передатну функцію

$$H(f) = \frac{Y(f)}{X(f)}$$

що у часовій області описується як  $x(t) \rightarrow \mathbf{h}(t) \rightarrow y(t) = \mathbf{h}(t) \times x(t)$ , після перетворень Лапласа (в частотній області):  $X(f) \rightarrow \mathbf{H}(f) \rightarrow Y(f) = \mathbf{H}(f) \times X(f)$ .

Для обробки даних при перетворенні з часової області (входи і виходи є функціями часу) до частотної області (входи і виходи є функціями комплексної кутової частоти) застосована схема із перетвореннями Лапласа (Рис.3.32). Враховуючи простий математичний або функціональний опис входу або виходу системи, перетворення Лапласа забезпечує альтернативний функціональний опис, який часто спрощує процес аналізу проведення системи або синтезу нової системи на основі набору специфікацій.

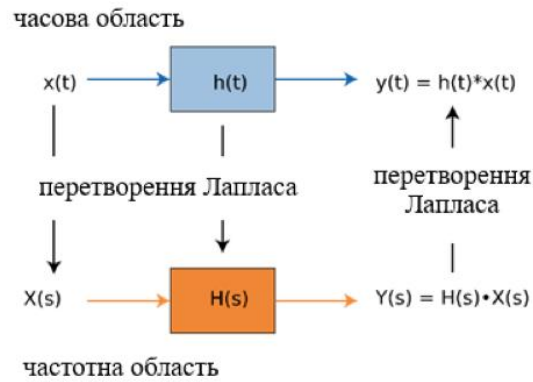


Рис. 3.32 Схема обробки даних у ПЗ DewesoftX при перетворенні з часової області до частотної області.

Після перетворень на виході отримується амплітудно-частотна характеристика (АЧХ) (Рис.3.33).

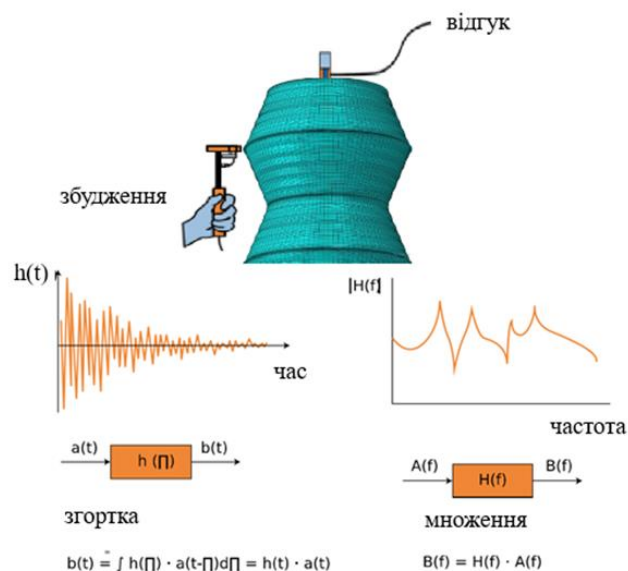


Рис. 3.33 Схема перетворення вхідного сигналу (збудження) в частоту

Передатна функція  $H(f)$  в частотній області і імпульсна характеристика  $h(t)$  в часовій області використовувались для опису співвідношення вхідного і вихідного сигналів («дія-відгук») досліджуваної системи, де сигнали  $a(t)$  і  $b(t)$  являють собою вхідний і вихідний сигнали. Система є інваріантною в часі, АЧХ і імпульсна характеристики є так званими дескрипторами системи та не залежать від поданих на вхід сигналів.

Оцінка амплітудно-частотної характеристики залежить від перетворення даних з часової області в частотну. Для цих розрахунків використовується алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ), який базований на обмеженому періоді часу. Амплітудно-частотні характеристики підходять наступним співвідношенням для одного та кількох входів.

Співвідношення для одного входу:

$$X_p = H_{pq} \times F_q$$

$X_p$  – спектр вихідного сигналу,  $F_q$  – спектр вихідного сигналу,  $H_{pq}$  – амплітудно-частотна характеристика

Співвідношення для кількох входів:

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ \vdots \\ X_p \end{bmatrix}_{N_o \times 1} = \begin{bmatrix} H_{11} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & H_{1q} \\ H_{21} & & & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & & & \cdot \\ \cdot & & & & & & & \cdot \\ H_{p1} & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & \cdot & H_{pq} \end{bmatrix}_{N_o \times N_i} \begin{bmatrix} F_1 \\ F_2 \\ \vdots \\ F_q \end{bmatrix}_{N_i \times 1}$$

У проведеному експерименті використовувався варіант для кількох виходів. Як зазначалося вище, на створеній геометричній моделі дослідної конструкції було присвоєно точні позиції розташування акселерометрів (виходів), та далі власне КПО було споряджено високочутливими акселерометрами згідно присвоєних їм осей вимірювання. На Рис.3.33 це один збудник (Excitation) (модальний молоток (Impact Hammer)) з можливістю фіксації сили збудження в (Н) та два акселерометри відгуку, які фіксують амплітуду та частоту коливань для заданої осі.

Початково проводилася перевірка отримання параметрів збудження, задання умов реагування і отримання даних, а також усунення подвійного збудження, яке можливе із за зворотного удару конструкції об модальний молоток. Фіксація подвійного збудження необхідна для виключення похибок в каскаді отриманих результатів. Аналогічно проводилася перевірка і налаштування параметрів відгуку для концентрації на частоті необхідного діапазону.



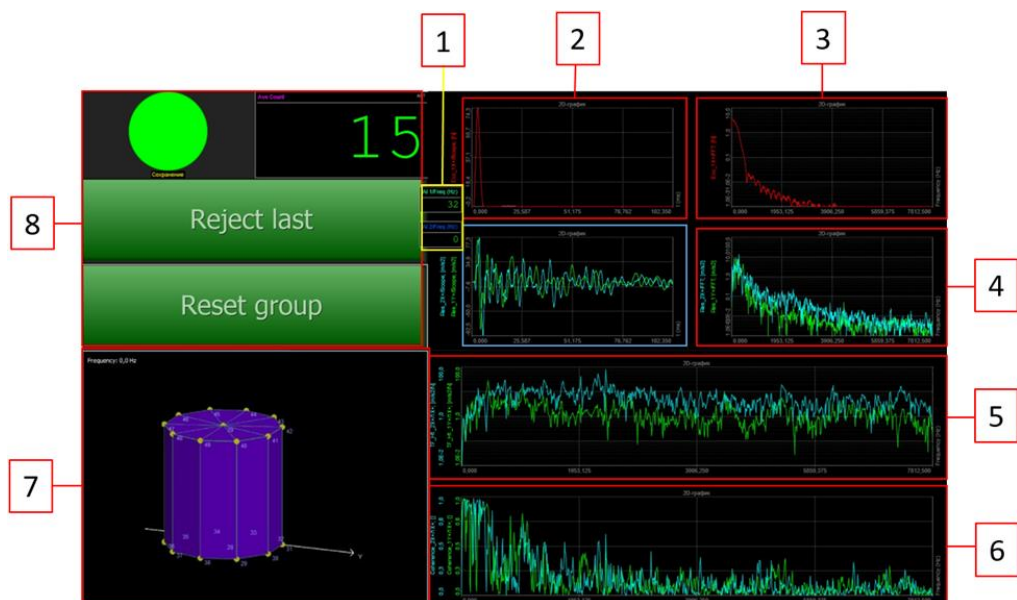


Рис.3.34 Загальний інтерфейс налаштованого експерименту

Так, на Рис.3.34 позначено отримане точне значення частоти в режимі реального часу (1), графік сили збудження модальним молотком (Dytran 5800B3T) (2), частота ударного молотка (Dytran 5800B3T;  $\square$  - графік фіксації прискорення (вісь у,  $\text{м/с}^2$ ) та часу (вісь х,  $\text{м/с}^2$ ) (3), графік частоти за перетворенням Фур'є (4), лінійний графік частоти за перетворенням Фур'є (5), логарифмічний графік частоти за перетворенням Фур'є (6), спрощена візуальна модель дослідного зразка (7) та панель керування процесом експерименту (числове значення відповідає номеру удару збудження (8)).

Багаторазове збудження досліджуваної КПО впливом модального молотка із змінною інтенсивністю прикладеного імпульсу дозволило збільшити вибірку отриманих даних. В результаті досліджень було отримано значення для амплітуди та частоти коливань конструкції при характерних формах мембранних та маятникових коливань, що відповідні до координатних вісей z та x,y. Максимальні отриманні значення амплітуди прискорення дорівнюють  $18,2 \dots 22,4 (\text{м/с}^2)$ , перша (базова) частота коливань КПО склала 34 Гц (Рис.3.35), що у порівнянні з результатом чисельного експерименту на 4 стадії розкриття (32.17 Гц) демонструє розбіжність

результату  $\sim 6\%$  та не перевищує наведеної похибки використаних систем чисельного та експериментально-розрахункового аналізу.

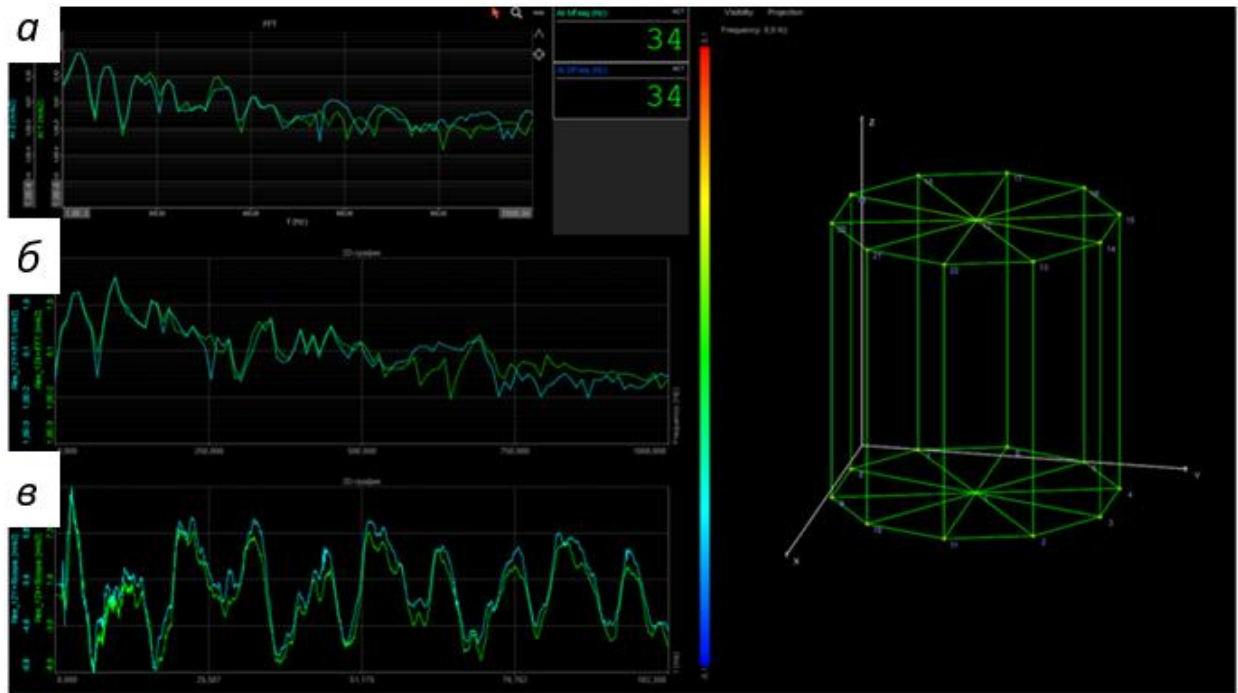


Рис. 3.35 Власні частоти коливань макетного зразка конструкції на четвертій стадії розкриття (тиск 0,6 атм); *а* – мембранні коливання; *б* – маятникові коливання; *в*- графік частоти за перетворенням Фур'є

Далі наведено виконаний експериментально-розрахунковим методом динамічний аналіз власних частот коливань 37-секційної конструкції (див. Рис.3.36) у порівнянні з результатами чисельного модального аналізу. Об'єктивні експериментальні дані для характерних форм коливань 37-секційної конструкції наведені на Рис.3.38-3.41.

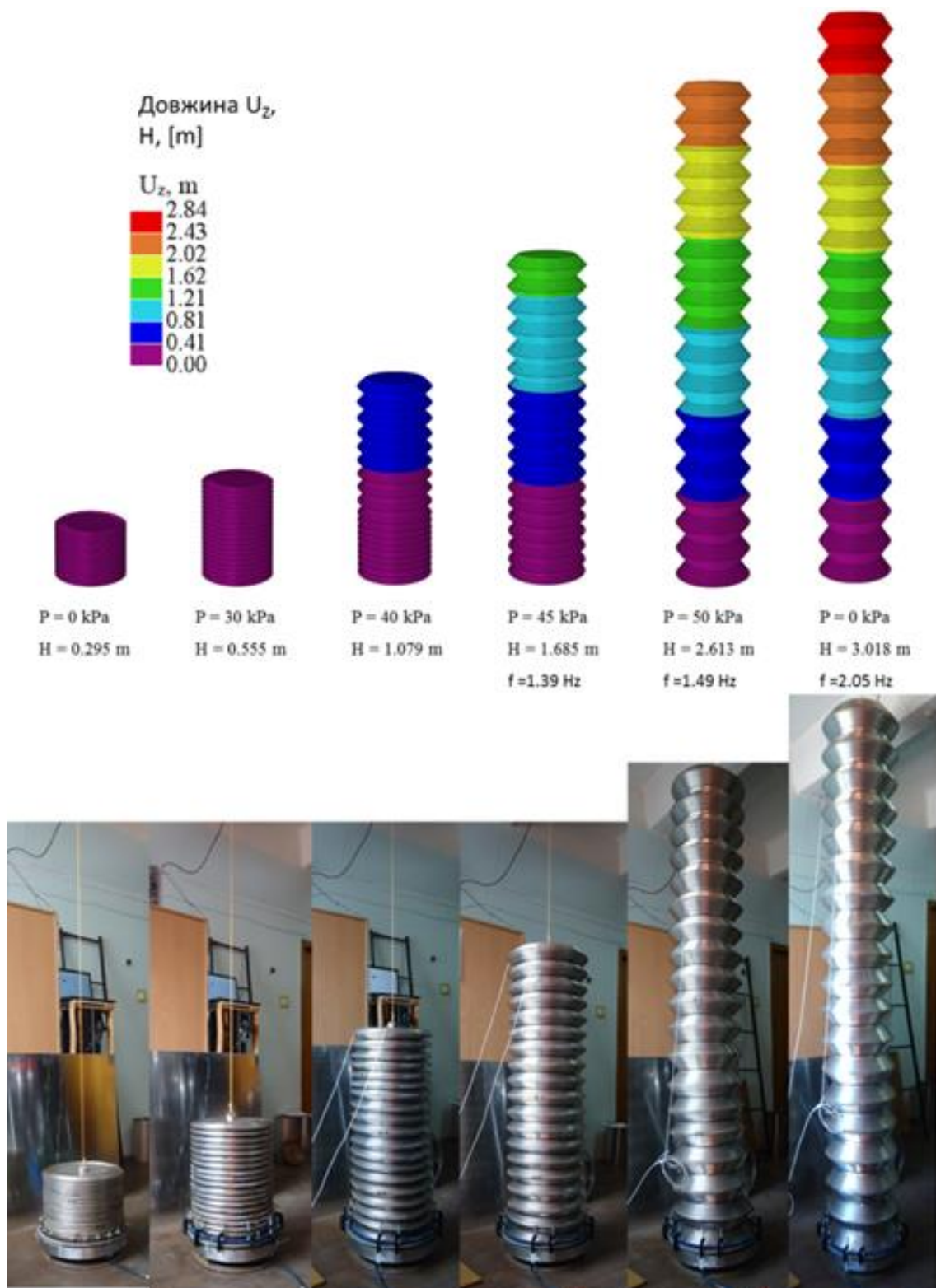


Рис.3.36. Характерні стадії розкриття КПО довжиною 3 м, отримані методом чисельного моделювання, та результат їх верифікації шляхом натурного експерименту з розкриття (знизу)

Аналогічно із алгоритмом вимірювань 11-секційної конструкції (п.3.2.1), на експериментальних стендах було виконано ретельний вимір визначальних параметрів конструкції – ступеню, тиску розкриття та базових частот власних коливань на кожній із характерних стадій процесу (за Рис. 3.36).

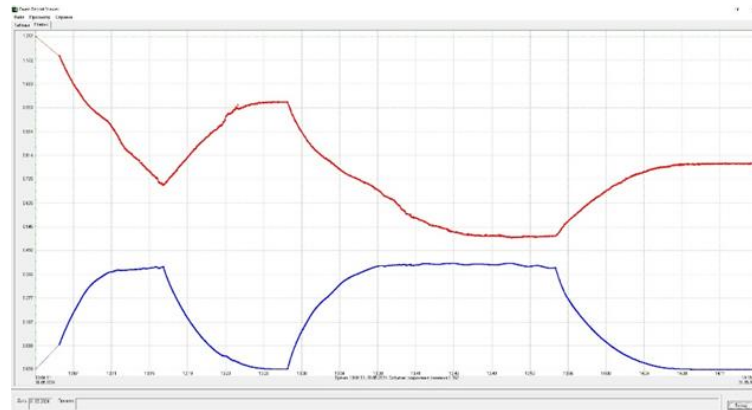


Рис.3.37 Синхронні графіки зміни довжини 37-секційної конструкції та внутрішнього тиску в процесі розкриття на завершальній стадії процесу

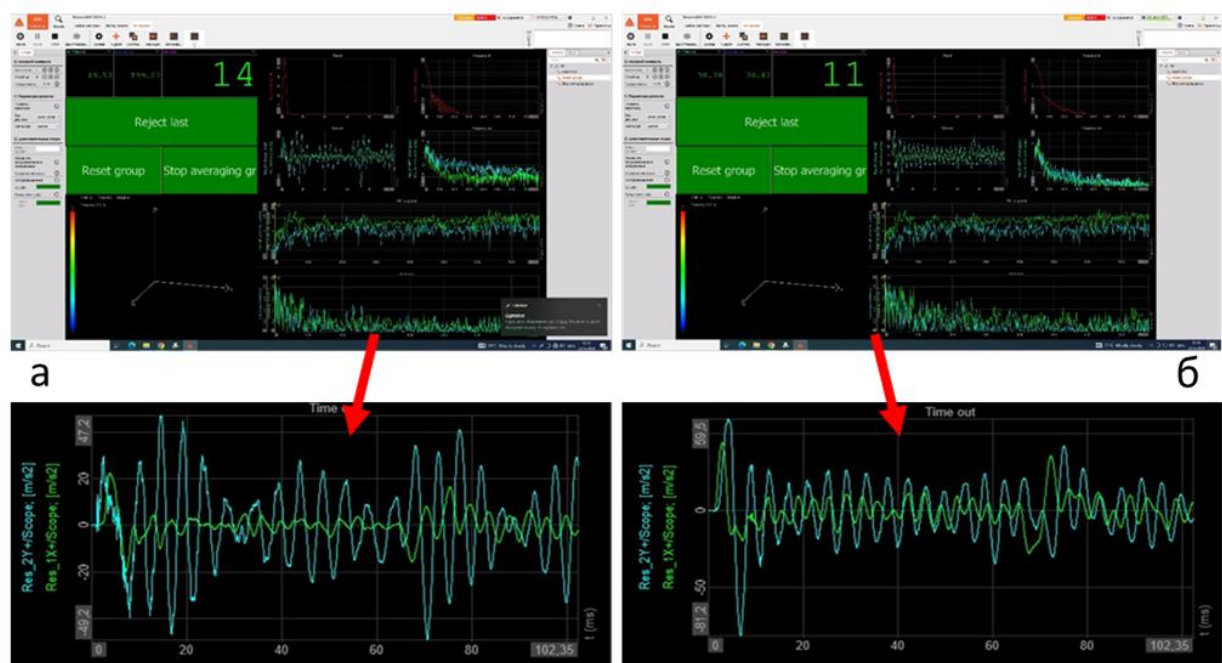


Рис.3.38 Результати експериментального дослідження частот власних коливань КПО для маятникової (а) та мембранної (б) форми коливань на завершальній стадії процесу розкриття

Стадія 1 (КПО в компактному стані без надлишкового тиску розкриття)

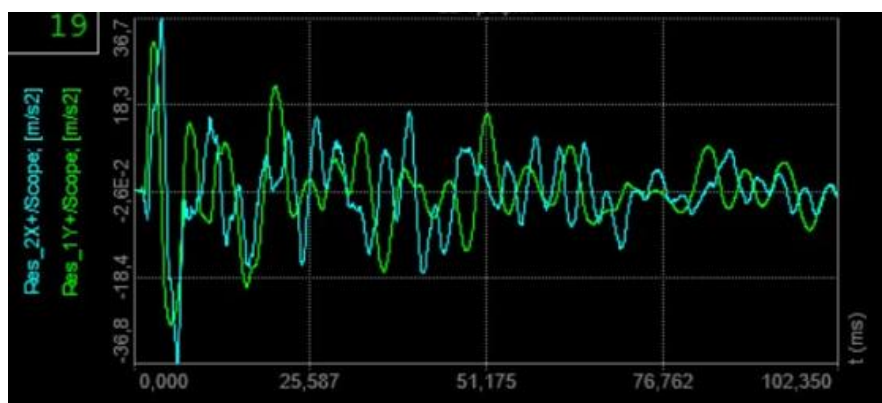


Рис 3.39 Частотна характеристика КПО на першій стадії розкриття, навантаження прикладені по нормалі відносно вісі конструкції (збудження маятникових коливань). По осі абсцис зображено час (мс), по осі ординат зображено прискорення (м/с<sup>2</sup>).

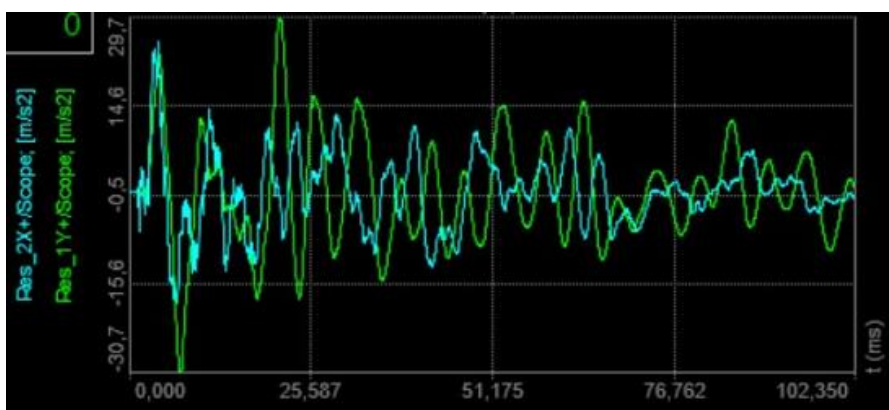


Рис 3.40 Частотна характеристика КПО на першій стадії розкриття, навантаження прикладені по осі конструкції (збудження мембранних коливань). По осі абсцис зображено час (мс), по осі ординат - прискорення (м/с<sup>2</sup>).



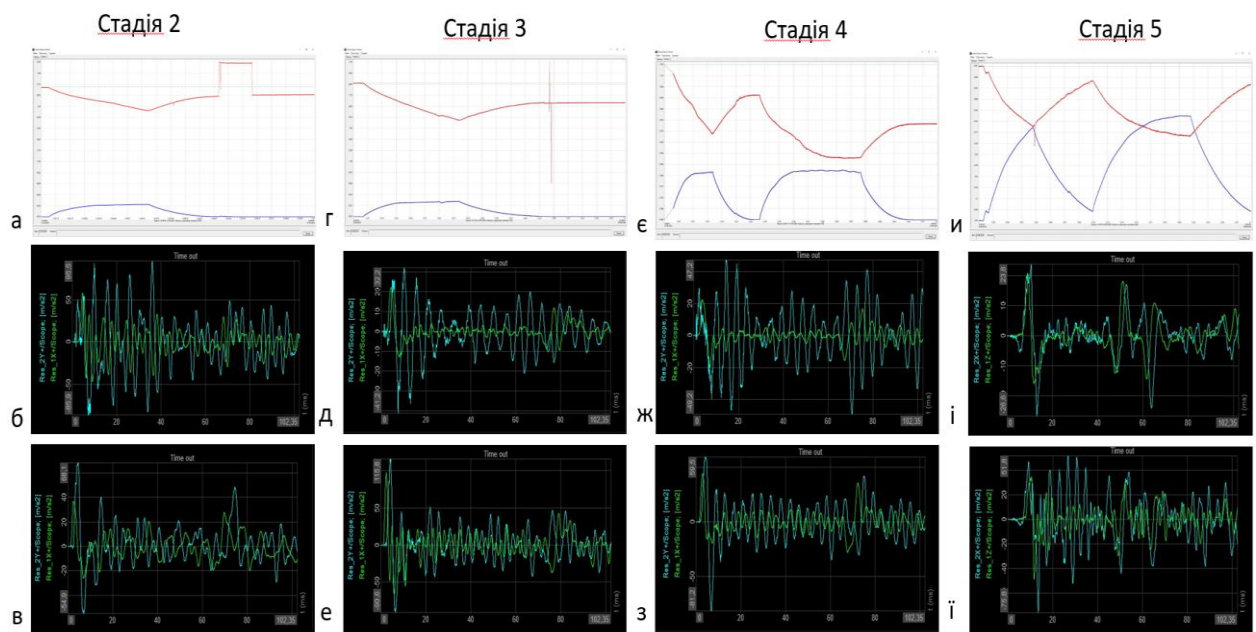


Рис. 3.41 Результати експериментального дослідження частот власних коливань КПО для маятникової (б,д,ж,і) та мембранної (в,е,з,ї) форми коливань та внутрішнього тиску (а,г,є,и)

Наведені результати динамічних досліджень жорсткісних характеристик перетворюваної конструкції та їх співставлення з результатами чисельного експерименту дозволяють зробити висновок про можливість точного відтворення необхідного значення коефіцієнта трансформації КПО та її просторової жорсткості після завершення процесу розкриття з урахуванням зниження цих параметрів при усуненні надлишкового тиску формоперетворення.

## Висновки

1. Дослідження кінетики процесу розкриття багатосекційної КПО дозволило виконати верифікацію отриманих розрахункових результатів, підтвердити працездатність розроблених конструктивних рішень та відповідність регламентованих вихідних параметрів КПО до заданих умов.

2. У довгомірній конструкції періодичного профілю при розкритті з розрахунковим значенням тиску у внутрішній порожнині (~60 кПа) не спостерігалось викривлень рухомої поверхні із локальною втратою стійкості та відхилень від осі симетрії на кути, що перевищують  $1^\circ$ . Експеримент

підтвердив теоретичні передумови щодо синхронності розкриття кільцевих гофрів рівних діаметрів в послідовності від найбільшого до найменшого одночасно для всіх секцій. Зазначений алгоритм розкриття забезпечує стійкість КПО на проміжних стадіях розкриття, по мірі поступового зростання жорсткості розкривної оболонки.

3. Результати динамічних модальних досліджень та їх порівняння з результатами чисельного експерименту дозволяють зробити висновок про можливість точного прогнозування співвідношення ступеню розкриття та просторової жорсткості КПО на заключній стадії формоперетворення та у кінцевому (робочому) стані.

### **Загальні висновки**

- 1) Робота подається як сукупність нових наукових результатів, спрямованих на рішення актуального науково-технічного завдання, що полягає у створенні довгомірної зварної конструкції перетворюваного об'єму космічного призначення. Розроблені технологічні процеси та обладнання для їх реалізації забезпечують необхідні геометричні параметри і несну здатність у сукупності з високою міцністю та вакуумною щільністю зварних з'єднань. На основі даних чисельного моделювання процесу формоперетворення, аналізу напружено-деформованих станів КПО та верифікації отриманих результатів в натурному експерименті визначено оптимальні геометричні параметри довгомірної перетворюваної конструкції, що дозволяють досягти її найліпших масо-габаритних параметрів для заданих головних функціональних властивостей та несної здатності.
- 2) Моделювання напружено-деформованих станів на прикладі варіативних моделей багатосекційних конічних оболонок з конструкційних металів дозволило отримати висновок про оптимальність діапазону співвідношень пружно-пластичних властивостей аустенітної нержавіючої сталі AISI 321 у якості матеріалу оболонки конструкції з

наступними фізико-механічними характеристиками: межа плинності  $\sigma_T = 309$  МПа, тимчасовий опір розриву  $\sigma_B = 715$  МПа;  $\sigma_T / \sigma_B = 0,43$ , відносне видовження при розтягу  $\epsilon = 60,2$  %, модуль пружності  $E = 229$  ГПа.

- 3) Розроблена технологія імпульсного мікроплазмового зварювання забезпечує практичну рівномірність зварного з'єднання і основного металу (сталь AISI 321 товщиною 0,3 мм, погонна енергія  $Q_i = 36,5$  Дж/мм, частота імпульсного струму  $F-P = 200$  Гц, відношення часу імпульсу струму до тривалості циклу 0,5), та гарантує вакуумну щільність оболонки після деформацій при формуванні гофрованих дисків і розкритті оболонки.
- 4) Методологія контролю якості зварних з'єднань на основі використання вихрострумового дефектоскопу NORTEC 600 в процесі зварювання надала можливість визначати та виправляти візуально приховані дефекти без повторних складально-зварювальних операцій і гарантувати їх відсутність на фінальній стадії виготовлення та розкриття конструкції
- 5) Визначені та практично підтверджені параметри профілю рухомої поверхні оболонки, що гарантують відсутність локальної втрати стійкості в процесі формоутворення гофрованого диска із конічної оболонки і подальшого розкриття КПО. Доведено, що забезпечення сталого процесу формоутворення і розкриття КПО можливо за умов дотримання співвідношення товщини оболонки  $\delta$  до кроку  $b$  кільцевої згортки гофрованого диску у діапазоні  $26\delta \leq b \leq 29\delta$ .
- 6) Встановлено, що базова частота власних коливань КПО змінюється в процесі її розкриття, поступово збільшуючись із зростанням довжини конструкції. Доведено, що базова частота власних коливань КПО в фінальній стадії розкриття відповідає регламентованому значенню більше 2 Гц, що усуває вірогідність виникнення резонансних частот коливань КПО в експлуатаційних умовах. Похибка між розрахунковими



даними частоти власних коливань КПО на основі застосування системи скінченно-елементного аналізу і експериментальними даними склала 6%.

- 7) Методами математичного моделювання і експериментальними дослідженнями доведено, що напружено-деформований стан довгомірної зварної КПО відповідає регламентованим вимогам за умови заданого корисного навантаження, рівень максимальних еквівалентних напружень в конструкції не перевищує допустимого значення 200 МПа, а при інерційному навантаженні прискоренням  $9,8 \text{ м/сек}^2$  КПО не втрачає стійкості.

## Список літератури

1. "Статистика запусків космічних носіїв." *Spaceflight101.com*. Останній перегляд 15 Бер. 2021.
2. Block, Joachim, Marco Straubel, and Martin Wiedemann. "Ultralight Deployable Booms for Solar Sails and Other Large Gossamer Structures in Space." *Acta Astronautica*, vol. 68, no. 7-8, Apr.-May 2011, pp. 984-992. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2010.09.005>.
3. Guenat, H., and O. Le Couls. "Ultra-Light Structures: Status of Development and Potential Applications." *ESA Techno/Innovation Days*, 2010.
4. Lacour, D., et al. "Control Device for Deployment of Inflatable Structures." U.S. Patent 7,740,203, 2010.
5. Miura, K. "Method of Packaging and Deployment of Large Membranes in Space." *Institute of Space and Astronautical Science*, Rept. 618, Tokyo, 1985.
6. Sogame, A., and H. Furuya. "Conceptual Study on Cylindrical Deployable Space Structures." *Proceedings of the IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*, edited by S. Pellegrino and S. D. Guest, Kluwer Academic, Dordrecht, Sept. 2000, pp. 383–392. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9514-8>.
7. Senda, K., et al. "Deploy Experiment of Inflatable Tube Using Work Hardening." *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2006-1808, May 2006. DOI:10.2514/6.2013-1805.
8. Guest, S. D., and S. Pellegrino. "The Folding of Triangulated Cylinders, Part 1: Geometric Considerations." *Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, no. 4, 1994, pp. 773–777.
9. Guest, S. D., and S. Pellegrino. "The Folding of Triangulated Cylinders, Part 2: The Folding Process." *Journal of Applied Mechanics*, vol. 61, no. 4, 1994, pp. 778–783.

10. Barker, R. J. P., and S. D. Guest. "Inflatable Triangulated Cylinders." *Proceedings of the IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*, edited by S. Pellegrino and S. D. Guest, Kluwer Academic, Dordrecht, Sept. 2000, pp. 17–26. <https://doi.org/10.1007/978-94-015-9514-8>.
11. Veal, G., Palisoc, A., and Derbès, W. *Deployable Inflatable Boom and Methods for Packaging and Deploying a Deployable Inflatable Boom*. U.S. Patent Application 6,786,456, 2004.
12. Palisoc, A. L., Redell, F. H., and Andersen, G. "Deployment and Structural Support of Space Membrane Optics System Using Rigidizable Conical Booms." *Proceedings of the 9th Biennial ASCE Aerospace Division International Conference*, American Society of Civil Engineers, 2004, pp. 946–953.
13. Lichodziejewski, D., Derbès, B., West, J., Belvin, K., and Pappa, R. "Bringing an Effective Solar Sail Design Toward TRL 6." *39th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit*, AIAA Paper 2003-4659, July 2003.
14. Kyriakides, S. "Propagating Instabilities in Structures." *Advances in Applied Mechanics*, vol. 30, 1993, pp. 67–189. doi:10.1016/S0065-2156(08)70174-1.
15. Caffrey, M., et al. "The Cibola Flight Experiment." *Proceedings of the 23rd Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites*, Paper SSC09-III-6, Aug. 2009.
16. Johnson, C. E. *A Study on the Use of an Antenna/Homing Guide for Lunar Base Communication/Navigation Systems*. NASA CR-88688, 1966.
17. Freeland, R. E., Bilyeu, G. D., Veal, G. R., Steiner, M. D., and Carson, D. E. "Large Inflatable Deployable Antenna Flight Experiment Results." *Acta Astronautica*, vol. 41, no. 4–10, 1997, pp. 267–277. doi:10.1016/S0094-5765(98)00057-5.
18. Freeland, R. E., Bilyeu, G. D., and Veal, G. R. "Development of Flight Hardware for a Large, Inflatable-Deployable Antenna Experiment." *Acta Astronautica*, vol. 38, no. 4–8, 1996, pp. 251–260. doi:10.1016/0094-5765(96)00030-6.

19. Katsumata, N., Natori, M. C., and Yamakawa, H. "Folding and Deployment Analyses of Inflatable Structures." *Proceedings of the 28th International Symposium on Space Technology and Science*, Paper 2011-c-38, Okinawa, Japan, June 2011.
20. Paton, B.E., editor. *Space: Technologies, Materials, Structures*. Taylor & Francis, 2003, pp. 447-495.
21. Bulatsev, A. R., Morejnis, M. M., et al. "Erection and Welding of Large-Sized Structures in Space." *Welding in Space and the Construction of Space Vehicles by Welding*, Miami, 1991, pp. 70–80.
22. Paton, B. E., and Lapchinsky, V. F. "Welding and Related Technologies in Space." Cambridge Int. Sci. Publ., 1997, pp. 88–105.
23. Paton, B. E. "Technologische Gesichtspunkte des Schweißens im Weltraum." *Schweißen und Schneiden*, vol. 3, no. 42, 1990, pp. 117–120.
24. Lichodziejewski, D., Veal, G., and Derbs, B. "Spiral Wrapped Aluminum Laminate Rigidization Technology." *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2002-1701, Apr. 2002.
25. Патон, Б. Е., et al. "Перетворювані цільнозварні металічні конструкції." *Автоматичне зварювання*, no. 10(559), 1999, pp. 81–85.
26. Волков, В. С. *Розвиток наукових положень щодо розроблення тонкостінних зварних конструкцій перетворюваного об'єму космічного призначення: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06*. Київ, 2017.
27. *Космос: технології, матеріалознавство, конструкції: Сб. наук. тр.*, під ред. Б. Е. Патона, ІЕЗ ім. Е. О. Патона НАН України, 2000.
28. Paton, B. E., Lobanov, J. M., and Volkov, V. S. "Metal Transformable-Volume Structures for Space Engineering." *Acta Astronautica*, vol. 110, May–June 2015, pp. 50–57. <https://doi.org/10.1016/j.actaastro.2015.01.005>.
29. Kane, N. R. *Mathematically Optimized Family of Ultra Low Distortion Bellow Fold Patterns*. U.S. Patent 6,054,194, 2000.

30. Schenk, M., Kerr, S. G., Smyth, A. M., and Guest, S. D. "Inflatable Cylinders for Deployable Space Structures." *Proceedings of the 1st International Conference Transformables 2013*, Seville, Spain, Sept. 2013.
31. Cadogan, D. P. "Rigidization Mechanisms and Materials." *Gossamer Spacecraft: Membrane and Inflatable Structures Technology for Space Applications*, edited by C. M. Jenkins, Vol. 191, Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA, Reston, VA, 2000, pp. 257–475.
32. Cadogan, D. P., and Scarborough, S. E. "Rigidizable Materials for Use in Gossamer Space Inflatable Structures." *42nd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2001-1417, Apr. 2001.
33. Bernasconi, M. C., and Reibaldi, G. G. "Inflatable, Space-Rigidized Structures: Overview of Applications and Their Technology Impact." *Acta Astronautica*, vol. 14, 1986, pp. 455–465. doi:10.1016/0094-5765(86)90146-3.
34. May, C. A., and Wereta, A. *Process Identification Study for Space Cured Composite Structures*. NASA CR-158942, 1978.
35. Forbes, F. W. *Expandable Structures for Space Applications*. U.S. Air Force Aero Propulsion Lab., AD0607541, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 1964.
36. Defoort, B., et al. "Recent Advances in the Rigidization of Gossamer Structures." *Textile Composites and Inflatable Structures*, Vol. 3, Computational Methods in Applied Sciences, Springer, Dordrecht, The Netherlands, 2005, pp. 259–283. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3317-6\\_16](https://doi.org/10.1007/1-4020-3317-6_16).
37. Freeland, R. E., et al. "Inflatable Deployable Space Structures Technology Summary." *Proceedings of the 49th International Astronautical Congress*, International Astronautical Federation, Melbourne, Australia, Paper IAF-98-I.5.01, Sept.–Oct. 1998.
38. Lou, M. C., and Faria, V. A. "Development of Space Inflatable/Rigidizable Structures Technology." *Proceedings of the IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures: Theory and Applications*, edited by S. Pellegrino and S. D.

- Guest, Kluwer Academic, Dordrecht, The Netherlands, Sept. 1998, pp. 251–259.  
<https://doi.org/10.1007/978-94-015-9514-8>.
39. Staugaitis, C. L., and Kobren, L. *Mechanical and Physical Properties of the Echo II Metal-Polymer Laminate*. NASA TN-D-3409, 1966.
  40. O'Sullivan, W. J. *Self Supporting Space Vehicle*. U.S. Patent 2,996,212, 1961.
  41. Keating, C. V., and Woerner, G. M. "Temperature Control of the Explorer IX Satellite." *NASA TN-D-1369*, 1962. [https://doi.org/10.1007/1-4020-3317-6\\_16](https://doi.org/10.1007/1-4020-3317-6_16).
  42. Pezdirtz, G. F. *Erectable Space Structures—ECHO Satellites*. NASA N62-12545, 1962.
  43. Bahiman, H. *Postlaunch Structural Analysis of ECHO II Satellite*. NASA TN-D-3170, 1966.
  44. James, T. G. *Effect of Electron Irradiation on Some Properties of the Echo II Laminate*. NASA TN-D-2207, 1964.
  45. Friese, G. J., Bilyeu, G. D., and Thomas, M. *Initial '80s Development of Inflated Antennas*. NASA CR-166060, 1983.
  46. Lichodziejewski, D., Veal, G., and Derbs, B. "Spiral Wrapped Aluminum Laminate Rigidization Technology." *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 2002-1701, Apr. 2002.
  47. "NASA Facts: Explorer XIX, the Air Density Satellite." NASA, 1964.
  48. Greschik, G., and Mikulas, M. "On Imperfections and Stowage Creases in Aluminum-Rigidized Inflated Cylinders." *37th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA Paper 1996-1332, Apr. 1996.
  49. Peypoudat, V., and Le Couls, O. "Satellite Air Brake Wing Structure." U.S. Patent Application 20,090,218,448, 2009.
  50. Depuy, C., and Le Couls, O. "Gossamer Technology to Deorbit LEO Non-Propulsion Fitted Satellite." *Proceedings of the 40th Aerospace Mechanisms Symposium*, NASA Kennedy Space Center, FL, May 2010, pp. 301–308.

51. Keller, L. B., and Schwartz, S. "Rigidization Techniques for Integrally Woven Composite Constructions." Hughes Aircraft, ML-TDR-64-299, Culver City, CA, 1964.
52. Schwartz, S., and Bagby, J. "Rigidized Inflatable Solar Energy Concentrators." *NASA CR-254*, 1964.
53. Lester, D., Warner, M., and Blair, M. "Foam Inflated Rigidized Structures for Space Applications." *Proceedings of the 1993 Joint Army Navy NASA Air Force (JANNAF) Propulsion Meeting*, vol. 2, JANNAF Interagency Propulsion Committee, Nov. 1993, pp. 243–251.
54. Lester, D. M., and Cannon, D. M. "Foam Inflated Rigidized Truss Structure Developed for an SRS Technologies Solar Concentrator." Thiokol Corp., AD-A409527, Brigham City, UT, 1996.
55. Allred, R. E., Hoyt, A. E., McElroy, P. M., Scarborough, S., and Cadogan, D. P. "UV Rigidizable Carbon-Reinforced Isogrid Inflatable Booms." *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2002-1202, Apr. 2002.
56. Hoyt, A. E., Harrah, L. A., Allred, R. E., and McElroy, P. M. "Rigidization-on-Command ROC Resin Development for Lightweight Isogrid Booms with MLI." *Proceedings of the 33rd International Conference on Environmental Systems (ICES)*, Paper ICES-2003-01-2342, Vancouver, BC, Canada, 2003.
57. Mahias, R., Defoort, B., Mille, M., Coqueret, X., and Langlois, S. "Polymerization of Composite Materials in Free Space Environment." *Proceedings of the 11th International Symposium on Materials in Space Environment*, Paper IAC-04-I.5.08, Aix en Provence, France, Sept. 2009.
58. Defoort, B., Lacour, D., and Le Couls, O. "Assembly of Prepregs for Producing Structures, for Example Ones Which Deploy Through Inflation." U.S. Patent Application 20,100,166,988, 2010.
59. Reiss, P., Breunig, E., Zimmerhagl, P., Newie, N., and Zeiner, A. "Investigating New Space Structures with the Focus Experiment." *Proceedings of*

*20th ESA Symposium on European Rocket and Balloon Programmes and Related Research*, Hyre, France, May 2011.

60. Guidanean, K., and Lichodziejewski, D. "An Inflatable Truss Structure Based on New Sub-Tg Polyurethane Composites." *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2002-1593, Apr. 2002.

61. Lichodziejewski, D., Cravey, R., and Hopkins, G. "Inflatably Deployed Membrane Waveguide Array Antenna for Space." *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2003-1649, Apr. 2003.

62. Lichodziejewski, D., Derbès, B., Reinert, R., Belvin, K., Slade, K., and Mann, T. "Development and Ground Testing of a Compactly Stowed Scalable Inflatably Deployed Solar Sail." *45th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA Paper 2004-1507, Apr. 2004.

63. Redell, F. H., Lichodziejewski, D., Kleber, J., and Greschik, G. "Testing of an Inflation-Deployed Sub-Tg Rigidized Support Structure for a Planar Membrane Waveguide Antenna." *46th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA Paper 2005-1880, Apr. 2005.

64. Johnson, L., Young, R. M., and Montgomery, E. E. "Recent Advances in Solar Sail Propulsion Systems at NASA." *Acta Astronautica*, vol. 61, nos. 1–6, 2007, pp. 376–382. doi:10.1016/j.actaastro.2007.01.047.

65. Lichodziejewski, D., Derbès, B., and Mann, T. "Vacuum Deployment and Testing of a 4-Quadrant Scalable Inflatable Rigidizable Solar Sail System." *46th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA Paper 2005-2122, Apr. 2005.

66. Redell, F. H., and Lichodziejewski, D. "Power-Scalable Inflation-Deployed Solar Arrays." *45th AIAA Structures, Structural Dynamics and Materials Conference*, AIAA Paper 2004-1572, Apr. 2004.



67. Mann, T., Behun, V., Lichodziejewski, D., Derbès, B., and Sleight, D. "Ground Testing a 20-Meter Inflation Deployed Solar Sail." *47th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2006-1707, May 2006.
68. Moeller, C. R. "Design and Ground-Testing of an Inflatable-Rigidizable Structure Experiment in Preparation for Space Flight." M.S. Thesis, U.S. Air Force Inst. of Technology, Wright-Patterson Air Force Base, OH, 2005.
69. Adetona, O., Keel, L. H., Horta, L. G., Cadogan, D. P., Sapna, G. H., and Scarborough, S. E. "Description of New Inflatable/Rigidizable Hexapod Structure Testbed for Shape and Vibration Control." *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2002-1451, Apr. 2002.
70. Cadogan, D. P., Lin, J. K., and Grahne, M. S. "Inflatable Solar Array Technology." *37th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 1999-1075, Jan. 1999.
71. Cadogan, D. P., Lin, J. K., and Grahne, M. S. "The Development of Inflatable Space Radar Reflectarrays." *40th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 1999-1517, Apr. 1999.
72. Lin, J. K. H., Sapna, G. H. III, Cadogan, D. P., and Scarborough, S. E. "Inflatable Rigidizable Isogrid Boom Development." *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2002-1297, Apr. 2002.
73. Cadogan, D. P., Scarborough, S. E., Lin, J. K., and Sapna, G. H. III. "Shape Memory Composite Development for Use in Gossamer Space Inflatable Structures." *43rd AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 2002-1372, Apr. 2002.

74. "Spacecraft—Details: OV1-8." *NASA National Space Science Data Center*, 2012, <http://nssdc.gsfc.nasa.gov/nmc/spacecraftDisplay.do?id=1966-063A>. Accessed 28 Jan. 2021.
75. Derbès, B. "Case Studies in Inflatable Rigidizable Structural Concepts for Space Power." *37th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, AIAA Paper 1999-1089, Jan. 1999.
76. Guidanean, K., and Williams, G. T. "An Inflatable Rigidizable Truss Structure with Complex Joints." *39th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference*, AIAA Paper 1998-2105, Apr. 1998.
77. Keller, L. B., Schwartz, S. S., Olevitch, A., and Allinikov, S. A. "Space Rigidized Resin Fiberglass Sandwich Materials." *Journal of Spacecraft*, vol. 3, no. 4, 1966, pp. 513–518.
78. Russell, I. W., and Hanssen, N. S. "Application of a Gelatin Resin System to Aerospace Expandable Sandwich Structures." GCA Corp., AFAPL-TR-65-84, Minneapolis, MN, 1965.
79. Degtyarev, A. V., Lobanov, L. M., Kushnar'ov, A. P., et al. "On Possibilities for Development of the Common-Sense Concept of Habitats Beyond the Earth." *Acta Astronautica*, vol. 170, 2020, pp. 487–498.
80. Dassault Systèmes. *Abaqus 2018 Online Documentation*; Abaqus/CAE 2018.
81. *Technical Reference Manual for Dewesoft Modal Testing and Modal Analysis Solutions*, DEWESoft d.o.o., 2000-2021.