

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 натурального 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. Продемонстровано 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.

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.

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.

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 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 розкривної 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 розкривної оболонки.

Практичне значення отриманих результатів.

Теоретичні та експериментальні дослідження, які були виконані в ході роботи, можуть бути застосовані при створенні велокогабаритних 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 рівноміцних 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»

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 металічного 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.

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

ABSTRACT

Borovik, Y.V. Development and Investigation of a Longitudinal Welded Structure of Transformable Volume for Space Apparatus Construction.

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.

The object of research - is self-supporting structures of a transformable space destination

The subject of research - is the technological processes of manufacturing and the study of the operational properties of a long-dimensional welded structure of a transformed volume.

The purpose of the work: creation of a long-term design of the transformed volume with provision of the specified geometric parameters, vacuum density after passing through deformation cycles and load-bearing capacity under the influence of space factors.

The scientific novelty of the work consists in a set of constructive and technological solutions aimed at creating a long-dimensional welded structure of a transformable volume (TVS) for space purposes, in the developed technologies of welding, forming and verification by experimental evaluations of the results of mathematical modeling of stress-strain states and frequencies of natural oscillations of the TVS, which provide its necessary bearing capacity and mass-dimensional parameters, high strength and vacuum density of welded joints.

The work is focused on the development of an algorithm for reproducing the combination of geometric and mechanical properties of the opening structure in working condition, as well as predicting the defect formation of extremely deformed welded joints of foil metal materials directly during the welding process, which ensures their vacuum density after deformation cycles. Sufficient rigidity of the transformed shell of the structure after opening determines the self-supporting capacity, which is its basic functional property. However, any of the known methods of obtaining the final load-bearing capacity generate uncertainty in the ratio of the stiffness of the shell and its exact geometric parameters, which are fundamentally important for space apparatus construction. In addition, the creation of an opening shell requires forecasting the reaction of its critical elements to external and technological factors, the reproduction of which in operational conditions is extremely difficult or impossible. The most characteristic example is the reproduction of the specified properties of non-separable joints that undergo extreme deformations as a component of an expansion shell.

Practical significance of the obtained results.

The theoretical and experimental studies that were carried out during the work can be applied in the creation of bicycle-sized self-supporting shells of convertible volume, which can be used in a wide range of tasks for the creation of retractable and modular structures in the field of space apparatus construction. The developed design has a specific practical application and is intended for testing in real operating conditions.

In the course of the work, a methodology was developed for accurately predicting the combination of geometric and mechanical properties of the transformed structure after full opening in working condition, as well as practical recommendations for the execution of equal-strength welded joints of shells that maintain tightness during extreme deformation and further operation in the aggressive environment of outer space.

The results of theoretical and experimental studies, which were obtained in the course of the work, can be applied in the creation of self-supporting shells of

the transformed volume, which will be used in space apparatus construction, in particular in the projects of the Yuzhnoye State Design Office

In the first chapter, the application of technologies of compact transformation of spatial structures in modern world practice is considered and the classification of modern transformable structures and self-supporting structures of shell and, in particular, rod type is given. The methods of ensuring the basic functional properties of the transformed structures are indicated and analyzed, and the research tasks are outlined. On the basis of a wide review of literary sources and a further comparison of the properties of materials of metallic and synthetic origin, an analysis of the acceptability of their use under the conditions of ensuring the stiffness and strength properties of self-supporting structures of various purposes was carried out.

In the second chapter, the methodological aspects of creating a metal shell long-dimensional transformable structure of a periodic profile are considered. Numerical modeling of the stress-strain states of the research object selected through successive optimization was performed, its stiffness characteristics were analyzed, and rational ways of improving the mass-dimensional properties were determined. The main and alternative methods of forming inseparable connections of aerospace materials are presented. An analysis of the impact of the key parameters of the pulsed microplasma welding process on the structural features of the seam before and after extreme deformation was performed. The results of the determined and experimentally confirmed optimal conditions for the formation of integral connections of thin transformable shells made of austenitic steel, the combination of physical and mechanical properties and structural features of which are as close as possible to similar properties of the base metal, are presented. The technological conditions for ensuring the necessary properties of the connection, taking into account the operating and manufacturing conditions, are substantiated. The influence of welded joints on the opening process and spatial stiffness of the opened structure was studied.

The third chapter is devoted to the development of the technology of welding structural elements of TVS and to the study of the kinetics of the process of opening a long-dimensional structure. The selection of acceptable methods of quality control of non-separable joints was made, taking into account their geometric and structural features. An analysis of satisfactory combinations of the physical and mechanical properties of metal materials to ensure the necessary rigidity and stability of the converted structure under the influence of space environment factors was carried out. General conclusions have been drawn based on the results of research on the combination of sufficient degrees of transformation and rigidity of the research object.

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, joint microstructure

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у науково періодичних виданнях, що входять до наукометричної бази даних Scopus:

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, стор. 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, стор. 170–175
3. 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, 67(12), стор. 2757–2763, DOI10.1007/s40194-023-01592-6

Статті у наукових фахових виданнях України

4. Л. М. Лобанов В. С. Волков О. В. Махненко С. М. Кандаля Моделирование НДС и несной способности сварных трансформовных конструкций в процессе розкриття і експлуатації, X Міжнародна конференція «Математичне моделювання та інформаційні технології в зварюванні та споріднених процесах», 2020 Матеріали конференції опубліковані у журналі Автоматическая сварка, 2021, № 1 Категорія Б