

ПЕРСПЕКТИВИ ЗАСТОСУВАННЯ АНІЗОГРІДНИХ СІТЧАСТИХ СТРУКТУР В КОНСТРУКЦІЯХ АДАПТЕРІВ РАКЕТ-НОСІЇВ

В.А. Пророка, В.І. Ліповський

Дніпровський національний університет імені Олеся Гончара, пр. Гагаріна 72, м. Дніпро, 49010, Україна

Анотація. Досліджена ефективність використання анізотропних сітчастих структур в конструкціях ракет-носіїв, зокрема в адаптерах корисного вантажу. На конкретному прикладі конструкції адаптера, що експлуатується проводиться її порівняння з анізотропним адаптером, який виготовляється з різних матеріалів – композитних, виконаних шляхом намотки, та металевих з використанням адитивних технологій. Ефективність конструкції адаптера оцінювалась за критерієм мінімуму маси при умові виконання вимог міцності та стійкості. Визначення початкових геометричних параметрів анізотропної сітчастої конструкції проведено за умови рівності критичних напружень для симетричного і несиметричного випадків втрати стійкості для моделі конструктивно-ортотропної оболонки. Розрахунки та порівняння виконано для композитних матеріалів - склопластик, вуглепластик, органопластик та боралюміній, а також металевих – АМГ6М, ВТ20. Перевірка геометричних параметрів розрахованих по моделі конструктивно-ортотропної оболонки показала, що вони не відповідають вимогам міцності та стійкості. Вибір геометричних параметрів працездатної конструкції адаптера виконано за допомогою чисельного експерименту методом кінцевих елементів. Геометрію сітчастої конструкції адаптера було параметризовано з забезпеченням варіативності двох геометричних розмірів поперечного перетину позовдовжнього ребра та двох геометричних розмірів поперечного перетину верхнього шпангоута. Чисельний експеримент виконано для конструкцій з вуглепластику, та для металів АМГ6М, ВТ20. Результати розрахунків показали, що анізотропні сітчасті конструкції дають вигоду по масі адаптерів, який складає до 50% у порівнянні з конструкціями, які знаходяться в експлуатації.

Ключові слова: АНІЗОГРІДНІ КОНСТРУКЦІЇ, СІТЧАСТІ КОНСТРУКЦІЇ, АДАПТЕРИ РАКЕТ-НОСІЇВ, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, АДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Аннотация. Исследована эффективность применения анизотропных сетчатых структур в конструкциях ракет-носителей, в частности в адаптерах полезной нагрузки. На конкретном примере конструкции адаптера, который находится в эксплуатации, выполняется его сравнение с анизотропным адаптером, который изготавливается из разных материалов – композитных, выполненных путем намотки, и металлических с использованием аддитивных технологий.

Ключевые слова: АНИЗОГРІДНІ КОНСТРУКЦІЇ, СІТЧАСТІ КОНСТРУКЦІЇ, АДАПТЕРИ РАКЕТ-НОСИТЕЛЕЙ, КОМПОЗИТНІ МАТЕРІАЛИ, АДДИТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ.

Abstract. The efficiency of using anisogrid lattice structures in launch vehicle designs, in particular in payload adapters, is investigated. On a specific example of the design of the adapter, which is in operation, it is compared with an anisogrid adapter, which is made of different materials - composite, made by winding, and metal using additive technologies. The performance of the adapter was evaluated by the criterion of minimum mass, subject to the requirements of strength and stability. The initial geometric parameters of the anisogrid lattice structure were determined under the condition that the critical stresses are equal for the symmetric and asymmetric cases of stability loss for the structural orthotropic shell model. Calculations and comparisons were made for composite materials - fiberglass, carbon fiber, organoplastic and boron-aluminum, as well as metal - AMG6M, BT20. Checking the geometrical parameters calculated on the model of structural orthotropic shell showed that they do not meet the requirements of strength and stability. The choice of geometric parameters of a working adapter design is made by numerical experiment with finite element method. The geometry of the lattice structure of the adapter was parameterized to ensure the variability of two geometric dimensions of the cross section of the longitudinal rib and two geometric dimensions of the cross section of the upper frame. The numerical experiment was performed for the constructions made of carbon plastic and for metals AMG6M, BT20. The results of the calculations showed that the anisogrid lattice structures give a gain on the weight of the adapters, which is up to 50% compared to the designs in operation.

Keywords: ANISOGRID STRUCTURES, LATTICE STRUCTURES, LAUNCH VEHICLE ADAPTER, COMPOSITE MATERIALS, ADDITIVE TECHNOLOGY.

Вступ

Зменшення маси конструкції залишається однією з найбільш актуальних проблем ракетно-космічної техніки. Особливо гостро стоїть питання зменшення маси конструкції верхніх ступенів ракет-носіїв, так як це дає на порядок більший приріст енергетичних характеристик ракети-носія. До конструкцій, що розташовуються на верхніх ступенях ракет-носіїв належать зокрема адаптери. Основним їх призначенням є кріплення корисного вантажу до конструкції ракети-носія. Також адаптери можуть виконувати деякі додаткові функції. Наприклад, містити у своєму складі системи відокремлення корисного вантажу, на них можуть бути встановлені прилади та прокладені мережі для обміну даними між системою керування ракети-носія та космічним апаратом тощо.

Одним із рішень, що в перспективі можуть дозволити суттєво зменшити масу конструкції ракети носія, може стати використання анізотропних та ізотропних сітчастих структур замість існуючих.

Постановка задачі

Предметом даної роботи є аналіз ефективності використання анізотропних конструкцій у порівнянні з реальними конструкціями адаптерів, що експлуатуються на сучасних ракетах-носіях.

Аналіз існуючих конструкцій адаптерів та вимог, що до них висуваються. Конструкції сучасних адаптерів є різноманітними. Найчастіше адаптери являють собою конструкції циліндричної, а найчастіше конічної форми. Це можуть бути гладкі оболонки, оболонки підкріплені силовим набором (найчастіше стрингерами) або вони можуть представляти собою ферми, побудовані з трубчастих металевих чи композитних

стрижнів. Серед матеріалів найбільш поширеними є метали – сплави алюмінію АМг6М, АМг6Н, їх аналоги та титанові сплави. Все більшого поширення набувають композити, серед яких для адаптерів найбільш поширені вуглепластики на основі епоксидної смоли. З них виготовляють оболонки заданої форми шляхом безперервного намотування на спеціальних станках. Існують також адаптери, що мають у своїй будові декілька частин, що з'єднуються, при чому ці частини часто виготовляються з різних матеріалів (поєднання намотаної композитної оболонки та металевої частини).

На адаптер під час польоту діють різного роду навантаження, основні з яких зумовлені вагою закріпленого корисного вантажу та перевантаженнями, що діють на ракету-носіїв. Маса корисного вантажу, що розташовується на сучасних ракетах-носіях сягає від декількох сотень кілограмів до декількох тон. В залежності від цього маса адаптерів також коливається у межах від однієї до кількох сотень кілограмів. На масу адаптерів суттєво впливають поздовжні та поперечні перевантаження. Конструкція адаптерів розраховується у відповідності до найбільш несприятливої комбінації навантажень, що вибирається з усіх можливих розрахункових випадків [1-3].

Анізотропні композитні сітчасті конструкції. Зазвичай такі конструкції виконуються у вигляді циліндричних або конічних оболонок, які складаються зі спіральних та кільцевих однонаправлених ребер, які формуються шляхом безперервного намотування. Як показано у роботі [4], процес виготовлення таких оболонок включає наступні основні кроки, проілюстровані на рис. 1:

- товщина оболонки (висота поперечного перетину ребра h);
- кут нахилу спірального ребра відносно меридіану оболонки φ ;
- ширина поперечного перетину спіральних та кільцевих ребер δ_h та δ_c (для структури, зображеної на рис. 2, δ_c – загальна ширина сусідніх кільцевих ребер);
- відстані між спіральними та кільцевими ребрами a_h та a_c , визначені по нормалі до осей.

Ребра є головним несучим елементом конструкції, тоді як плівка, наявність якої зумовлена технологічними вимогами, не враховуються як несучий елемент при проектуванні таких конструкцій. Високі характеристики та масова ефективність в композитних сітчастих структурах забезпечуються використанням при намотці однонаправлених волокон, які безпосередньо мають малу кількість дефектів, і, відповідно високі значення фізико-механічних властивостей, а також тим, що конструкція виготовляється цілісною шляхом безперервної намотки волокон на оправку. В порівнянні з відомими ізогрідними конструкціями, які складаються зі спіральних та кільцевих ребер, що формують рівносторонні трикутники і мають однаковий поперечний перетин, анізогрідні конструкції

забезпечують додатковий вииграш по масі за рахунок того, що їх поперечний перетин є прямокутним та має більшу жорсткість на згин.

Методика розрахунку анізогрідних композитних сітчастих конструкцій

При навантаженні анізогрідної сітчастої конструкції осьовим стискаючим зусиллям може мати місце як симетричний, так і несиметричний випадки загальної втрати стійкості. На основі умови рівності критичних напружень для симетричного і несиметричного випадків втрати стійкості авторами В. В. Васильєвим та Є. В. Морозовим було розроблено методику розрахунку оптимальної анізогрідної структури. У цій методиці модель анізогрідної конструкції представлена у вигляді конструктивно-ортотропної оболонки [4].

Аналіз ефективності використання анізогрідної конструкції в порівнянні з адаптером 1666МА ракети-носія Н-ПА згідно методики [4]. У якості об'єкту для проведення аналізу конструкції було обрано адаптер 1666МА, який використовується на діючому РН Н-ПА японського виробництва. Загальний вигляд адаптера та основні його габарити представлені на рис. 3 та рис. 4 відповідно [1].



Рисунок 3 – Загальний вигляд адаптера 1666МА

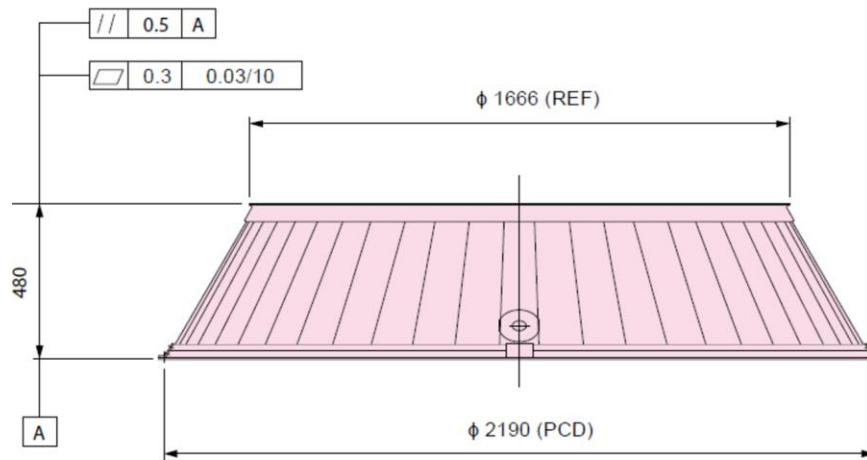


Рисунок 4 – Основні габарити адаптера 1666МА

Адаптер виготовлено з аналогу алюмінієвого сплаву АМг6Н, його маса дорівнює 100 кг. Дана конструкція складається з підкріпленої стрінгерним набором оболонки, нижнього шпангоута, призначеного для стиковки адаптера з конструкціями верхнього ступеня ракетно-носія, і верхнього шпангоута, призначеного для стиковки адаптера з космічним апаратом. Спроекований за моделлю конструктивно-ортотропної оболонки анізотропний композитний адаптер також потребує допоміжних кріплень до конструкції РН та до космічного апарату. Тому, для коректного порівняння

конструкцій пропонується використання шпангоутів аналогічних по конструкції та масі початковому варіанту. Маса шпангоутів адаптера 1666МА дорівнює 40 кг, а маса оболонки без шпангоутів дорівнює 60 кг. Ці параметри використаємо для оцінки ефективності конструкцій.

На підставі даних [1] були обчислені еквівалентні навантаження для кожного розрахункового випадку, і з них обрано для розрахунку найбільш несприятливий випадок. Для даної конструкції найбільш несприятливим випадком є стискання еквівалентною силою, рівною $T_{\text{екв}} = 80600$ кгс.

Таблиця 1

Матеріал	Густина, кг/м ³	Межа міцності при стисканні вздовж волокон, ГПа	Модуль пружності вздовж волокон, ГПа
Вуглепластик (вуглецевий джгут, наповнювач ЕТФ)	1450	1,1	180
Склопластик (склополотно Т-10, наповнювач ЕДТ-10)	1850	1,5	26
Органопластик (волокно СВМ, наповнювач ЕДТ-10)	1350	1,9	84
Боралюміній (волокна борні, епоксидний наповнювач)	2600	1,2	180

Для проектування сітчастої конструкції були обрані композиційні

матеріали, які є найбільш поширеними, а саме склопластик, вуглепластик, органопластик та боралюміній. Їх необхідні

для розрахунку фізико-механічні характеристики подано у табл. 1.

На підставі габаритів адаптера, навантажень, що на нього діють, та

програми, побудованої згідно запропонованої методики [4] в системі Mathcad було отримано результати, подані в табл. 2.

Таблиця 2

Матеріал	Маса оболонки зі шпангоутами в кг	Маса реальної конструкції	Виграш по масі в кг	Виграш по масі у %
<i>Вуглепластик</i>	43.163	100	56.837	56.837
<i>Склопластик</i>	48.86	100	51.14	51.14
<i>Органопластик</i>	44.653	100	55.347	55.347
<i>Боралюміній</i>	44.363	100	55.637	55.637

Отримані результати показують, що найбільший виграш по масі дає застосування вуглепластику в сітчастих анізотропних конструкціях. Однак, усі запропоновані матеріали дають значний виграш, отже, використання матеріалів у реальних конструкціях має бути оцінено на підставі комплексних критеріїв, що включають у себе вартість сировини, обладнання, спеціальних умов для виготовлення тощо.

Оцінка можливості виготовлення анізотропних сітчастих конструкцій шляхом застосування перспективних адитивних технологій. У останнє десятиліття відбувається бурхливий розвиток адитивних технологій. Перспективним може бути цей напрямок розвитку технології виробництва і в рамках даної роботи. Так, наприклад, можна запропонувати виготовлення сітчастих конструкцій анізотропних адаптерів

методом 3d-друку. У якості матеріалів для друку пропонується використати метали. Ця технологія дозволяє друкувати конструкцію анізотропної сітчастої оболонки заодно зі шпангоутами та усіма необхідними кріпленнями. Розглянемо таку можливість на прикладі алюмінієвого сплаву АМг6М та титанового сплаву ВТ-20. Звісно, характеристики даних матеріалів є нижчими у порівнянні з композитами (табл. 3), однак, зважаючи на високу вартість композиційних матеріалів, друк сітчастих конструкцій з металу може бути економічно доцільним. Крім того, дешевшою може виявитися і технологія виготовлення шляхом друку у зв'язку з можливістю її використання для отримання інших конструкцій на цьому ж обладнанні. Виконаємо розрахунки конструкцій адаптера за методикою [4] для вибраних металів. Отримані результати розрахунку ваги конструкцій подані у табл. 4:

Таблиця 3

Матеріал	Густина, кг/м ³	Межа міцності, ГПа	Модуль пружності, ГПа
<i>Титан (ВТ-20)</i>	4450	0,84	112
<i>АМг6М</i>	2640	0,32	68

Таблиця 4

Матеріал	Маса оболонки зі шпангоутами в кг	Маса реальної конструкції оболонки		Виграш по масі в кг	Виграш по масі у %
<i>Титан (ВТ-20)</i>	52.906	100		47.094	47.094
<i>АМг6М</i>	50.329	100		49.621	49.621

З табл. 4 видно, що теоретично застосування адитивних технологій з використанням металів для анізотропних сітчастих конструкцій може бути доцільним, адже дає також значний вигравш по масі.

Аналіз реальної конструкції анізотропного адаптера ракети-носія.

Розглянута в попередніх розділах методика дає приблизний результат і

дозволяє отримати початкові параметри для подальшого аналізу. Аналіз реальної конструкції потребує більш точної перевірки вимог міцності та стійкості з використанням САЕ-систем. В рамках даної роботи було використано САЕ-систему Ansys [5].

Розрахункова схема, на якій зображено прикладені до конструкції зусилля та умови закріплення показана на рис.5.

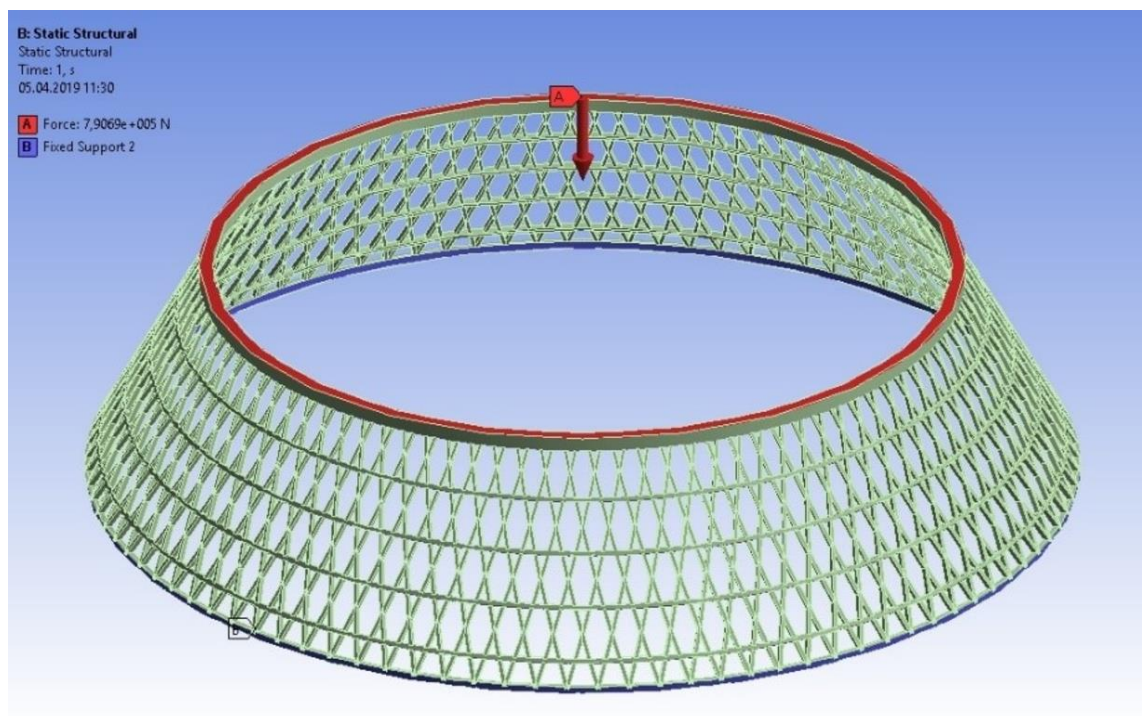


Рисунок 5 – Прийнята розрахункова схема адаптера

На першому етапі було використано геометричну модель, побудовану на основі початкових розмірів, отриманих із розрахунків згідно методики[4].

Проведені розрахунки такої моделі для матеріалу АМг6М показали, що конструкція є непрацездатною. Коефіцієнти запасу міцності та стійкості спроектованих конструкцій були менше одиниці.

На наступному етапі реалізується пошук працездатної анізотропної конструкції адаптера за допомогою чисельного експерименту. Точкою відліку, від якої відбувається такий пошук геометричних параметрів виступає

конструкція, побудована за початковими розмірами.

Для реалізації поставленої задачі геометрію сітчастої конструкції адаптера було параметризовано. При цьому було забезпечено варіативність 4 параметрів – 2 геометричних розмірів поперечного перетину поздовжнього ребра та 2 геометричних розмірів поперечного перетину верхнього шпангоута, виготовленого заодно з усією конструкцією. Діапазон, в яких проводилася відповідна зміна кожного із цих параметрів показаний у табл. 5.

У результаті послідовного розрахунку на міцність та стійкість було побудовано

поверхню відгуку, яка включає в себе масив конструкцій, побудованих згідно з діапазоном геометричних параметрів розрахункової схеми. Проаналізувавши цю поверхню відгуку, з масиву конструкцій були вибрані конструкції, що є працездатними, тобто ті, в яких значення коефіцієнтів запасу міцності і стійкості більші за одиницю. І, відповідно, з масиву

працездатних були вибрані конструкції, що мають мінімальну масу. Результати такого аналізу для матеріалу АМг6М представлені у табл. 6. Після цього було виконано перевірочний розрахунок першої раціональної конструкції. Результати виконання перевірочної задачі представлено на рис. 6-7

Таблиця 5

Параметри адаптера	Нижнє значення	Верхнє значення
<i>Ширина верхнього кільця, мм</i>	20	30
<i>Висота верхнього кільця, мм</i>	20	30
<i>Товщина продольного ребра, мм</i>	9	15
<i>Ширина продольного ребра, мм</i>	5	9

Таблиця 6

Параметр	Перша раціональна конструкція	Друга раціональна конструкція	Третя раціональна конструкція
<i>Ширина верхнього кільця, мм</i>	30	30	20
<i>Висота верхнього кільця, мм</i>	30	30	25
<i>Товщина продольного ребра, мм</i>	12	15	15
<i>Ширина продольного ребра, мм</i>	9	7	9
<i>Коефіцієнт запасу стійкості</i>	2,1224	2,175	1,266
<i>Маса оболонки, кг</i>	44,668	44,885	45,116
<i>Коефіцієнт запасу міцності</i>	1,0214	1,0152	1,0284

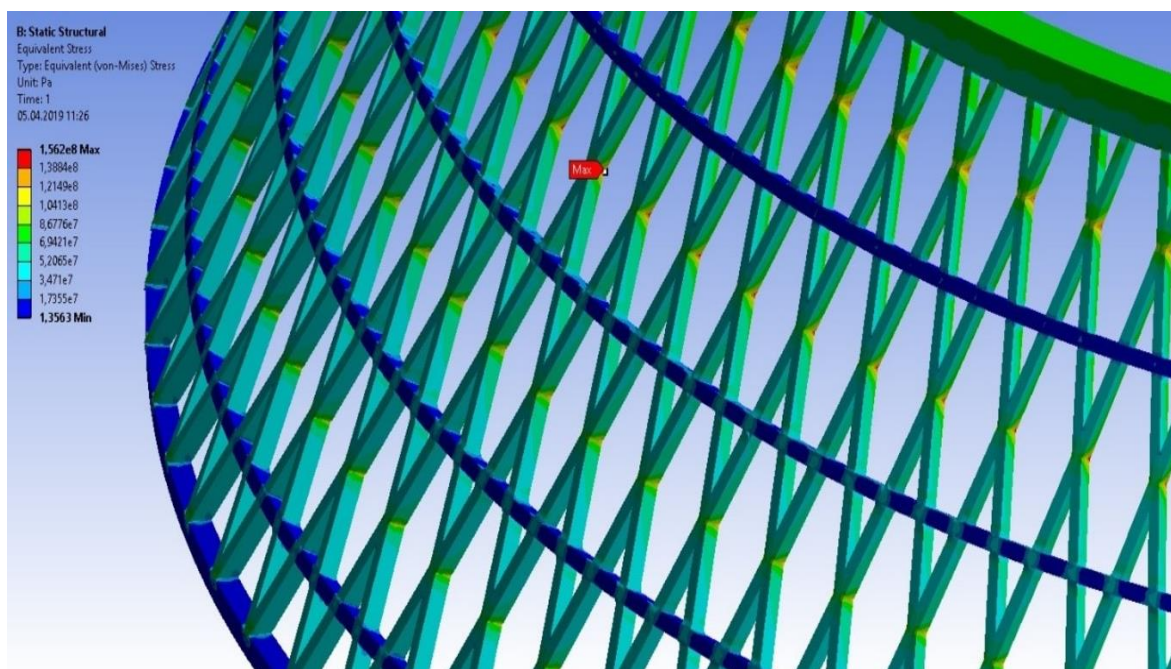


Рисунок 6 - Розподіл еквівалентних напружень по Мізесу в алюмінієвому адаптері

Для розглянутої конструкції коефіцієнт запасу міцності дорівнює 1,02, а

коефіцієнт запасу стійкості становить близько 2.12. Це означає, що конструкція

працює в діапазоні напружень, близьких до максимально можливих, і масова досконалість такої конструкції є високою.

Найменші значення коефіцієнту запасу міцності досягаються у вузлових точках. Це можна пояснити концентрацією у вузлах напружень від двох силових

потоків, які проходять по спіральних ребрах, що утворюють вузол.

Аналогічно, такі задачі було вирішено і для конструкцій з інших матеріалів, а саме для титанового сплаву ВТ-20 та композиту, з вуглепластику.

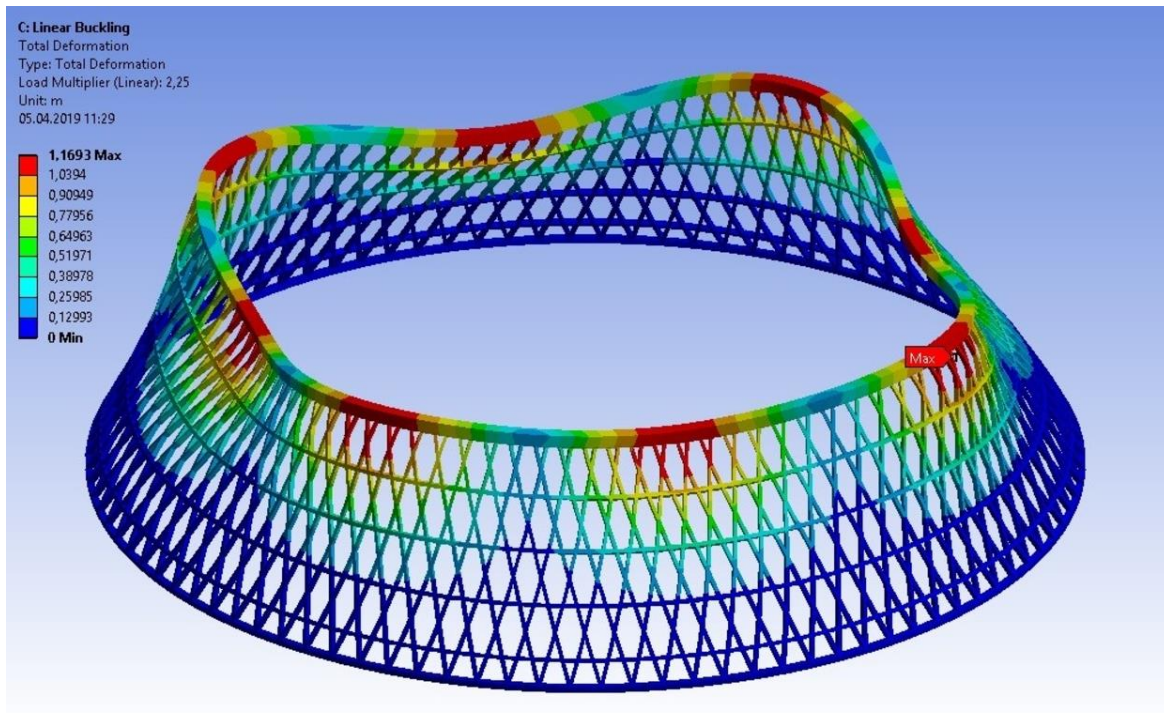


Рисунок 7 – Картина деформацій для першої форми втрати стійкості алюмінієвого адаптера

Значення маси раціональних конструкцій та відповідних їм проектних параметрів, які отримані в результаті

чисельного моделювання адаптера, наведені у табл. 7.

Таблиця 7

Оболонка з матеріалу	Маса оболонки зі шпангоутами, в кг	h, мм	Горизонтальний розмір верхнього кільця, мм	Вертикальний розмір верхнього кільця, мм	δ_c , мм	δ_h , мм
Титан ВТ-20	35,534	7	20	20	9.45	7
АМг6М	44,668	12	30	30	7.35	9
Вуглепластик	52.853	9	20	30	5.25	5

Результати, наведені для металів є максимально наближеними до реальних, однак вони, як і будь-який результат чисельного моделювання потребують експериментального підтвердження.

Результати для вуглепластику є теоретичними, адже в роботі не розглянуто

питання конструювання шпангоута кріплення, і, відповідно, не можливо точно визначити його масу. Тому, для цього матеріалу наведено значення згідно

припущення, що шпангоути еквівалентні по масі шпангоутам вихідної конструкції адаптера 1666МА.

Висновки

Анізотрібні сітчасті конструкції дають реальний виграш по масі адаптерів, який складає 50% у порівнянні з конструкціями, які знаходяться в експлуатації.

Можливе використання анізотрібних конструкцій, виготовлених як з композиту шляхом безперервного намотування, так і металевих, виготовлених з використанням адитивних технологій. Рациональність запропонованих рішень підтверджується результатами чисельного моделювання.

Бібліографічні посилання

1. HII-A User's manual. © Mitsubishi Heavy Industries, Ltd, 2015. 260 p. URL: <https://www.mhi.com/jp/products/pdf/manuals.pdf>.
2. Atlas V Launch Services User's Guide. © Lockheed Martin Commercial Launch Services, 2010. 420 p. URL: <https://www.ulalaunch.com/docs/default-source/rockets/atlasvusersguide2010.pdf>.
3. Ariane V User's manual. © ARIANESPACE Inc, 2016. 271 p. URL: https://www.arianespace.com/wp-content/uploads/2011/07/Ariane5_Users-Manual_October2016.pdf.

4. Valery V. Vasiliev, Evgeny V. Morozov. Advanced Mechanics of Composite Materials and Structural Elements. Oxford: Elsevier Ltd, 2013. 816 p.
5. Guide to ANSYS Programmable Features. ANSYS Inc., Canonburg, PA, August 2005.

Надійшла до редколегії 14.11.2019р.

Відомості про авторів



Пророка Владислав
Аркадійович, Україна.
Дніпровський національний
університет ім. Олеся
Гончара.
Студент.
Сфера інтересів – механіка
деформованого твердого тіла



Ліповський Володимир
Іванович, Україна.
Дніпровський національний
університет ім. Олеся
Гончара. Доцент кафедри
проектування і конструкцій.
Кандидат ф.-м. наук. Сфера
інтересів – механіка
деформованого твердого тіла