



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор ІПМаш
ім. А. М. Підгорного НАН України
(Грантоотримувача)
Андрій РУСАНОВ

(підпис)

М.П.

АНОТОВАНИЙ ЗВІТ
про виконану роботу у 2021 році в рамках реалізації проєкту
із виконання наукових досліджень і розробок

Оптимізація топології та підвищення міцнісних характеристик багатошарових оболонок і твердих тіл при використанні адитивних технологій

Назва конкурсу: Підтримка досліджень провідних та молодих учених
Реєстраційний номер Проєкту: 2020.02/0128

Підстава для реалізації Проєкту з виконання наукових досліджень і розробок (реєстраційний номер та назва Проєкту) 2020.02/0128 «Оптимізація топології та підвищення міцнісних характеристик багатошарових оболонок і твердих тіл при використанні адитивних технологій»

Рішення наукової ради Національного фонду досліджень України щодо визначення переможця конкурсу «Підтримка досліджень провідних та молодих учених» протокол від «04-07» вересня 2020 року № 20

1. ЗАГАЛЬНА ІНФОРМАЦІЯ ПРО ПРОЄКТ

Загальна тривалість виконання проєкту 2020 рік – 2022 рік

Тривалість виконання Проєкту у 2021 році

Початок – 30 квітня 2021 р.

(дата укладання Договору про виконання наукового дослідження і розробки)

Закінчення – 15 грудня 2021 р.

Загальна вартість Проєкту: 6142260 грн. 00 коп. (шість мільйонів сто сорок дві тисячі двісті шістдесят гривень 00 копійок).

Вартість Проєкту по роках:

1-й рік 673350 грн. 00 коп. (шістсот сімдесят три тисячі триста п'ятдесят гривень 00 копійок);

2-й рік 2723200 грн. 00 коп. (два мільйони сімсот двадцять три тисячі двісті гривень 00 копійок);

3-й рік 2745710 грн. 00 коп. (два мільйони сімсот сорок п'ять тисяч сімсот десять гривень 00 копійок).

2. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ВИКОНАВЦІВ ПРОЄКТУ

до виконання Проєкту залучено 10 виконавців, з них:

доктори наук 4;

кандидати наук 4;

інші працівники 2.

3. ІНФОРМАЦІЯ ПРО ГРАНТООТРИМУВАЧА ТА ОРГАНІЗАЦІЮ(І) СУБВИКОНАВЦЯ(ІВ) ПРОЄКТУ

Грантоотримувач: Інститут проблем машинобудування ім. А. М. Підгорного НАН України

Організаційно-правова форма підприємства: Державна організація

Підпорядкованість підприємства: Національна академія наук України

Код ЄДРПОУ 03534570, код КВЕД 72.19

Юридична адреса: вул. Пожарського, 2/10, м. Харків, 61046

Телефон (0572)94-55-14

Адреса електронної пошти admi@ipmach.kharkov.ua

Посилання на веб сторінку <http://ipmach.kharkov.ua/>

4. ОПИС ПРОЄКТУ

4.1. Мета Проєкту

Розробка структури композиту, елементи якого виготовляються адитивними технологіями, для створення високоміцних і легких оболонок.

4.2. Основні завдання Проєкту

- дослідження механічних характеристик зразків, що отримані за адитивними технологіями;
- побудова математичної моделі статичної стійкості вільних коливань і динамічної нестійкості конічної, циліндричної оболонок і складеної конструкції;
- розробка методів розв'язання задачі оптимізації топології тривимірних об'єктів з використанням порожнистих структур і комп'ютерного моделювання задачі заповнення заданого об'єму сферичними і несферичними частинками.

4.3. Детальний зміст Проєкту:

- Сучасний стан проблеми

В останні роки створення нових композиційних конструкційних матеріалів є важливим напрямком розвитку полімерних композитів. В проєкті передбачається розроблення структури композиту для створення високоміцних і легких багат шарових композитних оболонок. Розробка інтелектуальних 3D-моделей для друку деталей грає ключову роль в загальному процесі виробництва. У цьому проєкті розглядаються три класи задач оптимізації, пов'язаних з адитивним виробництвом.

- Новизна Проєкту

При виготовленні композитного матеріалу пропонується отримувати стільниковий заповнювач за допомогою адитивних технологій. Стільники надзвичайно зручно друкувати на 3D принтерах, так як ця технологія дозволяє виконувати порожнини в матеріалі. Пропонується розробка математичних моделей та методів оптимізації компоновки тривимірних тіл, призначених для пошуку найкращих параметрів елементів конструкцій, що задовольняють технологічним нормам 3D друку і міцнісним обмеженням.

- Методологія дослідження

Експериментальне дослідження стільникових зразків, надрукованих за допомогою 3D принтера. Побудова математичних моделей та розробка методів геометричного проєктування для визначення оптимального розміщення порожнин всередині області моделювання із урахуванням рівня напружень в довільній частині конструкції. Математичне та комп'ютерне моделювання заповнення заданого об'єму сферичними і несферичними частинками. Розробка математичної моделі та методу оптимізації об'єму робочої камери 3D принтера для паралельного виготовлення деталей.

5. ОТРИМАНІ НАУКОВІ АБО НАУКОВО-ТЕХНІЧНІ РЕЗУЛЬТАТИ в поточному році/ в рамках реалізації Проєкту, зокрема:

5.1. Опис наукових або науково-технічних результатів, отриманих в рамках виконання Проєкту.

Побудовано засоби математичного моделювання для задачі DLF (Densest Layer Filling) заповнення заданого об'єму (щільного шару) об'єктами (частинками), що мають сфероїдну та багатогранну форму.

Отримано наступні наукові результати:

- побудовано квазі- ρ -функції для аналітичного опису геометричних обмежень в задачі заповнення заданого об'єму (кубоїду) об'єктами, що мають форму сфероїда;
- побудовано квазі- ρ -функції для аналітичного опису геометричних обмежень в задачі заповнення заданого об'єму (кубоїду) несферичними об'єктами, що мають форму багатогранника;

Побудовано та досліджено математичні моделі задачі DLF заповнення заданого об'єму (кубоїду) об'єктами, що мають сфероїдну та багатогранну форму у вигляді неперервних задач нелінійного програмування із застосуванням кусково-гладких квазі- ϕ -функцій для аналітичного опису геометричних обмежень (неперетин об'єктів (non-overlapping constraints) та включення об'єктів у контейнер (containment constraints)).

Отримано наступні наукові результати:

– **побудовано та досліджено математичну модель** задачі DLF заповнення заданого об'єму n об'єктами, що мають сфероїдну форму, як задачі оптимізації пакування сфероїдів в кубоїді мінімального об'єму у вигляді задачі нелінійного програмування (Nonlinear programming problem) з $O(n^2)$ неперервними змінними. Область допустимих розв'язків описується системою $O(n^2)$ нерівностей з кусково-гладкими функціями.

– **побудовано та досліджено математичну модель** задачі DLF заповнення заданого об'єму n об'єктами, що мають багатогранну форму, як задачі оптимізації пакування багатогранників в кубоїді мінімального об'єму у вигляді задачі нелінійного програмування (Nonlinear programming problem) з $O(n^2)$ неперервними змінними. Область допустимих розв'язків описується системою $O(n^2)$ нерівностей з кусково-гладкими функціями.

Розроблено метод розв'язання задачі DLF.

Отримано наступні наукові результати:

Розроблено метод пошуку допустимих розв'язків задачі розміщення величезної кількості об'єктів (сфероїдів та багатогранників), що базується на ідеї активного шару, товщина якого динамічно регулюється в ітераційній процедурі відповідно до вихідних даних. Це значно зменшує час на обчислення заповнення об'єму сумішами сферичних та несферичних (сфероїдних та багатогранних) частинок та дозволяє визначити відносні ймовірності (статистичні ймовірності знайдено експериментально з використанням фрагментів тестового зображення) появи просторових конфігурацій та метричних параметрів серед усіх об'єктів, розташованих у кубоїді. Запропонований метод являє собою ітераційну процедуру, що імітує природний процес засипання суміші різних типів сферичних та несферичних частинок у кубоїдній контейнер.

Розроблено програмні модулі для розв'язання задачі DLF:

– програмний модуль (в середовищі C++), що реалізують пошук допустимих розв'язків задачі DLF для сфероїдів з використанням IPOPT;

– програмний модуль (в середовищі C++), що реалізують пошук допустимих розв'язків задачі DLF для багатогранників з використанням IPOPT.

Отримані результатів порівняно з експериментальними даними

Одержані результати порівнювали з результатами, отриманими під час моделювання за допомогою нейронних мереж та з результатами об'ємної щільності упаковки сфероїдальних частинок. Встановлено, що відносні ймовірності, отримані за допомогою алгоритму, дуже близькі до ймовірностей, отриманих в результаті експерименту; різниця становить менше 3 %.

Одержані результати розрахованих коефіцієнтів заповнення порівнювали з експериментальними результатами об'ємної щільності пакування багатогранних частинок. Встановлено, що дані, отримані за допомогою алгоритму, дуже близькі до отриманих в результаті експерименту; різниця становить менше 5 %.

Розроблено методику втомних випробувань багатшарових композитних тонкостінних конструкцій із стільниковими заповнювачами та методику втомних випробувань зразків, надрукованих адитивними технологіями FDM. Експериментально досліджено втомні характеристики зразків та багатшарових пластин із стільниковими заповнювачами, надрукованих адитивними технологіями. В результаті втомних випробувань побудовано криві Веллера та експериментально визначено межі витривалості.

Побудовано математичну модель деформування тришарових пластин із стільниковим заповнювачем, надрукованим адитивними технологіями FDM. Для побудови дискретної моделі конструкції використовувався метод скінчених елементів. Для верифікації побудованої математичної моделі проведено статичні випробування багатшарових пластинчастих зразків, середній шар яких є стільниковим заповнювачем. Отримано добрий збіг розрахункових та експериментальних результатів.

Побудовано математичні моделі динамічного деформування циліндричних та конічних багатшарових оболонок, середній шар яких надрукований за допомогою адитивних технологій FDM. Розроблено алгоритми та програми розрахунків у середовищі Maple власних коливань циліндричних та конічних оболонок з використанням методу Релея-Рітца. Досліджено властивості коливань таких тришарових конструкцій.

За отриманими науковими результатами опубліковано монографію у видавництві «Наукова думка», сім статей в міжнародних журналах, що індексуються в наукометричній базі SCOPUS, чотири статті у фахових вітчизняних журналах і шість статей подано до друку.

5.2. За наявності науково-технічної продукції обґрунтування її переваг у порівнянні з існуючими аналогами

Це одна з перших в світі робіт, де стільникові заповнювачі тришарових оболонок друкуються за допомогою технології FDM. Вперше в світі буде розроблена математична модель геометрично нелінійного деформування тришарових конструкцій зі стільниковим заповнювачем, який надруковано за допомогою технології FDM. Вперше у світі експериментально досліджено втому тришарових пластин із стільниковим заповнювачем, який надрукований адитивними технологіями FDM.

5.3. Практична цінність отриманих результатів реалізації Проєкту для економіки та суспільства (стосується проєктів, що передбачають проведення прикладних наукових досліджень і науково-технічних розробок)

Дослідження в рамках проєкту носить фундаментальний характер.

5.4. Опис шляхів та способів подальшого використання результатів виконання Проєкту в суспільній практиці.

Після закінчення проєкту розроблені технології виготовлення тришарових оболонкових конструкцій за допомогою FDM технологій і методи їхнього розрахунку буде запропоновано для впровадження на підприємствах України, які проєктують ракети і літаки.

Науковий керівник Проєкту

Зав. відділу надійності та динамічної міцності, д.т.н., проф.
Костянтин АВРАМОВ



(підпис)