

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

Факультет Автоматики і комп'ютеризованих технологій
(повна назва)
Кафедра Комп'ютерно-інтегрованих технологій, автоматизації та робототехніки
(повна назва)

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
Пояснювальна записка

другий (магістерський)
(рівень вищої освіти)

РОЗРОБЛЕННЯ ЗАХВАТНОГО ПРИСТРОЮ МАНІПУЛЯТОРА РОБОТА
З М'ЯКИМ СХОПЛЕННЯМ
(тема)

Виконав студент 6 курсу, групи КТРСм-22-2
Лучанінова Олександра Юріївна
(прізвище, ім'я, по батькові)

Спеціальності 151 Автоматизація та
комп'ютерно-інтегровані технології
(код і повна назва напрямку)

Тип програми Освітньо-професійна
Освітня програма Комп'ютеризовані та
робототехнічні системи
(назва)

Керівник проф. каф. КІТАР Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

Допускається до захисту
Зав. кафедри КІТАР

(підпис)

Невлюдов І. Ш.
(прізвище, ініціали)

2023 р.

Я, як студент ХНУРЕ, розумію і підтримую політику закладу із академічної доброчесності. Я не надавала і не одержувала недозволену допомогу під час підготовки кваліфікаційної роботи. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

07.01.2024



Лучанінова О.Ю.

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

Факультет _____ АКТ
Кафедра _____ КІТАР
Рівень вищої освіти _____ другий (магістерський)
Спеціальність _____ 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології
Тип програми _____ Освітньо-професійна
Освітня програма _____ Комп'ютеризовані та робототехнічні системи
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Зав.кафедри _____
(підпис)

«__» _____ 2024р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

студентові _____ Лучаніновій Олександрі Юріївні
(прізвище, ім'я, по батькові)

Тема роботи: Розроблення захватного пристрою маніпулятора робота з м'яким
схопленням

Затверджена наказом по університету від _____ №1288Ст від 03.11.2023

2. Термін подання студентом роботи до екзаменаційної комісії 11.01.2024р

3. Вихідні дані до роботи: 3.1 Середовище розробки Autodesk Fusion 360; 3.2
Середовище симуляції методом скінченних елементів ABAQUS; 3.3
Виготовлені деталі з PLA-пластику; 3.4 Сила тиску

4. Перелік питань, що потрібно опрацювати в роботі 4.1 Вступ; 4.2 Аналіз
схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яких схопленням; 4.3 Розробка
топології м'якого приводу; 4.4 Проведення експерименту моделювання
топології м'яких схоплювачів методом скінченних елементів; 4.5
Виготовлення макету м'яких схоплювачів; 4.6 Висновки

5. Перелік графічного матеріалу із зазначенням креслеників, схем, плакатів, комп'ютерних ілюстрацій Графічний демонстраційний матеріал в форматі PowerPoint(*.ppt) формату А4-12 сторінок.

6. Консультанти розділів роботи

Найменування розділу	Консультант (посада, прізвище, ім'я, по батькові)	Позначка консультанта про виконання розділу	
		підпис	дата

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№	Назва етапів роботи	Термін виконання етапів роботи	Примітка
1	Аналіз схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яких захопленням	01.09.2023-13.09.2023	виконано
2	Аналіз технічного завдання	14.09.2023-16.09.2023	виконано
3	Аналіз топології м'яких захватів	17.09.2023-25.09.2023	виконано
4	Розробка топології м'яких захватів	26.09.2023-12.10.2023	виконано
5	Проведення експерименту роботи схватів	13.10.2023-05.11.2023	виконано
6	Розробка прес-форм м'яких схватів	06.11.2023-20.11.2023	виконано
7	Розробка макету	21.11.2023-06.12.2023	виконано
8	Оформлення пояснювальної записки	07.12.2023-31.12.2023	виконано
9	Подання роботи на перевірку Інтернет-сервісом	10.01.2023	виконано
10	Подання роботи на рецензію	11.01.2023	виконано
11	Подання роботи на підпис зав. кафедри	12.01.2023	виконано
12	Подання кваліфікаційної роботи в ЕК	15.01.2023	виконано
13			

Дата видачі завдання 1 вересня 2023р.

Студент _____
(підпис)

Лучанінова О.Ю.
(прізвище, ініціали)

Керівник роботи _____
(підпис)

проф. Євсєєв В.В.
(посада, прізвище, ініціали)

РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка: 97с., 7 табл., 49 рис., 2 дод., 32 джерел.

М'ЯКИЙ СХОПЛЮВАЧ, СХОПЛЕННЯ ОБ'ЄКТІВ, РОБОТ-МАНІПУЛЯТОР, ПРИВОД, КІНЦЕВИЙ ЕФЕКТОР, DRAGONSKIN 30.

Мета роботи – розробка топології м'якого кінцевого ефектору для підвищення ефективності захоплення об'єктів різної геометрії та крихкості.

Об'єкт розробки – процес вибору та проектування топології м'якого захвату для захоплення об'єктів.

Предмет розробки – 3D моделі м'яких приводів.

В даній магістерській кваліфікаційна роботі приведено аналіз схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яких захопленням. Проведений аналіз видів м'яких захоплень, топології м'яких захоплень методу FEA, аналіз матеріалів для виготовлення м'яких захоплень. На базі проведеного аналізу було змодельовані чотири топології м'яких захоплювачів.

Кожен створений м'який схват був промодельований в програмі ABAQUS методом кінчених елементів. Всі чотири м'які приводи тестувалися при входньому тиску 10КПа, 30КПа, 50КПа та 80КПа. Отримані результати симуляції були досліджені та описані. Після моделювання для кожної створеної топології було змодельовані прес-форми, які були надруковані на 3D-принтері.

Завдяки матрицям змодельованих м'яких схватів було створено фізичні макети розроблених приводів, які були протестовані на працездатність.

Результати кваліфікаційної роботи описані в статті, яка знаходиться в гугл академії.

ABSTRACT

Explanatory note: 97 pages, 7 tables, 49 figures, 2 app, 32 sources.

SOFT GRIPPER, OBJECT GRIPPER, ROBOT MANIPULATOR, DRIVE, END EFFECTOR, DRAGONSKIN 30.

The purpose of the work is to develop the topology of a soft end effector to increase the efficiency of capturing objects of various geometries and fragility.

Object development is the process of selecting and creating a soft grip topology for capturing objects.

The subject of development is 3D models of soft drives.

This master's attestation work presents an analysis of the gripping devices of a robot manipulator with soft grips. An analysis of types of soft grips, topologies of soft grips using the FEA method, analysis of materials for manufacturing soft grips was carried out. Based on the analysis, four topologies of soft grippers were modeled.

Each created soft grip was modeled in the ABAQUS program using the finite element method. All four soft actuators were tested at inlet pressures of 10KPa, 30KPa, 50KPa and 80KPa. The obtained simulation results were investigated and described. After modeling, molds were modeled for each created topology, which were printed on a 3D printer.

Using the matrices of the simulated soft grips, physical models of the designed actuators were created and tested for performance.

The results of the qualification work are described in the article, which is located in Google Academy.

ЗМІСТ

Перелік умовних скорочень	9
Вступ	10
1 Аналіз схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яких захопленням	12
1.1 Види м'яких захоплень	12
1.2 Топологія м'яких захоплень методу FEA	18
1.3 Матеріали для виготовлення м'яких захоплень	24
1.4 Постановка завдань дослідження	29
2 Розробка топології м'якого приводу	31
2.1 Вибір середовища моделювання м'якого приводу	31
2.2 Моделювання топології м'яких схватів	32
2.3 Кінематична модель м'яких приводів	42
2.4 Висновки до другого розділу	45
3 Проведення експерименту моделювання топології м'яких схоплювачів методом скінченних елементів	46
3.1 Вибір середовища проведення моделювання	46
3.2 Налаштування характеристик для проведення моделювання	47
3.3 Проведення експерименту роботи м'яких приводів	51
3.4 Висновки до третього розділу	61
4 Виготовлення макету м'яких схоплювачів	63
4.1 Моделювання прес-форм м'яких схоплювачів	63
4.2 Виготовлення макета м'яких схоплювачів	70
4.3 Зборка конструкції кінцевого ефектору з м'яким схватом	75
4.4 Розрахунки мікроклімату та освітленості	78
4.4 Висновки до четвертого розділу	79
Висновки	81
Перелік джерел посилань	83
Додаток А Апробація результатів наукових досліджень	87

Додаток Б Демонстраційний графічний матеріал	96
--	----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

КЕ – Кінцевий ефектор;

МСЕ – Метод скінченних елементів;

РМ – Робот-маніпулятор;

DEA – Приводи з діелектричного еластомеру (англ. Dielectric Elastomer Actuators);

FEA – Приводи з рідкого еластомеру (англ. Fluidic Elastomer Actuators);

FPN – Швидка пневматична мережа (англ. Fast Pneumatic Network);

SMA – Сплави з пам'яттю форми (англ. Shape Memory Alloys);

SMP – Полімери з пам'яттю форми (англ. Shape Morphing Polymers);

SPA – М'які пневматичні приводи (англ. Soft Pneumatic Actuators);

SPN – Повільна пневматична мережа (англ. Slow Pneumatic Network).

ВСТУП

На сьогоднішній день перед роботами-маніпуляторами постає більше завдань в нових галузях, таких як, сільська, харчова та медична промисловість, де потребується більш дбайливого поводження з об'єктами. Через це кінцеві ефектори з м'якими схоплювачами набувають більшої актуальності. М'які приводи представляють собою м'яку робототехніку, яка забезпечує ефективну та безпечну взаємодію між маніпуляторами та навколишнім середовищем, на відміну від традиційних видів схватів.

М'які схоплювачі є гнучкими та еластичними завдяки матеріалам, з яких воно виготовлені, завдяки цьому вони можуть адаптуватися до різних форм і текстур об'єкта. Це дозволяє захоплювати та утримувати предмет з великою точністю та маневреністю. Є різні види м'яких акuatorів, які відрізняються за використанням матеріалом та способом захоплення. Найпопулярнішими використовуваним видом є м'які схоплювачі технології FEA, які вже застосовуються в сільській та харчовій промисловості при зборі та обробці овочів і фруктів, також їх впроваджують в хірургії та в догляді за застарілими людьми. Дані схоплювачі приводяться в дію завдяки тиску в середині камери приводу, вигин залежить від топології схвату та від вхідного тиску. Через різну подачу тиску вони і керуються.

М'які схвати є унікальними через свою здатність захоплювати крихкі об'єкти при цьому не пошкоджуючи їх, вони легко створюються та вони є недорогими у виробництві. Але на відміну від традиційних кінцевих ефекторів, вони не мають змогу підіймати дуже важкі об'єкти.

Мета роботи – розробка топології м'якого кінцевого ефектору для підвищення ефективності захоплення об'єктів різної геометрії та крихкості.

Об'єкт розробки – процес вибору та проектування топології м'якого захвату для захоплення об'єктів.

Предмет розробки – 3D моделі м'яких приводів.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- провести аналіз схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яким захопленням;
- спроектувати 3D моделі м'яких захоплювачів технології FEA;
- провести експеримент симуляції роботи м'якого привода;
- розробити 3D моделі прес-форми м'яких захоплювачів;
- виготовити макет м'якого захоплювача;
- зібрати конструкцію кінцевого ефектора.

Магістерська робота оформлена згідно з рекомендаціями [1] та вимогам ДСТУ 3008:2015 [2].

Результати проведеного аналізу доповідались у статті [3], опубліковані у гугл академії та впроваджені у освітній процес (Додаток А).

1 АНАЛІЗ СХВАТНИХ ПРИСТРОЇВ РОБОТА МАНІПУЛЯТОРА З М'ЯКИМ СХОПЛЕННЯМ

1.1 Види м'яких захоплень

Роботи-маніпулятори (РМ) є важливим компонентом робототехніки і призначені для виконання різних завдань, які вимагають точності у виконанні рухів. РМ, або їх ще називають роботизовані руки (РР) – це автоматичний робочий пристрій, який імітує певні функції рук людини, для захоплення та переміщення об'єктів, або для керування інструментами відповідно до фіксованої програми [4]. РМ мають загалом дві складові частини, це: тіло або рука та маніпулятивну частину, аналогічну зап'ястям. Перша складова робота призначена для переміщення та точного розташування об'єктів у робочому просторі [5]. Тіло РР може мати різну конфігурацію, в залежності від місця та поставлених задач, які повинен виконувати робот. До таких типів відносять [3]:

- циліндричні роботи;
- полярні роботи;
- портальні або декартові;
- роботи SCARA;
- роботи Delta;
- шарнірні РМ.

Вони відрізняються за кількістю суглобів та їх типом, діапазоном рухів та орієнтації кінцевого ефектора. Дані складові впливають на швидкість та точність роботи.

Маніпулятивна частина представляє з себе кінцевий ефектор (КЕ), який відповідає за взаємодію РМ з оточуючим середовищем та маніпулювання ним різними способами [6]. Дану частину робота, зазвичай, використовують для

схоплення та переміщення різних об'єктів, які можуть значно відрізнятися один від одного за формою, габаритами, матеріалами та масою. Тому КЕ, також, поділяються на різні типи, це [3]:

- сервоелектричні схвати;
- щелепні захоплення;
- магнітні схвати;
- гідравлічні схвати;
- пневматичні схвати;
- вакуумні захоплення;
- м'які захоплення.

Майже всі перераховані типи відносять до жорстких хватів. Ці схвати можуть виконувати багатоциклічну запрограмовану роботу в чітко визначеному середовищі з високою точністю [7]. Вони складаються з жорстких з'єднань і ланок. Через складну структуру та жорсткість своєї конструкції такі схвати є обмеженими у застосуванні в деяких середовищах, бо мають обмежену гнучкість.

На даний час РМ набувають все більшого використання в таких галузях, як: сільське господарство, харчова промисловість, медицина, упакування, рибна та лісова промисловість. В цих галузях об'єкти мають більш індивідуальні відмінності, це: крихкість, деформація форми, складна властивість поверхні, тому роботизовані КЕ, які можуть адаптуватися під всі ці властивості зараз є більш актуальними та розповсюдженими. До таких захоплень відносять м'які схвати, виготовлені з гнучких та м'яких компонентів, які можуть захоплювати та маніпулювати більшою кількістю об'єктів, завдяки тому що можуть адаптуватися до форми об'єктів без додаткового керування, значно зменшуючи складність системи та відповідно собівартість, при цьому покращуючи ефективність захоплень та безпеку порівняно з жорсткими роботизованими хватами [8].

Зараз розроблений широкий асортимент м'яких схватів, які відрізняються між собою за матеріалом та технологією захоплення. До найпопулярніших видів м'яких захоплень відносять: приводи з рідкого еластомеру (FEA), матеріали з пам'яттю форми, а саме: сплави з пам'яттю форми (SMA), полімери з пам'яттю форми (SMP) та приводи з діелектричного еластомеру (DEA).

Матеріали з пам'яттю форми, це сплави та полімери, які реагують на подразник, змінюючи при цьому певні фізичні та хімічні форми та які здатні повернутися до свого початкового положення після квазіпластичного спотворення [9]. Дані матеріали демонструють змінну жорсткість через фазовий перехід, який дозволяє їх використання як складових для регульованої жорсткості.

SMP виникає з полімерної мережі, що складається з еластичних доменів і перехідних доменів. При нагріванні вищої температури переходу спричиняє розм'якшення перехідного домену, дозволяючи деформувати пружний домен у відповідь на зовнішню силу. Після охолодження, перехідна область стає твердою і зупиняє можливість деформації пружної області. Повторне нагрівання матеріалу, пружний домен розгортається і пристрій повертається до свого нездеформованого стану. В SMP перехід відбувається через фазову зміну матеріалу, де бере участь кристалізація-плавлення або склування-скло [10]. Даний полімер стає м'яким з коефіцієнтом пружності від 0,1 МПа до 10 МПа, а жорстким стає з коефіцієнтом пружності від 0,01 ГПа до 3 ГПа [11]. Недоліком даної технології є низька вироблена сила, що непридатна для захоплення важких об'єктів через низьку жорсткість матеріалу SMP, що міститься в них. Тому цей вид захоплень часто використовують у поєднанні з іншими матеріалами для підвищення їхніх механічних властивостей, таких як міцність та відновлюваність. На рисунку 1.1 (а) зображено схват SMP.

SMA є компактні та мають легку конфігурацію, оскільки для них необхідно лише невеликі схеми керування та джерело живлення постійного струму. Дані сплави мають високу активну напругу зі значними деформаціями

до 5% та мають високий модуль пружності, на 10-83 ГПа нижче температури переходу та на 0,1-41 ГПа вище температури переходу [12]. Спиральні пружини з SMA можуть бути створені з діаметром дроту від 25 мкм до 500 мкм. Завдяки провідності сплави здатні самостійно нагріватися через прямий ефект Джоуля, створюючи власну термічну активацію, і при цьому не потребують зовнішнього нагрівача. Ці KE можуть керуватися низькою напругою, однак для їхньої роботи вимагається великих струмів. SMA є різної форми, це: пружини, плівки, дроти та піни, а титановий нікель є найчастіше використовуваним сплавом для цього виду захоплень. На рисунку 1.1 (б та в) зображені KE даної технології.



а)



б)



в)

а) структура схвату SMP [10];

б) структура схвату SMA [11];

в) структура схвату SMA [12]

Рисунок 1.1 – KE з технологією пам'яттю форми, а саме SMP та SMA

В статті [10] автори продемонстрували, що на роботи схвату впливає обрана конфігурація дроту, до типових конфігурацій дроту відносять: прямий дріт, спіральний, зогнутий, зигзагоподібний та U-подібної форми. За результатами авторів представлено, що максимальний кут згину є в подвійної плоскої U-подібної форми з трапецієподібною конфігурацією дає найвище значення сили наконечника, з найшвидшим часом відгуку та найвищим кутом

згину, що робить його найвищим. Дроти зазвичай йдуть в парі з полімерною матрицею, також в деяких конструкціях використовують парафін для модуляції жорсткості [13].

Головним недоліком даного схоплення є повільний час відгуку через циклічний процес нагрівання та охолодження матеріалу і вони представляють гістерезис у циклах спрацювання.

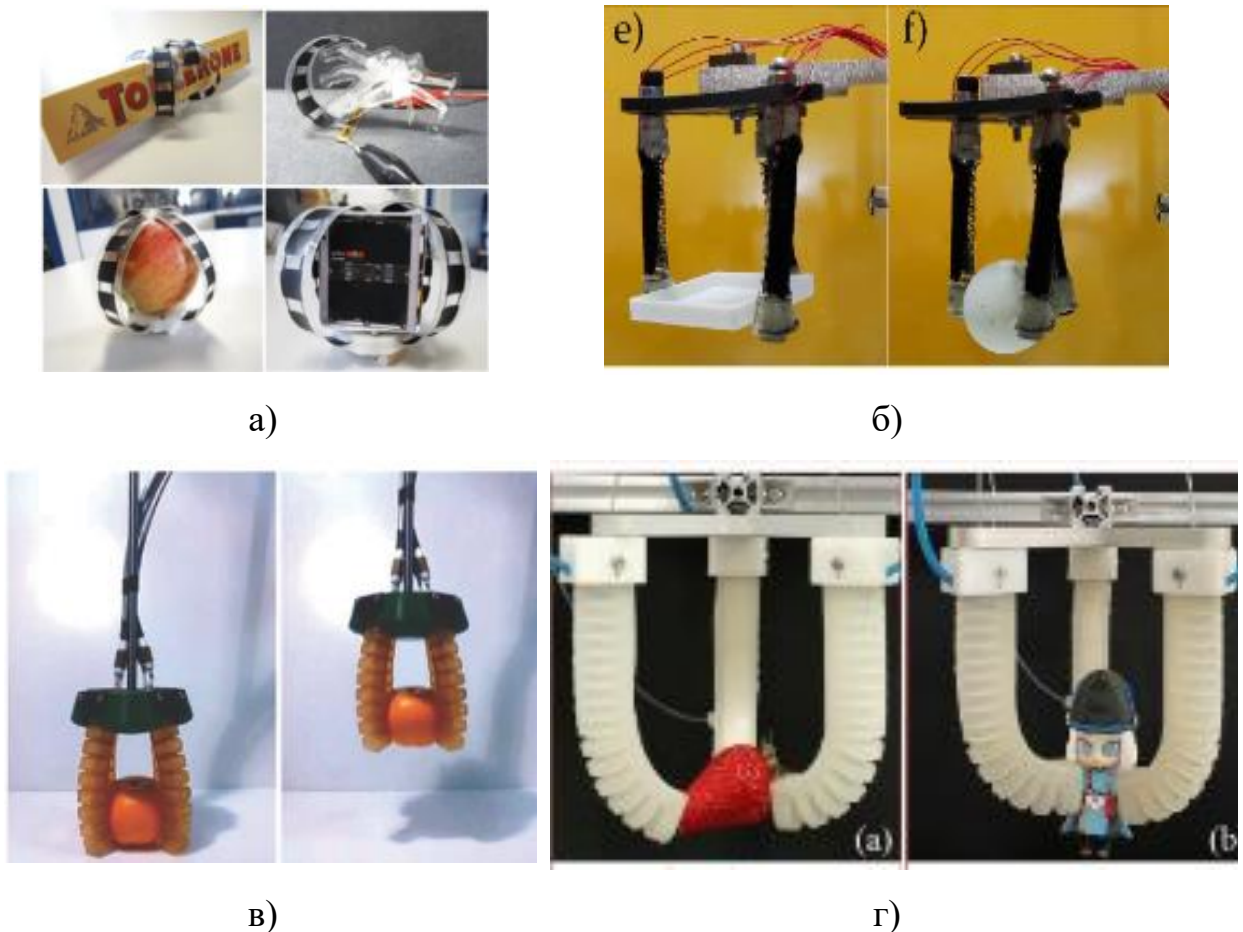
Приводи з діелектричного еластомеру DEA це гнучкий електроактивний полімер, який складається з тонкої еластомерної мембрани затиснутої між двома податливими електродами. Електромеханічне приведення працює за допомогою подачі високої напруги на електроди, що викликає електростатичне притягання між ними. Це притягання, відоме як напруга Максвелла, призводить до стискання еластомерної мембрани, що призводить до зменшення її товщини та розширення площі [10]. Технологія має велику деформацію, високу ефективність, високу щільність енергії та швидку реакцію. Ефективність привода в основному залежить від двох факторів: матеріалів, що використовуються для DEA та сумісних електродів. DEA в більшості випадків використовують діелектричні еластомерні матеріали, такі як силіконовий каучук, акриловий еластомер, поліуретан та їх композитні матеріали. Якщо казати про сумісні електроди, то більш використовуваними є вугільний жир, сажа та графіт, які мають високу провідність, міцну адгезію до більшості матеріалів DEA, стійкість та відзначаються великою гнучкістю [14]. Існує декілька груп конфігурацій акuatora в залежності від їх морфології. До першої групи відносять приводи, які використовують базове розширення в площині, та в другій групі використовується характеристики еластомерів як монолітна структура, гнучкість і багатофункціональність. У статті [15] автори продемонстрували приклад другої групи. На рисунку 1.2 (а, б) зображено м'які схоплювачі технології DEA.

Недоліком такого акuatora є в необхідності високої напруги для роботи та за рахунок багат шарового укладення матеріалу, для необхідної високої вихідної сили, призводить до більш складного процесу створення схвату.

Технологія FEA охоплює об'єкти за допомогою позитивного тиску. FEA створені з використанням матеріалів, таких як силіконові еластomers, і мають структуру, що складається з численних внутрішніх камер і каналів. Камери надуваються під тиском газу або рідини, що призводить до деформації всієї конструкції, цю деформацію називають вигин. Характеристика кута вигину залежить від архітектури та матеріалів приводу. Дані схвати можуть генерувати високі сили, які залежить від тиску газу та площі, на яку цей тиск застосовується. FEA можуть досягати кутів згинання, що становлять близько 300 градусів, і це відбувається протягом дуже короткого часу [10]. Існує багато архітектур для FEA, але є дві основні версії цих приводів, їх відмінність полягає в методі згинання, за допомогою гідравліки або пневматики. До найпопулярніших пневматичних версій відносять пневматичні мережі PneuNet, які складаються з ряду каналів в еластомері і які надуваються під діє повітряного тиску [16].

Метод пневматичного приводу FEA перетворився на домінуючу форму, завдяки високому співвідношенню потужності до маси, високої універсальності, простоті виготовлення, економічності матеріалу, низької вартості, простоті управління, великої деформації та високої створюваної сили є найбільш поширенішими в м'якій робототехніці [17]. Головною проблемою FEA є обмеження їх мобільності через необхідність зовнішнього джерела стисненого повітря та їх герметичність, яка може вивести привод з ладу. На рисунку 1.2 (в та г) зображені приклади м'яких захоплень методу FEA.

Всі запропоновані методи мають свої плюси та мінуси, і вибір головним чиним базується на конкретних потребах у застосуванні. Технології SMA, SMP та DEA, все ще знаходяться у стадії розвитку і мало де застосовуються на практиці, за межами лабораторії. А ось FEA вже досить давно використовується в сільськогосподарській та харчовій галузі, завдяки своїй точності та в легко пристосованості до різноманітних об'єктів.



а) схват DEMES технології DEA [14];

б) схват технології DEA [15];

в) схват технології FEA [10];

г) схват технології FEA [17]

Рисунок 1.2 – М'які схвати технології DEA та FEA

1.2 Топологія м'яких захоплень методу FEA

Одним з головних аспектів успішного застосування технології FEA є топологія захоплень. Топологія визначає форму, розмір та конфігурацію приводу, що безпосередньо впливає на його функціональність та продуктивність.

Топологія FEA, яка базується на основі тиску є складною, оскільки адаптивна топологія вимагає зміни пневматичного навантаження на кожному

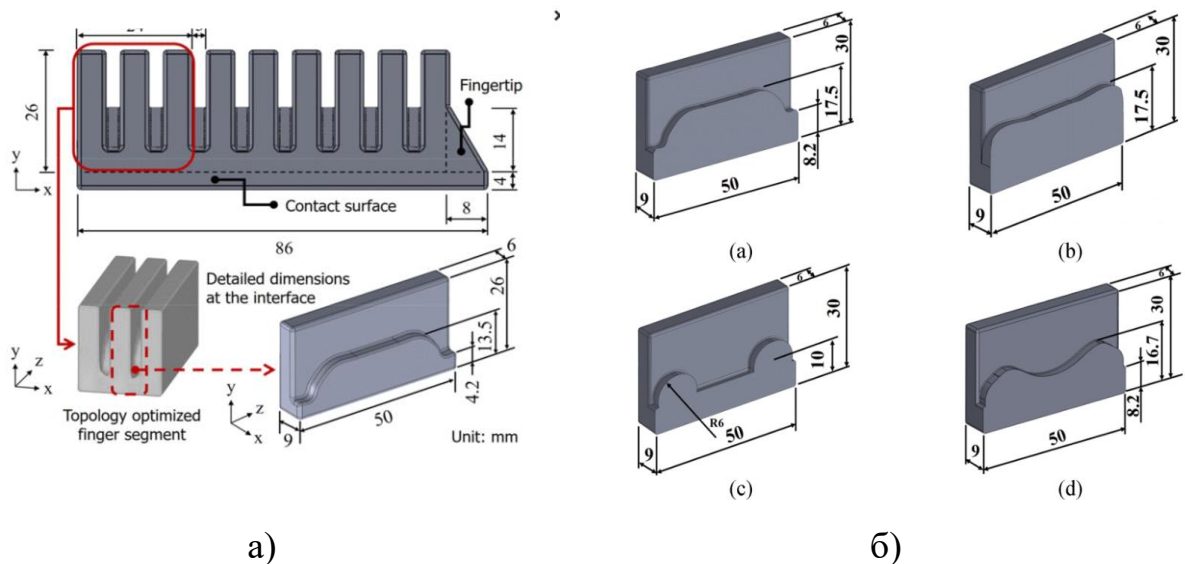
етапі оптимізації. Розмір, форма, кількість камер м'якого схоплювача має істотний вплив на кут вигину та вихідну силу акuatora.

Найбільш використовуваною конструкцією м'яких пневматичних приводів (SPA), як писалось раніше є PneuNet. Топологія грає важливу роль для приводів PneuNet, оскільки вона визначає структуру та зв'язки між пневматичними компонентами цих систем. Архітектура дозволяє визначити, як повітря та тиск розподіляються в системі, як відбуваються рухи та деформації, і як кожен компонент взаємодіє з іншими. Вірно підібрана топологія дозволяє досягти оптимального рівноваги між продуктивністю, точністю та надійністю приводу PneuNet, що є важливими факторами в КЕ.

При розробці приводу враховуються різноманітні параметри, які впливають на тиск всередині приводу, до них відносять: матеріали КЕ, довжина сегмента, висота камери, ширина та товщина бокових та поперечних стінок, міжцентрова відстань, і загальна кількість камер.

У статті [18] автор провела аналіз, в якому дослідила як геометричні параметри схвату впливають на тиск, який необхідно задіяти для згинання на необхідний кут. Результати показали, що для напівкруглої форми поперечного перерізу схвату з більшим радіусом необхідно подати менше тиску, для потрібного куту вигону та для досягнення високих сил. Також можна сказати, що зміна довжини приводів впливає на тиск, необхідний для досягнення однакового ступеня вигину, проте це не впливає на силу, яка подається на КЕ при заданому тиску, збільшення товщини стінки також призводить до збільшення необхідного тиску для досягнення певного ступеня вигину.

За допомогою методу оптимізації топології, автори статті [19] розробили дизайн SPA, для збільшення максимальної навантажувальної здатності, при цьому не втрачаючи кут вигину. Дана модель складається з трьох оптимізованих сегментів пальця, в кожній по три повітряні камери, структури кінчика пальця та структури контактної поверхні (рис. 1.3 (a)).



а) розроблений привод зі статті [19];

б) оптимізований дизайн [19]

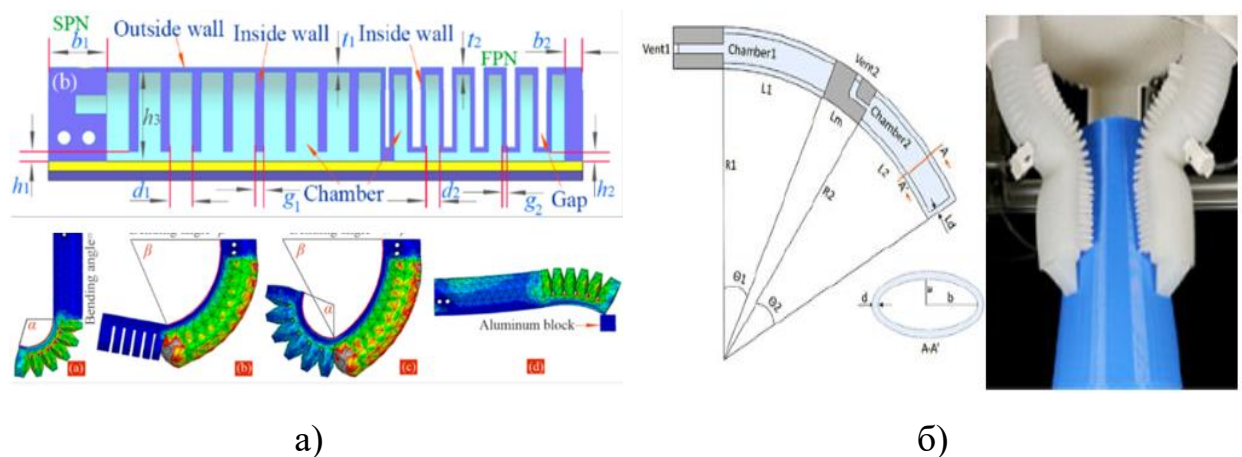
Рисунок 1.3 – Конструктивна модель SPA [19]

Використовуючи програму Ansys автори протестували ефективність конструкції за допомогою аналізу кінцевих елементів. Результати свідчать, що розроблений пневматичний привод здатний забезпечувати адекватну деформацію вигину при низьких рівнях тиску в подачі. Розроблений привод досягав вихідної сили в 9,45 Н при вхідному тиску 80 кПа, що вдвічі перевищує вихідну силу комерційних приводів.

Також було розроблено три додаткові конструкції акuatorу, які зображені на рисунку 1.3 (б), з метою порівняння максимального куту вигину при різних рівнях подачі тиску. Ці конструкції відрізняються кількістю матеріалу в структурі інтерфейсу: в (б) він більший, в (с) – навпаки, менший, і останній збудований відповідно до структури комерційного SPA. З проведених результатів з'ясовано, що перша конструкція має найбільший прогин. Тобто можна зробити висновок, що структура інтерфейсу грає важливу роль для куту вигону приводу.

Для збільшення вихідної сили зараз почали впроваджувати пневматичні приводи з двома мережами, як це продемонстровано у статті [16]. Запропонований привод складається з двох пневматичних мереж, які з'єднані

послідовно через два нерозтяжні шари, розділені нерозтяжним папером. Перший модуль використовує повільну PneuNet (SPN), а другий модуль використовує швидку PneuNet (FPN). Вони мають різну будову камер (рис. 1.4 (а)), завдяки цьому модулі деформуються по різному при збільшенні тиску. Розширюваний шар SPN має серію камер, з'єднаних одним каналом. При розтягуванні SPN головним чином розширює зовнішню стінку, оскільки вона тонша, ніж внутрішні стінки між камерами. Якщо казати про розтяжний шар FPN, то він має проміжки між камерами. Завдяки меншій товщині внутрішньої стінки, внутрішню стінку легше розширювати під впливом тиску, що призводить до стискання розширених внутрішніх стінок одна в одну. Завдяки такій будові акuator є більш швидший та гнучкіший.



а) м'який привод зі статті [17];

б) привод статті [8]

Рисунок 1.4 – Приводи з двома пневматичними мережами

Автори провели декілька аналізів для дослідження, як кількість та висота камер впливає на роботу приводу. За отриманими результатами виявлено, що збільшення кута стає менш значущим, коли кількість камер перевищує 9. Це свідчить про тенденцію до зменшення впливу кількості камер на зміну кута. Модуль FPN має подібні результати, але вплив числа камер на кут вигину не слабшає зі збільшенням числа камер. Висота камер впливає на

їх об'єм, тому при збільшенні висоти можна покращити вихідну силу та кут вигину, але це зменшує жорсткість схоплювача. Можна сказати, що збільшення висоти камери призводить до збільшення як кута згинання, так і вихідної сили. Це підтверджує, що зміна висоти камери сприяє покращенню згинальної та вихідної сил. Також важливо відзначити, що вплив висоти камери на силу наконечника у модулі FPN є незначним. Провівши тестування вихідної сили, можна прийти до висновку, що вихідна сила створеного приводу зросла на 70% у порівнянні з традиційними акuatorами.

Привод з двома пневматичними системами, також представлено у статті [8]. Автори презентували м'який робот-схват із трьома пальцями, що складається з трикамерних м'яких пневматичних пальців еліпсоподібної форми та нової конструкції долоні з податливою камерою, яка має здатність до адаптації і надійну безпеку схоплення (рис. 1.4 (б)). Для покращення надійності хапання схват має текстурну поверхню, яка дозволяє утримувати гладку поверхню. Схват складається з аксіально вирівняних секцій, кожна з яких приводиться в дію незалежно одна від одної. Для роботи системи було проведено тестування, яке продемонструвало, що м'який Схват може досягти на практиці сили схоплення в 40 Н при тиску спрацьовування нижче 100 кПа.

Недоліком даних конструкцій є більш складний спосіб керування схоплення, через те, що різний тиск подається до кожної камери окремо.

Компанія SoftGripping Co розробила новий комерційний привод PneuNet для схоплення об'єктів різної форми та ваги. Топологія акuatorа відрізняється від традиційних схоплювачів, розроблений привод має 7 пневматичних камер зі зменшенням висоти кожної камери [20]. Даний схват можна побачити на рисунку 1.5. Цей KE використовують у харчовій промисловості для фасування продуктів. Завдяки його архітектурі він легко може підіймати різні овочі і фрукти, як по одинці та і в сітці, а максимальна вага схоплюваного об'єкта до 5 кг.

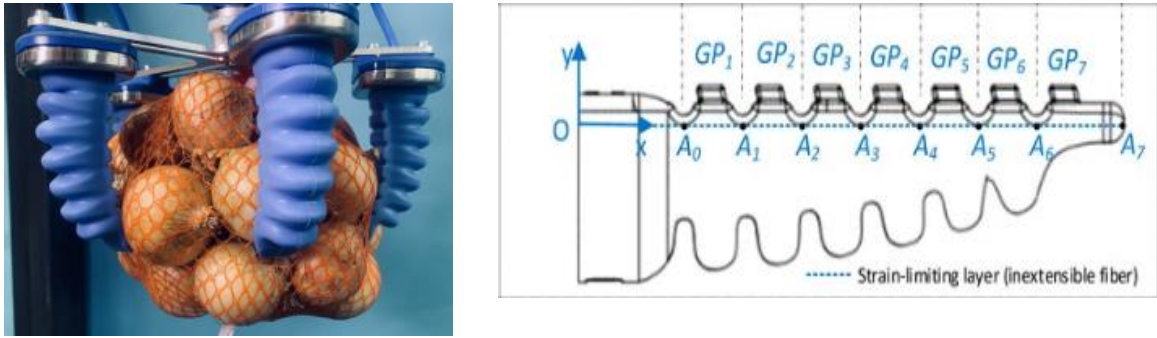


Рисунок 1.5 – Комерційний привод SoftGripping [20]-[21]

Зазвичай всі схвати використовуються у поєднанні двох або більше приводів для підняття об'єктів, оскільки така конфігурація надає їм більшу гнучкість і можливість спільної координації, що полегшує схоплення та підняття об'єктів різних форм та розмірів.

Для можливості координації схвату необхідно розуміти поведінку приводу при вигоні. Для опису залежності кривизни приводу k_p від вхідного тиску P була сформована математична модель [21]:

$$k_p = \frac{6H^2c}{Et^3x} \cdot P = DP, \quad (1.1)$$

де H це певна константа, яка впливає на кривизну акuatora, вона виражає геометричні чи фізичні властивості системи. Константа c це зазвичай будь-який фізичний чи геометричний параметр, який може впливати на характеристику приводу. Модуль пружності E це модуль Юнга матеріалу, оскільки кожний матеріал має свою характеристику жорсткості, які по-різному змінюються в залежності від вхідного тиску. t – це товщина матеріалу, а x це параметр, який може впливати на властивість системи. Константа D відображає коефіцієнт зв'язку між кривизною приводу та вихідним тиском, вона залежить від геометрії камер і властивостей матеріалу.

Для описує залежність кута згину приводу PneuNets від вхідного тиску P , враховуючи різні фізичні та геометричні параметри приводу та матеріалу, з якого він виготовлений запропоноване таке стаціонарне співвідношення [21]:

$$\theta(P) = \frac{L_t A^2 e}{\frac{A_w E^2 I}{C}} p^2 + \frac{L_t A e}{\frac{EI}{D}} p = CP^2 + DP, \quad (1.2)$$

де L_t – довжина приводу;

A – площа поперечного перерізу приводу;

e – відстань від нейтральної лінії до зовнішньої стінки приводу;

A_w – площа поперечного перерізу стінок приводу;

I – момент інерції поперечного перерізу приводу.

Константи C і D – коефіцієнти, які вводяться для врахування різних параметрів і взаємозв'язків в рівнянні.

Використання цих двох формул дозволяє моделювати та розуміти, як привод PneuNets вигинається та як змінюється його кут згину в залежності від вхідного тиску та інших параметрів.

1.3 Матеріали для виготовлення м'яких захоплень

Точність та надійність схватів FEA сильно залежать від того, наскільки правильно вибрані та описані властивості матеріалів, з яких зроблені м'які захоплювачі. Гнучкі матеріали мають вирішальне значення для функціонування м'яких приводів. Їх характеристики, такі як максимальна пружна деформація, жорсткість і в'язкість, визначають процес захоплення, створювану силу та час реакції. Тому вагомий акцент при розробці м'яких захоплень із розширеними можливостями приділяється вибору та розробці матеріалів для досягнення оптимальних характеристик і результатів.

Силіконові каучуки є домінуючим матеріалом, які використовуються в м'яких роботизованих системах, завдяки їх видатним еластичним властивостям, легкості в обробці, доступності та можливості швидкого та простого виготовлення. Даний матеріал має змогу забезпечити високе співвідношення потужності до ваги, потребують невеликого вихідного повітряного тиску, створюючи при цьому значні деформації. Крім того, їх можна легко формувати в різноманітні конфігурації, що робить їх ідеальними для створення складних м'яких приводів. Важливі характеристики, такі як час реакції, жорсткість і величина створеної сили, залежать від конкретного типу силікону, який використовується [16].

Найбільш широко використовуваними силіконовими гумами в спільноті м'якої робототехніки є Ecoflex, DragonSkin, Smooth-Sil і Elastosil M4601. В кожного матеріала є шкала твердості, яка представлена на рисунку 1.6 [22].

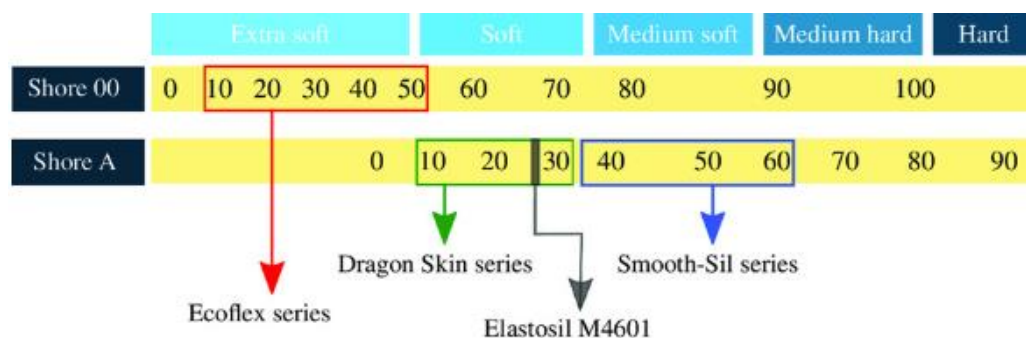


Рисунок 1.6 – Шкала твердості матеріалів [22]

Для перевірки матеріалів автори статті [23] проводять експерименти з одноосьовим розтягненням для оцінки їхньої реакції на руйнування та визначення модуль пружності. Одноосьове розтягнення вимірює зміну довжини матеріалу під дією зовнішніх сил. Реакція експерименту показує, як матеріал веде себе під впливом сили до того моменту, коли відбувається його руйнування чи пошкодження. Результати випробування для найпопулярніших силіконів можна побачити на рисунку 1.7.

У таблиці 1.1 представлені механічні характеристики поширених видів силіконів, які використовуються в системах м'яких схватів.

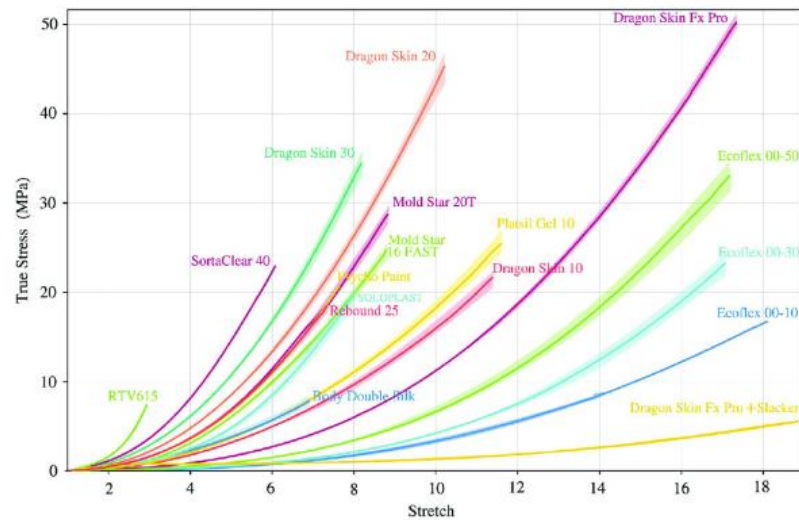


Рисунок 1.7 – Результати випробувань [23]

Таблиця 1.1 – Характеристики силіконів [16]

Матеріал	Твердість за Шором	100% модуль (psi)	Міцність на розрив (psi)	Подовження при розриві (%)	В'язкість (ср)	Час затвердіння (хв)
1	2	3	4	5	6	7
EcoFlex 00-10	00-10	8	120	800	14000	240
EcoFlex 00-30	00-30	10	200	900	3000	240
EcoFlex 00-50	00-50	12	315	980	8000	180
DragonSkin n 10	10 A	22	475	1000	23000	30-300
DragonSkin n 20	20 A	49	550	620	20000	240

Продовження таблиці 1.1

1	2	3	4	5	6	7
DragonSkin n 30	30 A	86	500	364	20000	960
Elastosil M4601	28 A	75	943	700	10000	720
Sylgard 184	43 A	—	980	100	5100	2880
Smooth- Sil 950	50 A	272	725	320	35000	1080

EcoFlex це силікон компанії Smooth-On, який часто використовується у м'якій робототехніці та який має різні значення твердості за шкалою Шора, які варіюються в діапазоні від 00-10 до 00-50. Всі необхідні механічні властивості можна побачити в таблиці 1.1. Затверділа гума має надзвичайно м'які, але водночас дуже міцні властивості і може бути розтягнута до значно більших розмірів без ризику розривів. Крім того, вона легко повертається до своєї початкової форми без будь-яких спотворень [24]. Ця особливість робить їх вельми корисними у м'яких застосуваннях. Ecoflex володіє меншою жорсткістю в порівнянні з іншими еластомерами, що призводить до того, що для досягнення бажаних згинів або розтягувань в м'яких приводах потрібні менші подачі вхідного тиску.

Силікон DragonSkin також випускається компанією Smooth-On. Даний силікон доступний з різним значенням твердості, як видно з таблиці 1.1. На відміну від EcoFlex, матеріали Dragon Skins мають вищий модуль Юнга і для їх спрацювання як схвати SFA потрібний більший вхідний тиск для спрацювання. Однак їх вища твердість дозволяє застосовувати більше сили при активації. Гума так само міцна і має стійкість до розривів форми [25]. У дослідженні, зазначеному в статті [16], автори використовували коефіцієнт співвідношення, який дозволив порівняти властивості цих матеріалів в

контексті їх жорсткості та вихідної сили. Цей коефіцієнт обчислювався шляхом ділення радіуса кривизни на початкову довжину. Для досягнення мінімального відношення 0,092 для Dragon Skin 10 потрібен був тиск у 180 кПа, в той час як для Dragon Skin 20 мінімальний коефіцієнт становив не менше 0,199 і вимагав тиску 380 кПа через більшу твердість матеріалу. Максимальна сила привода зростала зі збільшенням жорсткості матеріалу. Для Dragon Skin 10 і Dragon Skin 20 коефіцієнт вихідної сили досягав значень 8,82 при 180 кПа та 9,96 при 380 кПа відповідно. У майже всіх наукових статтях, які я проаналізувала на Google Scholar, для виготовлення м'яких захоплень використовують силікон Dragon Skin 30.

Elastosil M4601 виготовляється компанією Wacker Chemical. Твердість та модуль Юнга гуми подібні на матеріал Dragon Skin 30, однак на відміну від нього він має низьку оптичну прозорість, але на м'які схвати для РМ це не є дуже важливим показником. Висока жорсткість даного матеріалу дозволила йому стати гарним варіантом.

Також популярною силіконом є Sylgard 184, компанії Dow Corning. Sylgard 184 має декілька важливих характеристик, включаючи оптичну прозорість, низьку в'язкість, помірну міцність при розриві та можливість герметизації шляхом з'єднання оброблених плазмою поверхонь. В'язкість цього силікону становить 3500 сП, а модуль Юнга – 3,9 МПа. Високий модуль Юнга матеріалу призводить до його жорсткості і робить його не найкращим вибором для застосувань SFA, оскільки для його функціонування потрібний високий тиск, в порівнянні з EcoFlex. Проте, у поєднанні з іншими методами активації, такими як DEA, цей матеріал може бути корисним, особливо в м'яких схватах [16].

Силікон Smooth-Sil, який також є продуктом Smooth-On, є одним із видів силіконових каучуків, який широко використовується для створення м'яких захоплень. Він володіє дуже гнучкими та еластичними властивостями, які дозволяють створювати м'які та придатні для захоплення об'єктів структури. Силікон Smooth-Sil зазвичай відзначається низькою твердістю за Шором, що

робить його дуже податливим та пружним. Це означає, що він може розтягуватися та пружно адаптуватися до різних форм об'єктів, які необхідно схопити. Він також має високий коефіцієнт подовження при розриві, що робить його відмінним вибором для створення м'яких захоплень, які можуть розтягуватися без розривів [26].

Також м'які захоплювачі можуть виготовлятися з матеріалів для 3D-принтерів. Наприклад в статті [27] автор для створення м'якого приводу використовує матеріал TPU. Матеріал TPU відрізняється гнучкістю і високою стійкістю до зносу, дозволяючи йому вигнутися та розтягнутися без руйнування. TPU також має високий відсоток подовження при розриві та добру адгезію до інших матеріалів, що робить його ідеальним для створення м'яких механізмів та приводів, які вимагають гнучкості і міцності. Для створення м'яких КЕ також використовують термопластичний еластомер.

Іноді для покращення механічних властивостей м'яких приводів вище перелічених силікони змішують, або додають армовані тканини, щоб забезпечити більшу міцність і стійкість.

1.4 Постановка завдань дослідження

Виходячи з проведеного аналізу можна зробити висновок, що РМ з м'яким захоплювачами є актуальною темою на сьогоднішній день. Актуальність даної теми обумовлена тим, що м'які схвати надають роботам гнучкість та адаптивність у взаємодії з різними об'єктами, дозволяючи їм легко маніпулювати предметами різних форм та розмірів, також вони є безпечними для людей і вони зменшують ризик пошкодження крихких або вразливих предметів, що дозволяє розширити їх область використання в різних сферах.

Мета роботи – розробка топології м'якого кінцевого ефектору для підвищення ефективності захоплення об'єктів різної геометрії та крихкості. Об'єкт розробки – процес вибору та проектування топології м'якого захвату

для захоплення об'єктів. Предмет розробки – 3D моделі м'яких приводів. Для поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

- вибрати середовище моделювання топології м'яких приводів;
- змодельовати топології м'яких схватів;
- розробити кінетичну модель м'яких приводів;
- вибрати середовище проведення експерименту моделювання;
- налаштувати характеристики для проведення симуляції;
- провести експеримент м'яких приводів методом скінченних елементів;
- змодельовати матриці м'яких сватів;
- створити макет м'яких приводів;
- зібрати кінцевий ефектор з м'яким схватом.

2 РОЗРОБКА ТОПОЛОГІЇ М'ЯКОГО ПРИВОДУ

2.1 Вибір середовища моделювання м'якого приводу

Зараз вирішення завдань, пов'язаних з розробкою м'яких приводів, вимагає не тільки кращого розуміння механічних аспектів, але й високої точності в їхньому чисельному моделюванні. Вибір відповідного середовища моделювання стає ключовим етапом у цьому процесі, оскільки він визначає якість аналізу, швидкість розробки та можливості дослідження м'яких приводів.

Для створення м'яких схватів було використано середовище розробки Autodesk Fusion 360. Autodesk Fusion 360 – це повнофункціональний CAD/CAM інструменти, який об'єднує всі сучасні можливості 3D-моделювання. Ця програма вражає своєю доступністю та низькими вимогами до характеристик комп'ютера. За допомогою Fusion 360 можна не лише провести дизайнерське проектування, але й легко організувати складальну конструкцію, а також підготувати програму обробки для ЧПУ [28]. Дане програмне забезпечення використовує пряме, поверхнєве, параметричне, сітчасте або довільне моделювання.

Програмне забезпечення дозволяє виконувати різноманітні функції в одному пакеті, що є досить важливим фактором. Не потрібно використовувати Rhino для моделювання або SolidWorks для механічного проектування. За допомогою цього програмного забезпечення можна виконувати всі ці завдання в одному файлі, дозволяючи всім учасникам працювати над проектом одночасно.

Autodesk Fusion 360 надає можливість імпортувати понад 50 різних форматів CAD, включаючи SLDPRT, SAT, IGES, STEP, STL і OBJ. Під час імпорту програма збереже оригінальний файл і автоматично створить його

власний комплексний формат F3D. Користувачі можуть експортувати файли на локальний комп'ютер або в хмару. Локальні опції експорту включають формати IGES, SAT, SMT, STEP, F3D і DXF. Хмарний експорт розширюється на формати, такі як Inventor, IGES, SAT, SMT, STEP, DWG, DXF, STL, FBX і F3D. Також слід зазначити, що Fusion зберігає всі збережені версії 3D моделей, які можна легко дістати з хмари.

Fusion 360 відзначається численними перевагами для моделювання топології м'яких схватів. Зокрема, програма об'єднує в собі різні функціональності CAD, CAM та CAE, що дозволяє ефективно виконувати завдання з проектування, аналізу та обробки в одному інтегрованому середовищі. Fusion 360 підтримує моделювання гнучких тіл, враховуючи зміну форм та геометрії під впливом зовнішніх сил. Зручний інтерфейс, підтримка параметричного моделювання, а також можливість ефективно працювати з багатокомпонентними системами роблять Fusion 360 відмінним вибором для проектування та оптимізації м'яких схватів на сьогоднішній день.

2.2 Моделювання топології м'яких схватів

В першому розділі було проаналізовано різні топології м'яких приводів для схвату об'єктів різної форми та крихкості. З аналізу було виявлено всі необхідні параметри для побудови топології м'якого акuatorу. Отже моделювання архітектури м'якого схоплювача включає такі параметри: кількість камер, довжина, ширина та висота схвату, висота, ширина та довжина камер, товщина стінок, довжина та висота з'єднання. Всі ці параметри впливають на кут вигину та вхідну силу яку треба задіяти. Чим більше матеріалу в м'якому приводі, тим більше вхідної сили треба подати для необхідного згинання, але також слід враховувати, що чим менше матеріалу, тим менш він жорсткий.

Було змодельовано чотири схоплювачі, які відрізняються між собою за різними характеристиками.

Перший змодельований привод зображено на рисунку 2.1.

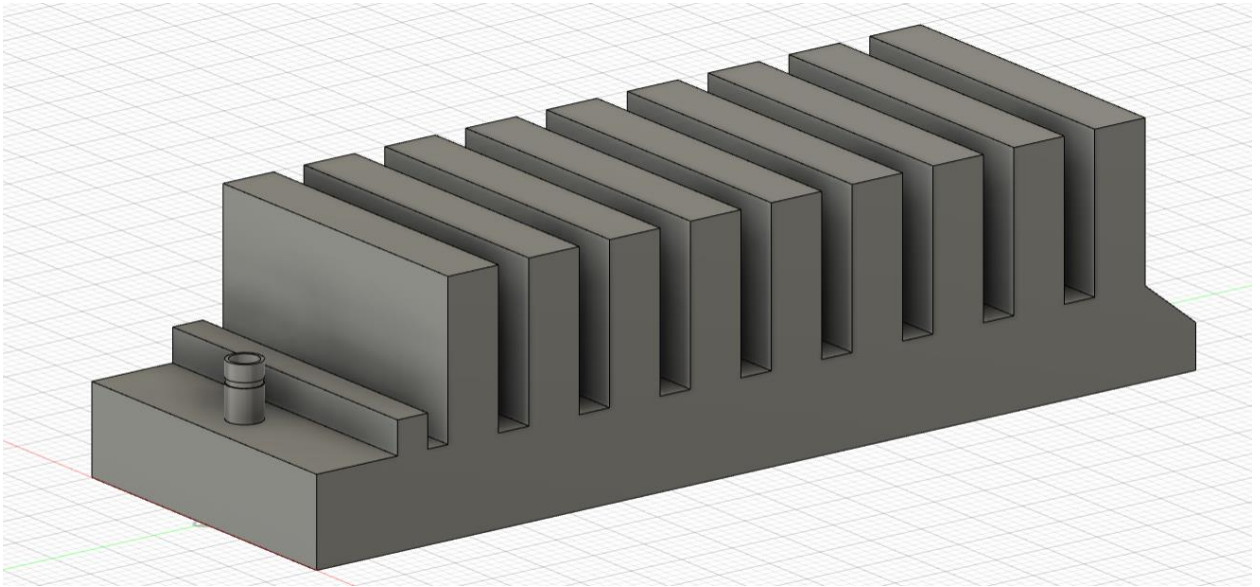


Рисунок 2.1 – Дизайн першого м'якого схвату

Акуатор складається з дев'яти однакових ланок, в середині яких знаходяться повітряні камери. Його довжина становить – 87 мм, а ширина – 30 мм. Всі габаритні характеристики схоплювача представлені на рисунку 2.2, де зображено розроблений скетч з програми Fusion 360, також усі встановлені параметри зібрані в таблиці 2.1.

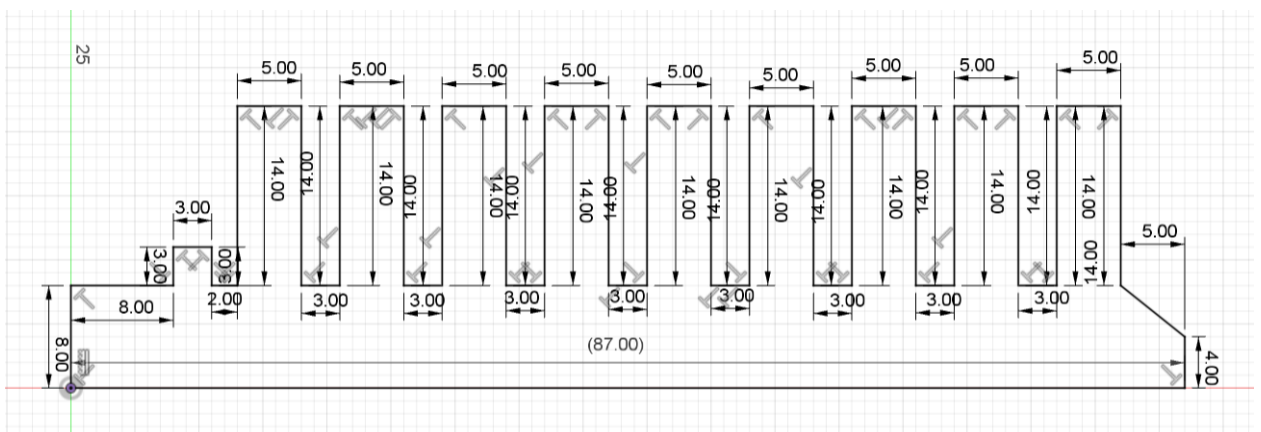


Рисунок 2.2 – Скетч дизайну 1 схвату

Всередині моделі за допомогою інструмента «Shell» та інших допоміжних інструментів було створено повітряну камеру привода, в яку в

майбутньому буде йти подача позитивного тиска. На рисунку 2.3 з використанням Section Analysis зображено схват в перерізі.

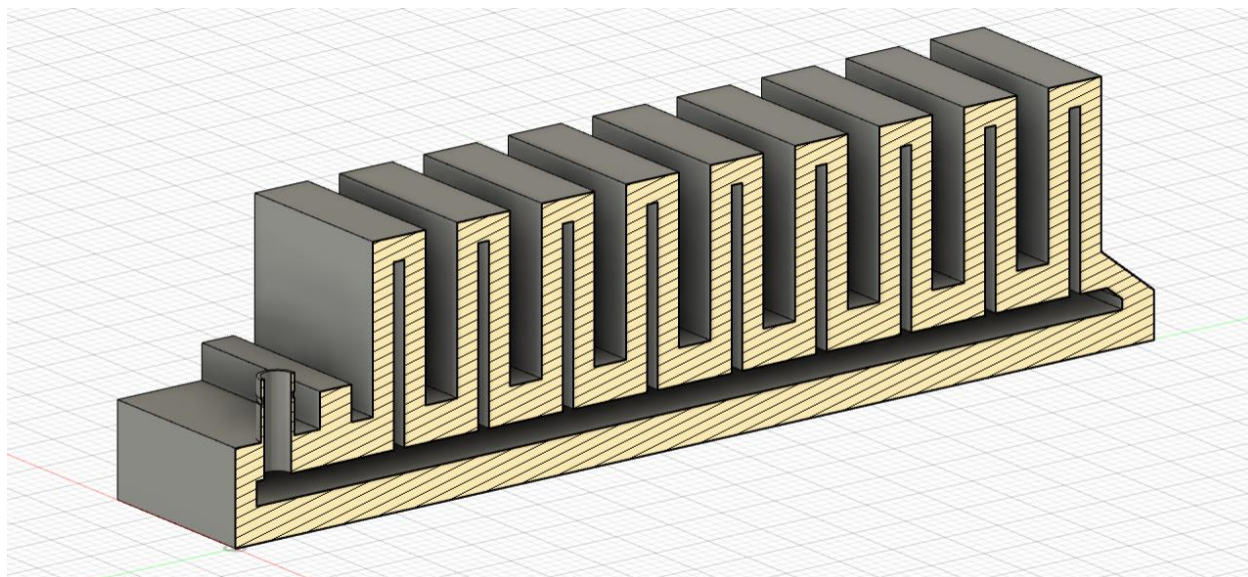


Рисунок 2.3 – Схват 1 в перерізі

При створенні товщини стінок внутрішньої камери враховувались такі фактори, як стійкість до деформації, бо якщо стінки будуть дуже тонкими, вони не витримають робочий тиск і порвуться, що призведе до недієздатності привода.

На рисунку 2.1 можна побачити, що на початку привиду є циліндричний виступ призначений для подачі повітря у систему. Даний циліндр має висоту 5 мм та діаметр 3,5 мм. Його діаметр відповідає діаметру інфузійної трубки, через яку буде здійснюватися подача повітря. Слідом за циліндром розташований прямокутний виступ з висотою 3 мм. Він призначена для забезпечення надійного закріплення та стабілізації кріплення приводу до маніпулятора. Даний виступ не має внутрішньої камери, тому це забезпечує ізоляцію від зовнішніх впливів тиску. Загалом вся частина кріплення має довжину 13 мм. Дане кріплення застосовується для всіх розроблених топологій акuatorів.

Дизайн другого приводу представлений на рисунку 2.4.

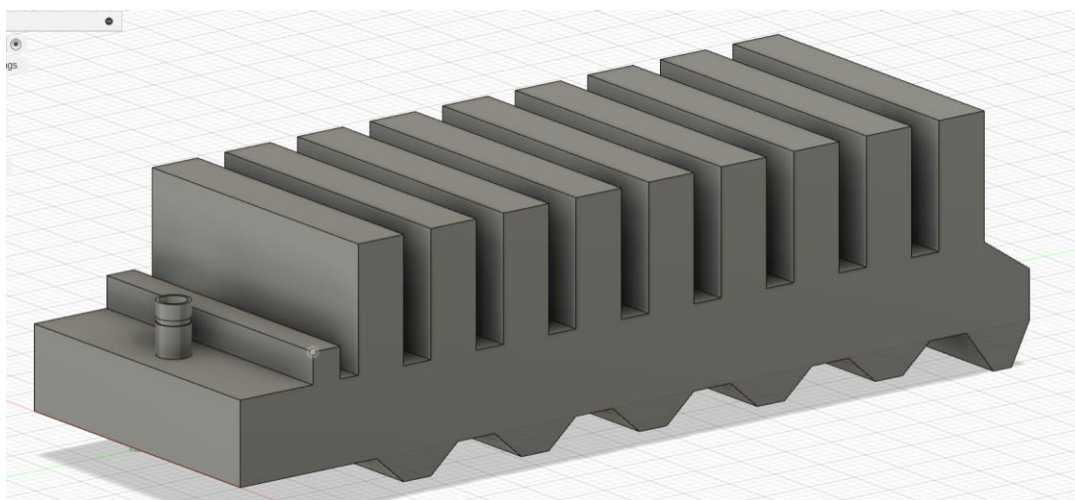


Рисунок 2.4 – Модель другого схвату

Так само як і перший він має 9 камер та таку ж саму довжину 87 мм, але висота вже відрізняється. Загалом висота схвату становить 20 мм, але на нижній частині привода розташовано п'ять додаткових зубців. Дані сегменти додають схвату більшої чутливості при взаємодії з об'єктом, оскільки вони дозволяють створювати більше точкових контактів з предметом. Також даний дизайн додає більшої стабільності акuatorу. На рисунку 2.5 представлено креслення другого схвату.

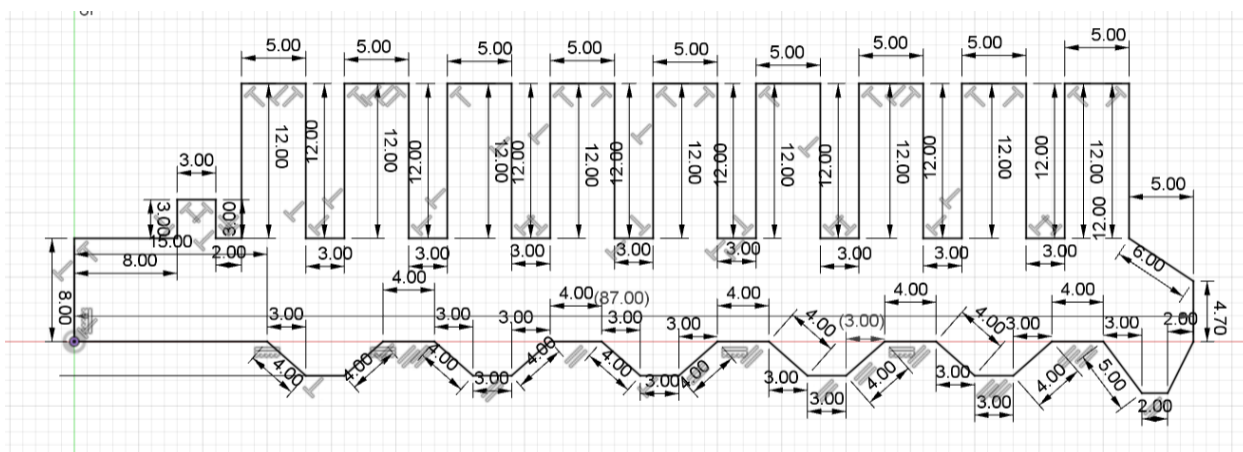


Рисунок 2.5 – Скетч для другого схвату

На рисунку 2.6 зображено даний схват в розрізі.

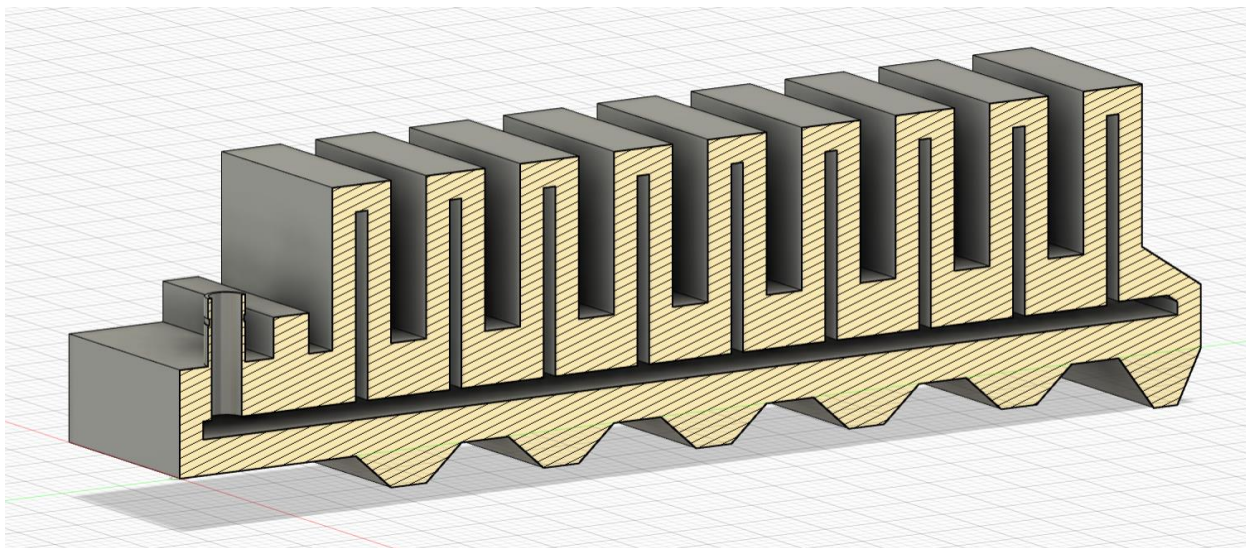


Рисунок 2.6 – Другий схват в розрізі

З рисунку видно, що сегментовані зубці повністю складаються з силікону і не мають внутрішніх камер. Також в кінці схвату є шостий зубець, який при невеликому тиску діє як ніготь і ним може підхоплювати об'єкти. Висота з'єднань становить 4 мм, що впливає на внутрішній об'єм камери і відповідно на розширення при подачі вхідного тиску.

Наступний третій KE зображено на рисунку 2.7.

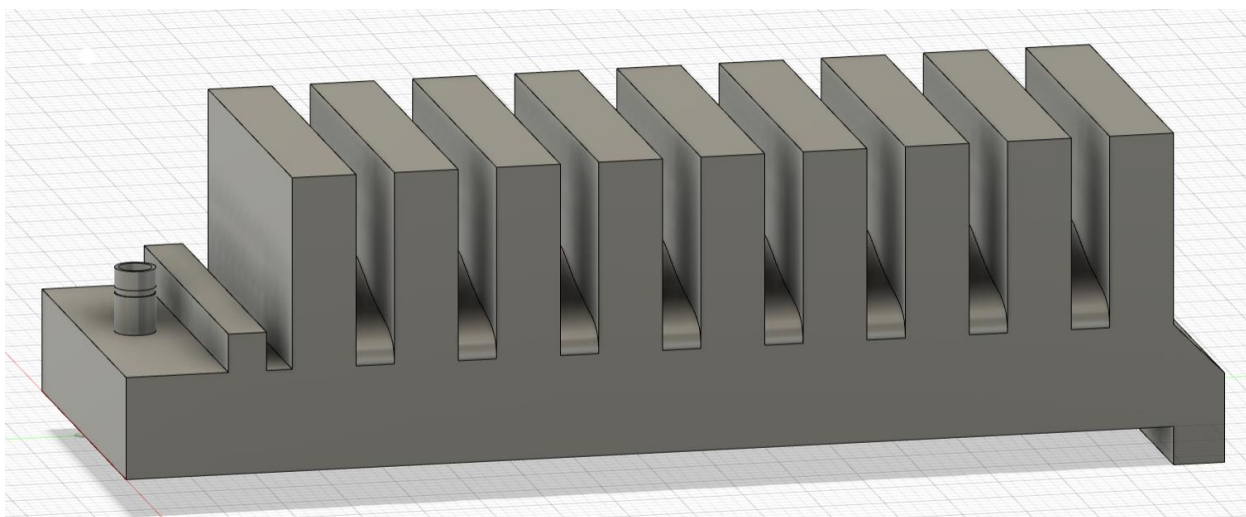


Рисунок 2.7 – Дизайн третього схвату

Архітектура даного схвату має довжину 86 мм та висоту 23 мм. Висота самих камер становить 15 мм, що є найвищою серед розроблених топологій схватів. На рисунку 2.8 представлено скетч даної топології.

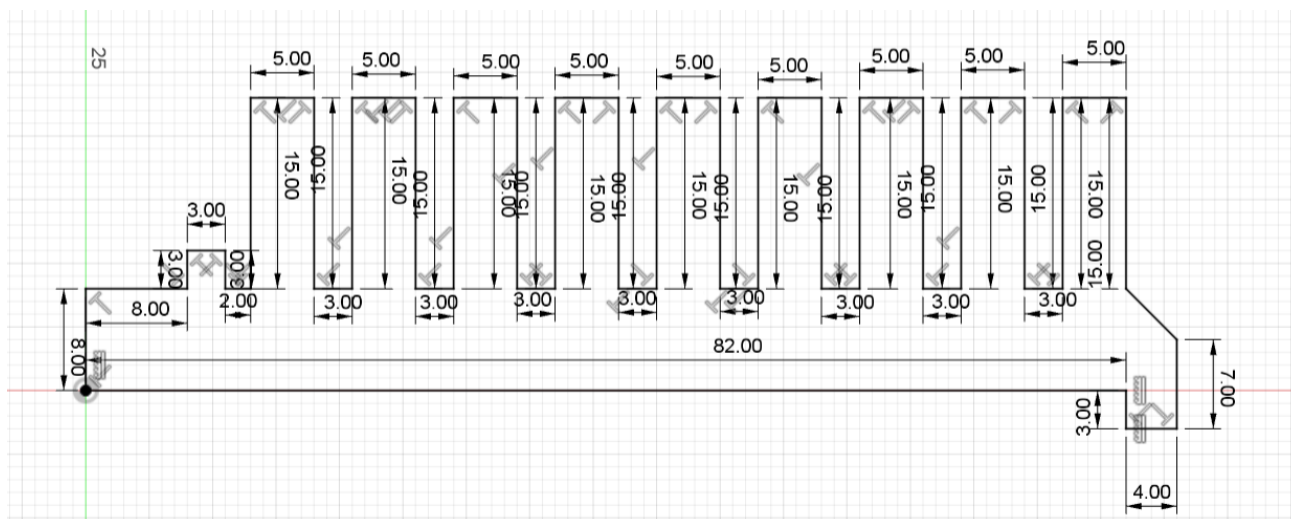


Рисунок 2.8 – Скетч топології третього схоплювача

Даний схват відрізняється від інших змодельованих моделей, тим що має між з'єднаннями камер додатковий структурний інтерфейс, який можна побачити на рисунку 2.9.

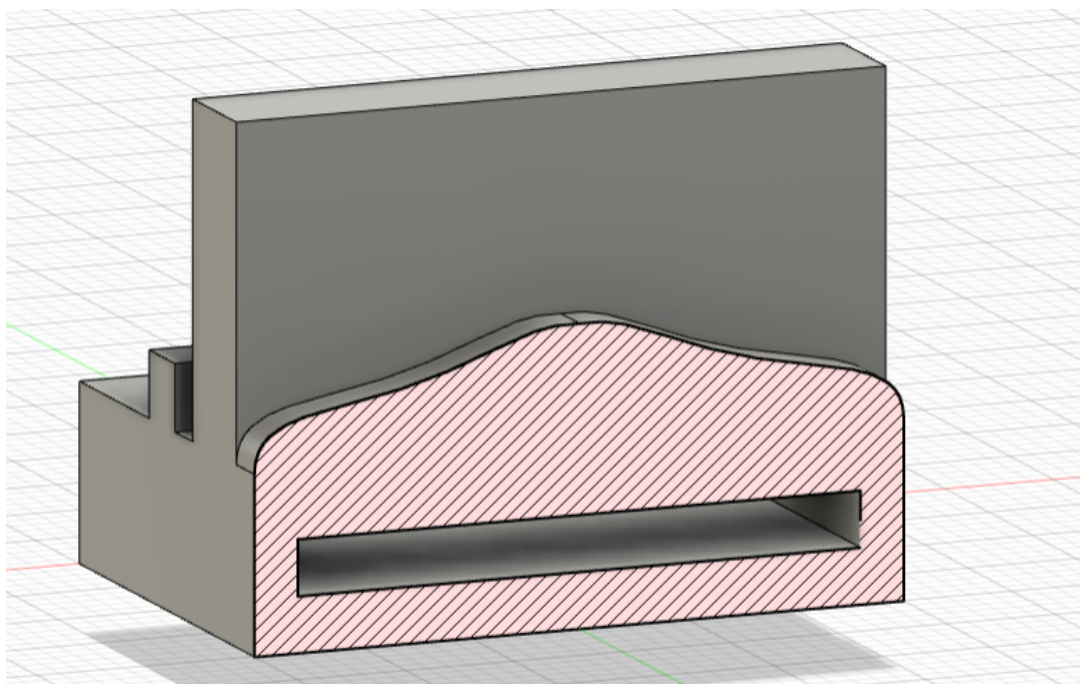


Рисунок 2.9 – Дизайн структурного інтерфейсу

Висота даного інтерфейсу становить 5,3 мм з низу з'єднання між камерами. Даний дизайн потребує більшості кількості матеріал, для створення такого приводу, що впливає на кут вигину та задіяний тиск для його згинання. Тоді виходить що висота між верхівкою камери та найвищою точкою з'єднувального сегменту становить 9,7 мм. Саме тому цей дизайн має найвищу висоту, бо якщо висота буде нижчою за 15 мм, то при деформацію, а саме, при розширенні камер, з'явиться сильний тиск однієї стінки камери на іншу, що призведе до меншого куту вигину та до ушкодження самого приводу.

На рисунку 2.10 представлено даний акuator в розрізі.

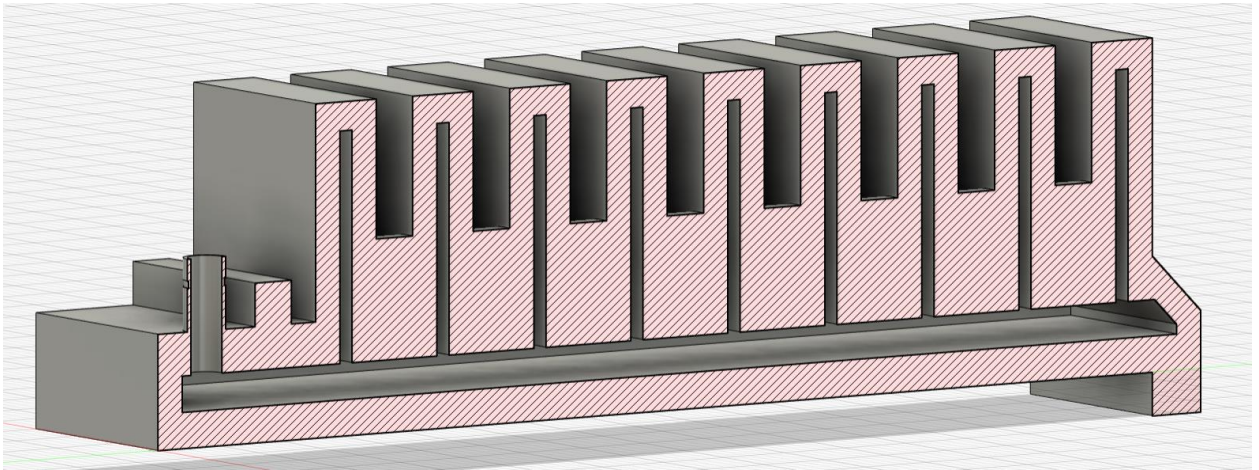


Рисунок 2.10 – Третя модель в розрізі

Через такий інтерфейс висота внутрішніх з'єднань становить 8,3 мм, а ширина внутрішніх стінок становить 7 мм. Дана модель так само як і друга має на кінці схвату має зубець, який так само слугує як ніготь к об'єктам, а саме може схопити більш тонкі об'єкти та притиснути їх сильніше при невеликому входному тиску.

Четвертий розроблений дизайн має довжину 85 мм та висоту 20 мм. Верхні стінки моделі є закругленими, як можна бачити з рисунку 2.11. Закруглені стінки впливають на декілька факторів, по-перше це гнучкість та адаптація до різних форм об'єктів. По-друге завдяки закругленим стінкам тиск

всередині розподіляється рівномірно по всій поверхні схвату. Також закруглені стінки дозволяють зменшити контакт та навантаження між зовнішніми стінками при подачі тиску.

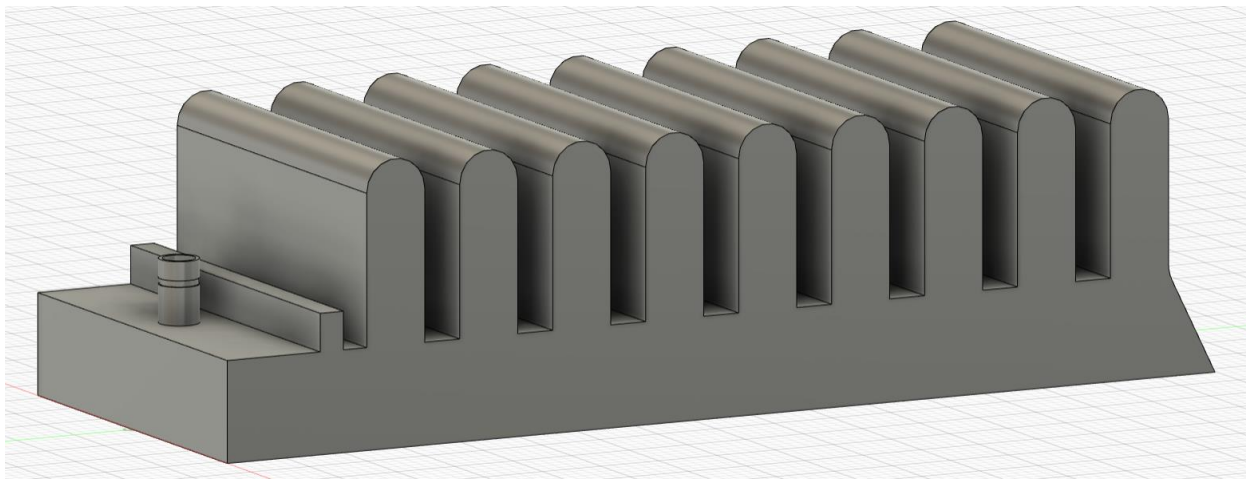


Рисунок 2.11 – Змодельована топологія четвертого захвату.

Закруглені стінки мають радіус 5 мм. На рисунку 2.12 представлено розроблений скетч для даного схоплювача.

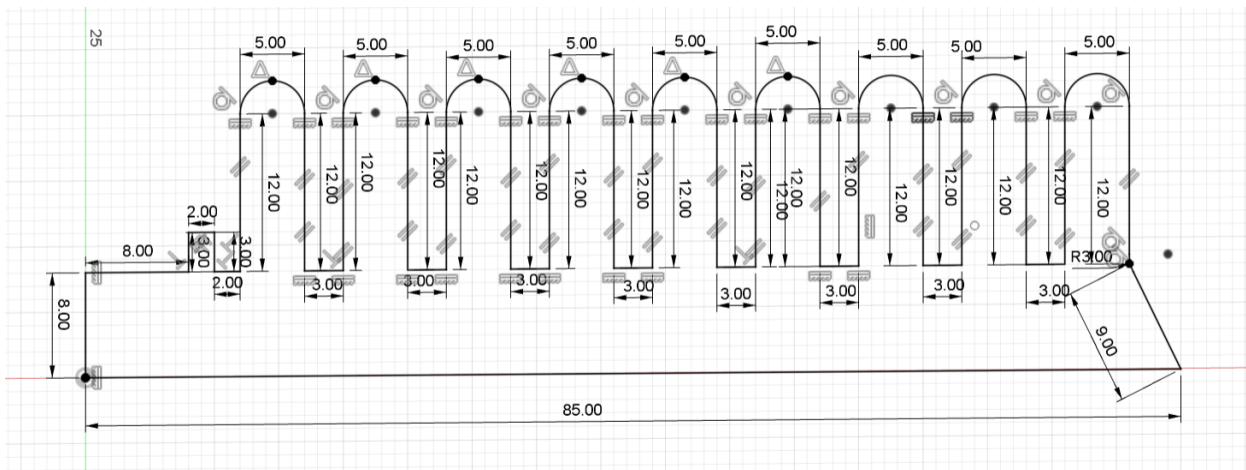


Рисунок 2.12 – Скетч четвертого схоплювача

Внутрішні нижні стінки та стінки з'єднань дорівнюють 3 мм, з усіма іншими характеристиками можна ознайомитися на у таблиці 2.1. На рисунку 2.13 зображено даний схоплювач в перерізі.

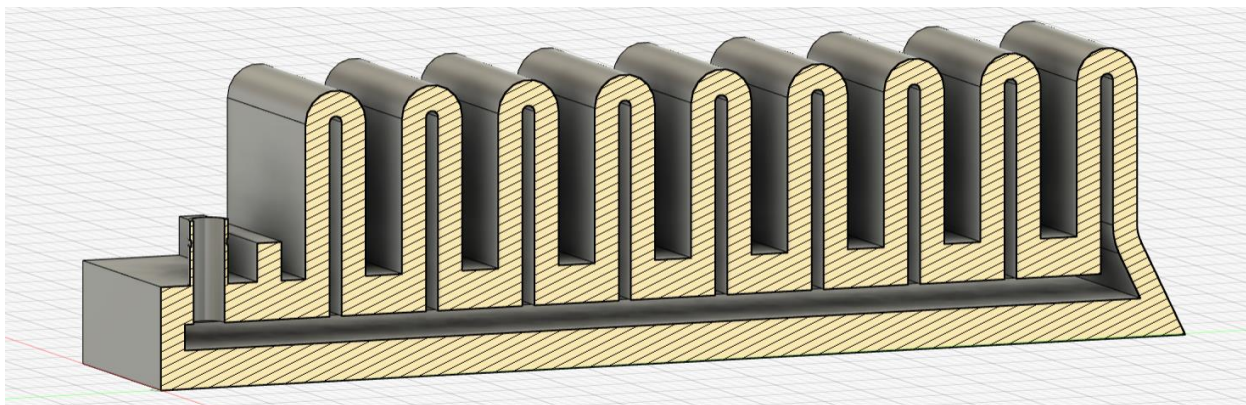


Рисунок 2.13 – Схоплювач в перерізі

Всі можливі характеристики усіх захватів представлені у таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Параметри розроблених приводів

Параметр	Привод 1	Привод 2	Привод 3	Привод 4
1	2	3	4	5
Кількість камер	9	9	9	9
Висота приводу	22 мм	20 мм	23 мм	20 мм
Ширина приводу	28 мм	28 мм	28 мм	28 мм
Довжина приводу	87 мм	87 мм	86 мм	85 мм
Висота внутрішніх камер	17 мм	15,3 мм	18,5 мм	17 мм
Ширина внутрішніх камер	14 мм	14 мм	14 мм	14 мм
Довжина внутрішніх камер	82 мм	83 мм	82 мм	80 мм
Ширина між внутрішніми стінками камери	1 мм	1 мм	1 мм	1 мм
Висота між внутрішніми стінками камери	2 мм	1,34 мм	2,5 мм	2 мм
Товщина нижніх стінок	3 мм	2,6; 5,3	2,5 мм	3 мм
Товщина бокових стінок	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм
Товщина стінок між внутрішньою та зовнішньою стінки камери	2 мм	2 мм	2 мм	2 мм

Продовження таблиці 2.1

1	2	3	4	5
Довжина з'єднань на поверхні	3 мм	3 мм	3 мм	3 мм
Довжина з'єднання між камерами	7 мм	7 мм	7 мм	7 мм
Висота стінок з'єднання	3 мм	4 мм	8,3 мм	3 мм

Обрані параметри м'якого захвату були вибрані з урахуванням можливості подальшого виготовлення прес-форми для друку та створення макету.

У таблиці 2.2 представлені параметри частини яка призначена для майбутнього закріплення к маніпулятору, котра в усіх моделях однакова.

Таблиця 2.2 – Параметри закріплюваної частини привода

Назва параметра	Значення
Довжина сегмента	13 мм
Висота сегмента	8 мм
Висота циліндра до внутрішньої камери	8 мм
Висота циліндра до основи	5 мм
Діаметр циліндра	3,5 мм
Висота закріплюваного зубця	3 мм
Ширина прямокутника	3 мм
Відстань від краю до циліндра	2,4 мм
Відстань від циліндра до закріплюваного зубця	2,4 мм
Відстань від закріплюваного зубця до камери	2 мм

Змодельовані частини закріплюваної частини, яка кріпиться до робота маніпулятора представлена в четвертому розділі.

2.3 Кінематична модель м'яких приводів

М'які схоплювачі на відміну від традиційних жорстких КЕ можуть мати безліч ступенів свободи. Ступені свободи в м'яких приводах залежать від багатьох факторів, таких як кількість гнучких елементів або камер, розташування та тип елементів, форми та розмірів гнучких вузлів, від властивостей матеріалу, та також типом кінематичних з'єднань, якщо казати про саму систему захоплення РМ.

Пневматичні мережеві багатокамерні м'які приводи виготовлені з еластичних еластомерних матеріалів, які під час деформації проявляють значну здатність до деформації та характеризується нелінійними характеристиками. Для опису властивостей деформації у гіперпружних матеріалів використовується модель Yeoh, яка враховує їхню ізотропність та нестисливість. Дана модель Yeoh була застосована для розроблення змодельованих моделей м'яких акuatorів. Крім того, проведено аналіз характеристик вигину приводу в умовах робочого середовища. Функція щільності енергії деформації виражена як [29]:

$$W = W(I_1, I_2, I_3), \quad (2.1)$$

де

$$\begin{aligned} I_1 &= \lambda_1^2 + \lambda_2^2 + \lambda_3^2, \\ I_2 &= \lambda_1^2 \lambda_2^2 + \lambda_2^2 \lambda_3^2 + \lambda_3^2 \lambda_1^2, \\ I_3 &= \lambda_1^2 \cdot \lambda_2^2 \cdot \lambda_3^2, \end{aligned} \quad (2.2)$$

де $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ – коефіцієнти подовження в трьох напрямках, тобто x,y,z;

I_1, I_2, I_3 – є розширенням сесії.

Враховуючи той факт, що такі матеріали не піддаються стисненню або скороченню об'єму під впливом зовнішніх сил, то формули (2.1) та (2.2) можна буде записати у вигляді двох класичних розкладів функції густини енергії деформації як [28]:

$$W = C_{10}(I_1 - 3) + C_{20}(I_1 - 3^2), \quad (2.3)$$

де C_{10} та C_{20} – це матеріальні константи на основі моделі Yeoh. Для матеріалу DragonSkin 30 дані константи дорівнюють $C_{10} = 0,11$, а $C_{20} = 0,02$.

Якщо необхідно розглянути лише обмеження осьової напруги та деформації м'якого приводу, то можна отримати визначення відхилення головної деформації, яке відповідає функції густини енергії деформації. Іншими словами можна отримати деформацію головного напруження t , λ_1, λ_2 та λ_3 , що відображає відносні зміни у напруженні вздовж основних напрямків наступним чином:

$$t = \frac{2}{I_1} \left(\lambda_1^2 - \frac{1}{\lambda_1^2 \lambda_2^2} \right) \left(\frac{\partial W}{\partial I_1} + \lambda_2^2 \frac{\partial W}{\partial I_1} \right), \quad (2.4)$$

$$\lambda_2^2 = \lambda_3^2 = \frac{1}{\lambda_1^2}. \quad (2.5)$$

Деформація вигину м'якого схоплювача під дією тиску показана на рисунку 2.14.

Згідно з геометричною залежністю, коефіцієнт осьового подовження приводу, або відношення довжини дуги середнього шару до довжини дуги нижнього шару після деформації приводу, можна виразити наступним чином [29]:

$$\lambda_1 = \frac{l}{l_1} = \frac{r}{r_0} = \frac{360l_1 + 2\pi c\theta + \pi h_0}{360l_1}, \quad (2.6)$$

де l – це довжина дуги центрального шару приводу;

l_1 – довжина дуги в нижній частині приводу;

r – радіус вигону середнього шару після деформації схоплювача;

r_0 – радіус вигону нижньої частини приводу після деформації;

θ – кут вигину приводу;

h – висота частини приводу.

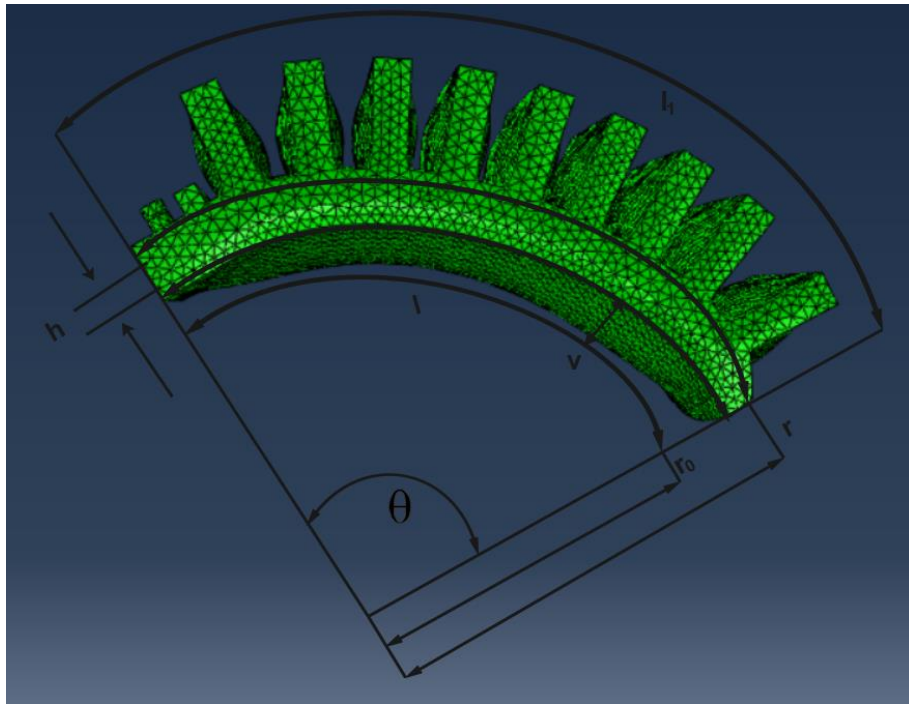


Рисунок 2.14 – Деформація вигину м'якого приводу

Розрахунок площі осьового поперечного перерізу та початкової площі поперечного перерізу м'якого приводу можна виконати за допомогою $s = S_0\lambda_2\lambda_3$. Згідно з рівнянням рівноваги розділу встановлюється зв'язок між головною напругою та рушійним тиском можна отримати наступним чином:

$$t = \frac{ps_0}{s} = \frac{p}{\lambda_2\lambda_3}, \quad (2.7)$$

де s – площа осьового поперечного перерізу;

s_0 – початкова площа поперечного перерізу;

p – вхідний тиск.

Співвідношення між кутом згину та вхідним тиском дорівнює:

$$\theta = \frac{(2\pi c + \pi h)^2 p^2}{129,600 l_1} + \frac{360 l_1 p}{\sqrt{(2\pi c + \pi h)^3}} + \frac{(2\pi c + \pi h)^3}{3,65 l_1^2}, \quad (2.8)$$

де c – довжина частини приводу.

2.4 Висновки до другого розділу

В другому розділі кваліфікаційної магістерської роботи, було розроблено чотири топології м'яких захоплень, які відрізняються між собою за дизайном та певними характеристиками. Вони мають однакову кількість камер яких становить 9 та відрізняються за висотою, довжиною та параметрами внутрішньої камери. Всі характеристики приводів були обрані базуючись на проведеному аналізі та спираючись на створення ефективного виробничого процесу та реалізацію концептуальної ідеї через використання 3D-друку та моделювання. Всі приводи розроблялись в інтегрованому програмному забезпеченні Autodesk Fusion 360.

Також була розроблена кінематична модель м'яких приводів, в якій було математично описано функція густини енергії, деформація головного напруження, коефіцієнт осьового подовження приводу та співвідношення кута вигину с рушійним тиском. Ці математичні моделі дозволяють враховувати та передбачати поведінку м'якого приводу під дією різноманітних впливів.

З ПРОВЕДЕННЯ ЕКСПЕРИМЕНТУ МОДЕЛЮВАННЯ ТОПОЛОГІЇ М'ЯКИХ СХОПЛЮВАЧІВ МЕТОДОМ СКІНЧЕННИХ ЕЛЕМЕНТІВ

3.1 Вибір середовища проведення моделювання

М'які приводи представляють собою інноваційний підхід у сфері робототехніки та автоматизації, використовуючи гнучкі матеріали для взаємодії з об'єктами. Гнучкість та деформація матеріалів, які використовуються при створенні захоплень, являють собою ключовий фактор, який визначає їхню ефективність та універсальність. Симуляція моделювання м'яких приводів повинен орієнтуватися на вирішення важливих питань, пов'язаних з їхньою динамікою та стійкістю. Тому вибір оптимального середовища для симуляції, яке враховує основні чинники, такі як гнучкість, деформація та точність, є важливим аспектом.

Для проведення експерименту м'яких захоплювачів використовується метод скінчених елементів (МСЕ). Такий метод вимагає певних програмних інструментів, які можуть моделювати гнучкі матеріали. Основними програмами для проведення такого моделювання вважається: ANSYS, ABAQUS, COMSOL Multiphysics, LS-DYNA, NyperMesh та Nastran.

ANSYS є найпопулярнішою програмою серед таких видів моделювання, але дана програма працює тільки на потужних комп'ютерах з гарною відеокартою. ABAQUS також є популярною програмою, яка на відміну від ANSYS, має нижчі апаратні характеристики для проведення моделювання, через це для проведення моделювання було обрано саме цю програму.

ABAQUS – це універсальний програмний пакет на основі скінчених елементів, створений компанією Dassault Systmes. Завдяки великій бібліотеці типів елементів, програма може ефективно моделювати практично будь-яку

геометрію. Маючи обширну бібліотеку моделей матеріалів, цей продукт дозволяє симулювати напругу та деформацію в ізотропних і анізотропних металах при низьких і високих температурах, при різних швидкостях деформації, а також при малих і великих розтягах. Крім металів, ABAQUS може імітувати гуму та полімери, залізобетон, скло та кераміку, роздавлену або пружну піну, а також геотехнічні матеріали, такі як ґрунти та гірські породи [30].

Система MCE у програмі сприяє легкому розгортанню великих завдань, ефективно використовуючи доступні обчислювальні ресурси. ABAQUS ефективно використовує високопродуктивні можливості сучасних комп'ютерів, тому обмеження розміру моделі нечасто стає перешкодою для здійснення адекватного моделювання. Програма ABAQUS відповідає високим вимогам реальних великих моделей, дозволяючи користувачам успішно вирішувати складні завдання.

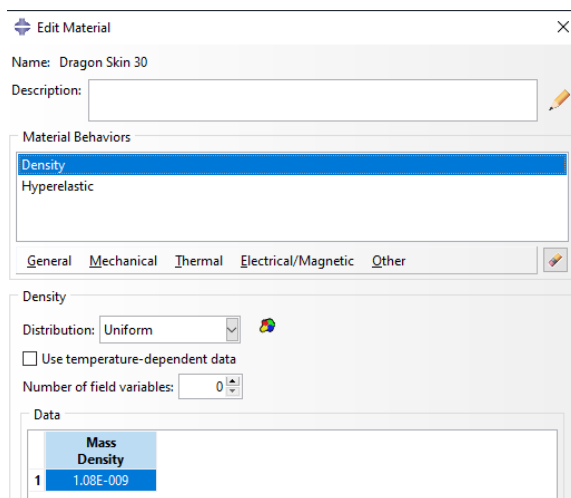
3.2 Налаштування характеристик для проведення експерименту

MCE є комп'ютеризованим методом прогнозування реакції продукту на реальні сили, вібрації, тепло, тиск, потік рідини та інші фізичні впливи. Експеримент з даним методом дозволяє визначити, чи продукт буде стійким, якість його матеріалів, як він зноситься та чи виконує заплановані функції. Під час розробки продукту моделювання MCE використовується для передбачення, як він буде вести себе у реальних умовах експлуатації. Це допомагає забезпечитись, що продукт виконує свої функції безпечно та ефективно [30].

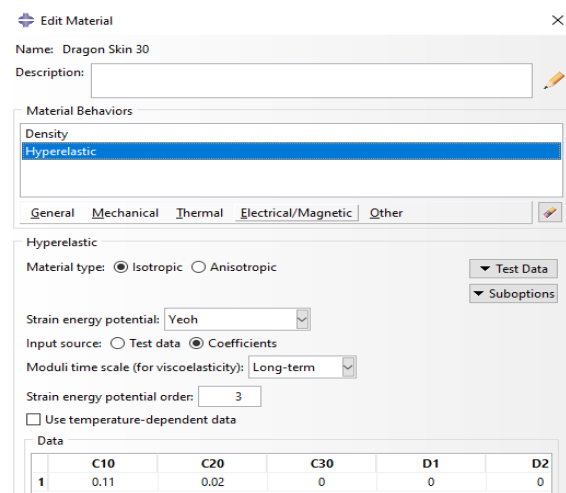
Суть даного методу полягає в визначенні матеріалу та розбитті геометрії на маленькі елементарні частини, які і називаються скінченними елементами, при симуляції кожний елемент буде розглядатися окремо, це дозволяє спростити обчислення при моделюванні.

Для проведення моделювання в програму ABAQUS було імпортовано чотири змодельованих схоплювачів з Fusion 360 у форматі .step. Далі було налаштовані всі необхідні характеристики, які потребував даний метод.

В даній програмі при виборі еластичного матеріалу можна обрати різні моделі такі, як: Elastic, Hyperelastic, Hyperfoam, Low Density Foam, Hypoelastic та Porous Elastic. Для мого завдання використовується гіпереластичний матеріал. В розділі Hyperelastic можна обрати функцію напруженої енергії, яка буде описувати залежність між напругою та деформацією для гіпереластичних матеріалів. Для налаштування матеріалу було використано коефіцієнти за допомогою типу Yeoh. Також в налаштуваннях було встановлено значення щільності, що також грає роль при майбутньому моделюванні. Використовуючи надані характеристики матеріалу в статті [15] були встановлені налаштування, які зображені на рисунку 3.1.



a)



б)

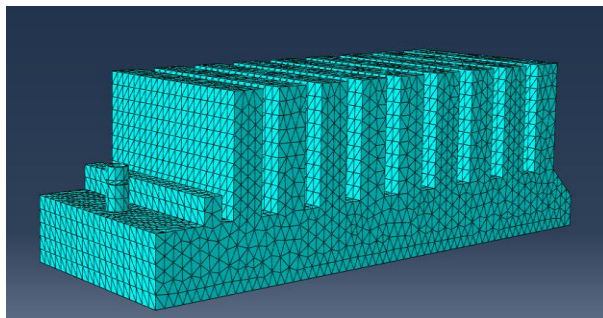
а) налаштування параметру Density;

б) встановлення коефіцієнту Yeoh

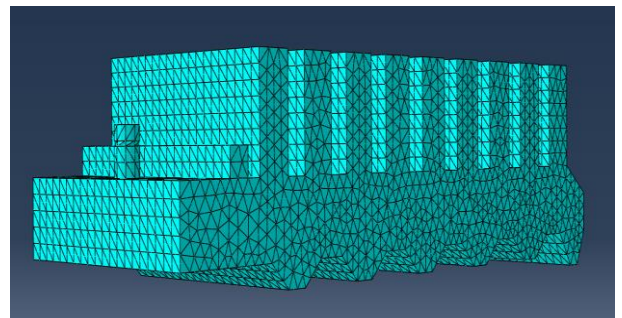
Рисунок 3.1 – Параметри встановленого матеріалу

Після того, як був створений матеріал та призначений імпортованій геометрії, було перетворено суцільну геометрію на скінченні елементи, або Mesh геометрію. Кожна модель схоплювача складається приблизно з 130000

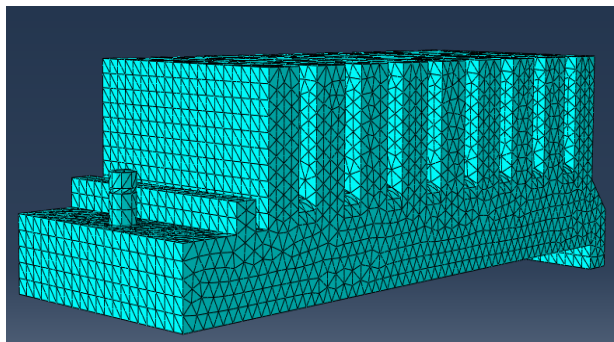
тетраедрів, які дозволяють добре апроксимувати геометричні моделі схватів, які мають складну структуру. Для сітки було встановлено сімейство тривимірних стресів, використовуємо стандарти, такі ж як порядок створюваної моделі, а саме квадратичний порядок. Наступним було встановлено гібридну форму в налаштуваннях тетраедру та маємо елемент C3D10H, де 10 вказує на кількість вузлів. Тобто кожен тетраедр має чотири вершини, для підвищення точності обчислень і стабільності моделі. А H позначає гібридний тип елемента, який вказує, що він використовує комбінацію різних функцій форм для покращення ефективності та точності при апроксимації геометрії та поля деформацій. На рисунку 3.2 зображені всі чотири створені моделі м'яких приводів, які перетворені в Mesh геометрію.



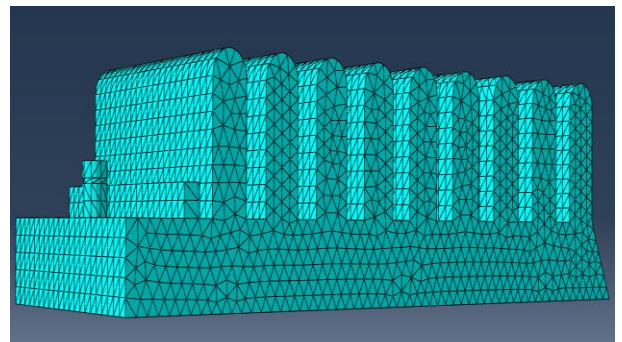
а)



б)



в)



г)

а) mesh геометрія першого схвату;

б) mesh геометрія другого схвату;

в) mesh геометрія третього схвату;

г) mesh геометрія четвертого схвату

Рисунок 3.2 – Mesh геометрії всіх схватів

Далі необхідно імпортувати модель до збірки, так як ABAQUS запускає та виконує моделювання створених екземплярів в збірці, як шлях до геометрії.

Наступним кроком вже йдуть всі фізичні налаштування, які будуть задіяні на модель при проведенні моделювання. Спочатку визначаються поверхні, на які буде діяти тиск, тобто слід обрати всі поверхні внутрішньої камери. Далі були створені поетапні кроки, оскільки це статичне моделювання вбудованої механіки.

Перший крок це гравітація, даний крок звертає увагу лише на силу тяжіння, так як це досить м'який матеріал, і початкова частина, яка закріплена тримає форму коли інша вже згинається завдяки своїм еластичним властивостям. При створенні першого кроку було активовано деформацію фіксатора та нелінійні ефекти для даної симуляції. Для того щоб зафіксувати поверхні, які знаходяться під закріплювальною частиною було створено граничні умови. На рисунку 3.3 зображені поверхні до яких застосовуються створені граничні умови.

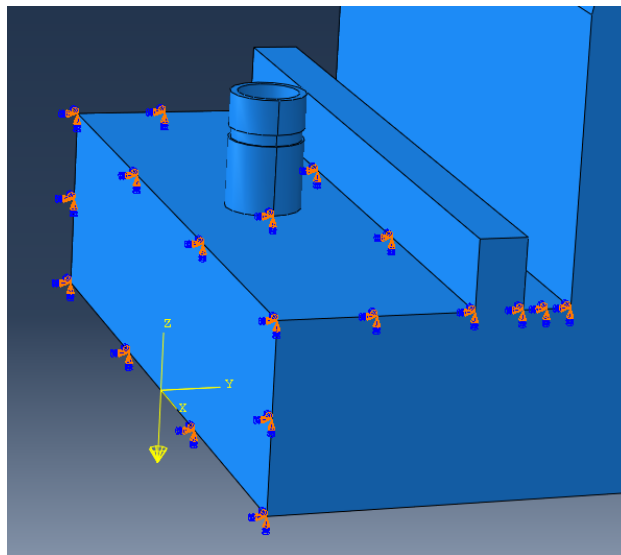


Рисунок 3.3 – Поверхні граничних умов

Після вибору поверхонь, були встановлені ступені свободи, які при симуляції заблокують обрані поверхні. Для даних поверхонь обраний тип умов є Encastre, який має наступну формулу:

$$U_1 = U_2 = U_3 = RU_1 = RU_2 = RU_3 = 0, \quad (3.1)$$

де U_1, U_2, U_3 – це переміщення по осях x, y , та z ;

RU_1, RU_2, RU_3 – обертання навколо відповідних осей x, y, z .

З формули (3.1) стає зрозуміло, що дана гранична умова вказує на умовно жорстке закріплення поверхні конструкції, тобто елемент повністю фіксується і при симуляції здійснювати переміщення в будь якому напрямку не може.

На рисунку 3.3 можна побачити координати жовтого кольору, стрілка якої здовжена на координаті z . Це свідчить про встановлену силу тяжіння, значення якої становить 9,81.

Другий крок був створений для застосування тиску в системі. Було обрано тип моделювання, механічний тиск та повітряна камера в яку він повинен подаватися. Після чого був встановлений тиск, який буде подаватися при моделюванні. В моделюванні змодельовані захвати тестуються при тиску 10 кПа, 30 кПа, 50 кПа та 80 кПа.

3.3 Проведення експерименту роботи м'яких приводів

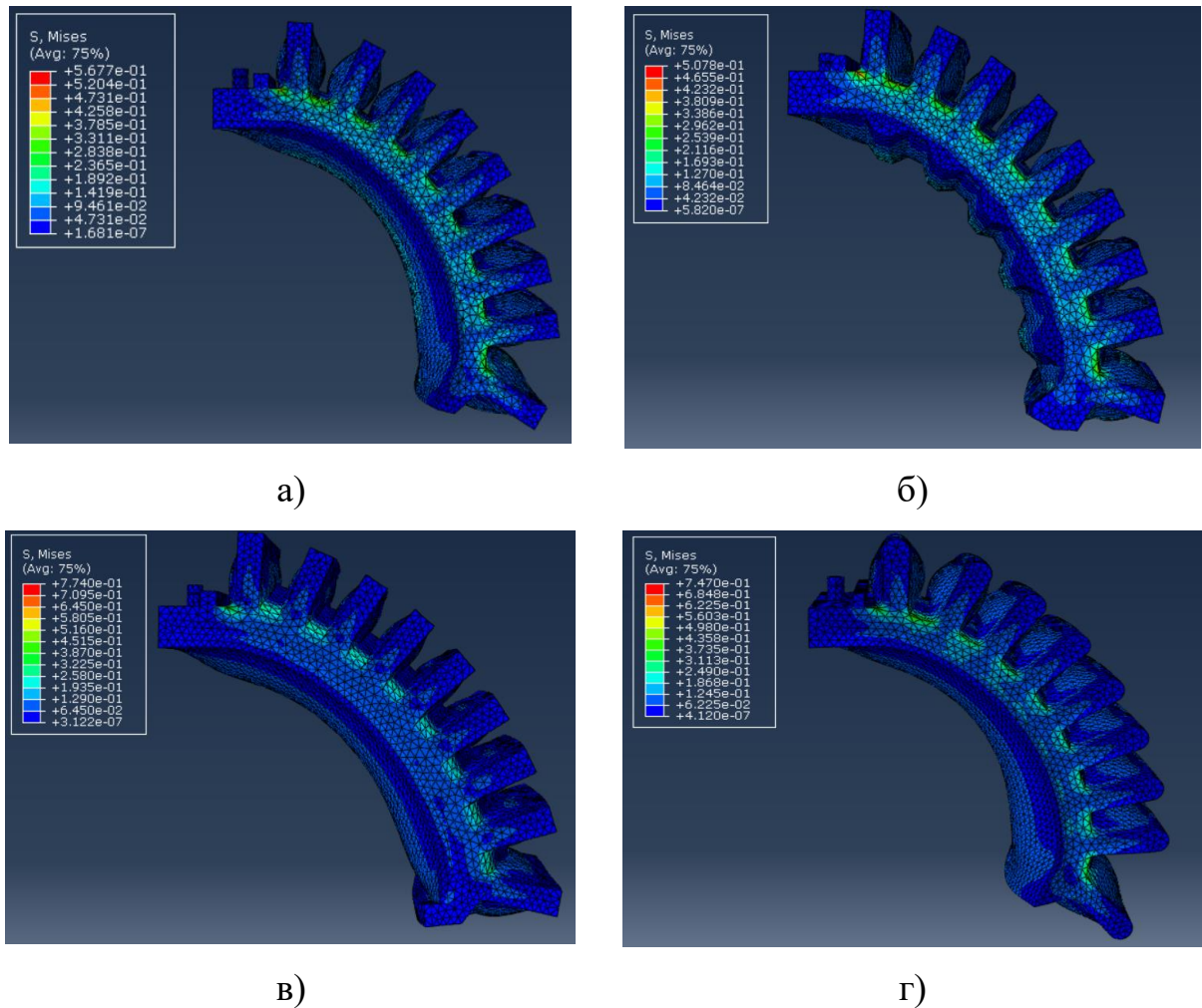
Робота м'яких схоплювачів залежить від того наскільки привод гнучкий та адаптивний до схвату різноманітних об'єктів. Як зазначалось в першому розділі, що важливим показником роботоздатності акuatorу є їхні властивості при впливі різних рівнів подачі тиску на вигин.

Для всіх чотирьох змодельованих моделей м'яких схоплювачів було проведено експеримент, для розуміння того чи здатні вони працювати та яка їх реакція під дією різних вхідних тисків. Даний експеримент дозволить визначити які їх оптимальні умови експлуатації та виявити особливості їхньої роботи в залежності від зовнішніх факторів.

Чотири розроблених привода тестувались на вигин при різній подачі тиску, а саме 10 кПа, 30 кПа, 50 кПа та 80 кПа та аналізувалися з допомогою

кольорової шкали. Дана шкала призначена для візуалізації розподілу параметрів симуляції по всій моделі.

Перший експеримент проводився для акуаторів при тиску 10 кПа. На рисунку 3.4 зображено результат симуляції даних приводів.



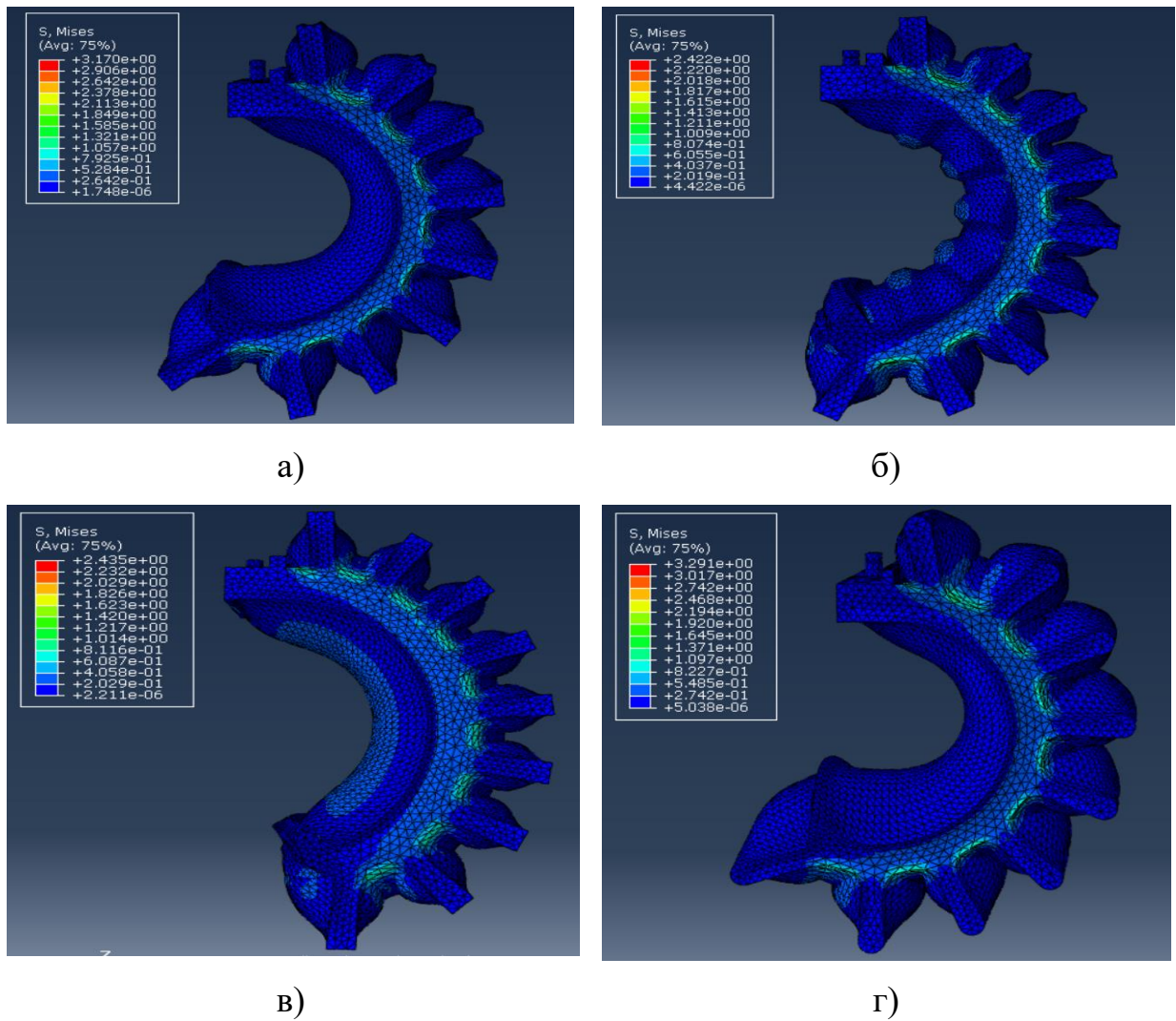
- а) результат симуляції першого схвату;
- б) результат симуляції другого схвату;
- в) результат симуляції третього схвату;
- г) результат симуляції четвертого схвату

Рисунок 3.4 – Моделювання вигину схватів при вхідному тиску 10 кПа

Всі схоплювачі успішно пройшли дане тестування. Експеримент показав, що при даному вхідному тиску у всіх них майже однаковий кут вигину, кути дорівнюють 53° , 50° , 47° , 52° . З результату можна сказати, що

отримані кути не є досить великими, але в системі з двох-трьох приводів вони вже можуть утримувати невеликі легкі об'єкти. Для проведення повного тестування програмі ABAQUS знадобилося провести 7 ітерацій для першого і другого схвату та 4 ітерацій для третього і четвертого схвату, це свідчить про те, що чим менше довжина приводу, тим швидше він приводиться в дію під рушійним тиском. На рисунку 3.4 чітко видно, що усі з'єднання виділені зелено-жовтою шкалою, це свідчить про надмірну деформацію та найбільше навантаження на дані ділянки. Для м'яких приводів надмірне навантаження між камерами є нормальним. За отриманим звітом можна сказати, що найбільше навантаження йде на першу ділянку між закріплюваним зубцем та першою камерою. Також можна зробити висновок, що висота стінок з'єднань, а саме кількість матеріалу між камерами впливає на навантаження стінок при роботі, так як на рисунку 3.4, видно, що третій захват має найсвітліші та в порівнянні з іншими найменш виділених елементів ділянок, які свідчить про менше навантаження. Якщо казати про розташування позитивного тиску по в середині камери, то можна побачити, що в першому, другому та четвертому схоплювачі камери вже починають розширюватися в об'ємі на відміну від третього, в третьому можна спостерігати, що більше розширюється нижня поверхня м'якого приводу, ніж верхні камери. Інші теж мають здатність розширюватися в нижній частині, але в не такому об'ємі. Найменше розширення спостерігається в другому схваті за рахунок додаткових зубців, які додають більшої товщини нижній стінці.

Другий експеримент проводився з вхідним тиском 30 кПа, на рисунку 3.5 представлено отримані результати. Отже при такому рушійному тиску м'які приводи мають кут вигину: перший – 95° , другий – 93° , третій – 82° та четвертий – 95° . Можна сказати, що при даному тиску кути вигину першого, другого та четвертого схоплювачів знаходяться в одному діапазоні, на відміну від 3 схвату.



- а) результат симуляції першого схвату;
 б) результат симуляції другого схвату;
 в) результат симуляції третього схвату;
 г) результат симуляції четвертого схвату

Рисунок 3.5 – Моделювання вигину схватів при вхідному тиску 30 кПа

Програмі знадобилося провести вже 12 ітерація для першого та третього схоплювачів, 9 ітерацій для другого схвату та 13 для четвертого. В даному моделюванні можна спостерігати, що напруження в ділянках з'єднання зменшилося на відміну від першого моделювання, так сталося через зміну об'єму схвату і відповідно розподілу тиску в ньому. Як видно з рисунку 3.5 усі схоплювачі значно збільшились в об'ємі. Камери кожного з схватів збільшилася в об'ємі так само як і нижня частина. Слід сказати, що в першому,

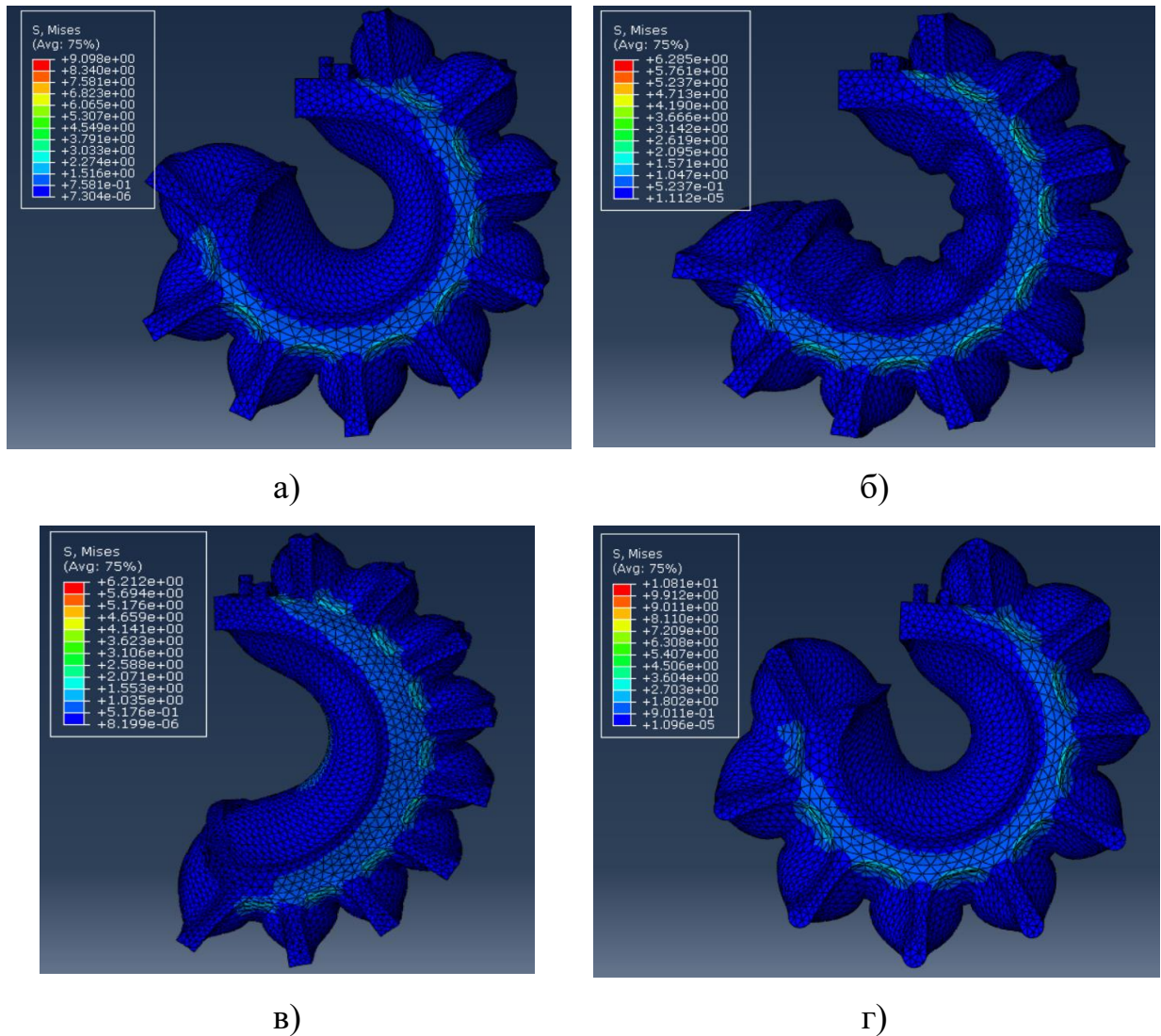
другому та четвертому приводі перша камера вигинається в протилежну сторону від всіх інших камер, це відбувається через те, що відстань від закріплюваного зубця до камери менше, ніж довжина з'єднань камер. В третьому схоплювачі також це можна спостерігати, але через збільшену висоту з'єднань, він є менш помітним.

Через збільшення камер в об'ємі деякі камери можуть стискаються між собою додаючи навантаження один на одного. При моделюванні усіх приводів було також розроблені акuatorи з меншою довжиною з'єднань, і через те, що вони розташовані дуже близько один від одного, відбувалось сильне навантаження між камерами, які призводили до руйнування камер і відповідно самого схвату, тому програма видавала помилку.

Третій експеримент проводився з тиском 50 кПа. Дане моделювання показало досить значну різницю між кутами третього привода і інших схоплювачів. Кут вигину першого схвату становить 158° , другий дорівнює 136° , четвертий має кут 151° , а ось третій становить 98° , що значно відрізняється від інших. На рисунку 3.6 можна побачити отримані результати моделювання.

Як можна побачити з рисунку 3.6 різниця між кута дуже відрізняється. Це свідчить про залежність висоти стінок з'єднань на кут вигину. Так як висота стінок між з'єднань третього схвату є досить велика і сама топологія не дозволяє привиду досить сильно вигинатися. Для третього схвату проводилися додаткові тестування з різними висотами камер, а саме з висотою 13 мм та 14 мм від основи. Дані дослідження показали, що при висоті в 13 мм, навантаження на камери є сильно великі і привод не витримує і в результаті чого показує помилку, та при висоті 14 мм навантаження на камери між собою є також достатньо великим, що може привести при роботі к пошкодженню м'якого схвату, тому для третього акuatorа було обрано висоту 15 мм, дана висота не дозволяє камерами між собою стискатися при різних вхідних тисках. Також можна побачити, що кут другого схоплювача на відміну від першого та четвертого є відносно нижче, це відбувається через те, що другий схват сам по

собі завдяки зубцям є більш жорсткий, через те що містить більше матеріалу, особливо на нижній частині приводу. Завдяки зубцям схоплювач з даною топологією може схоплювати об'єкти більш слизькі.



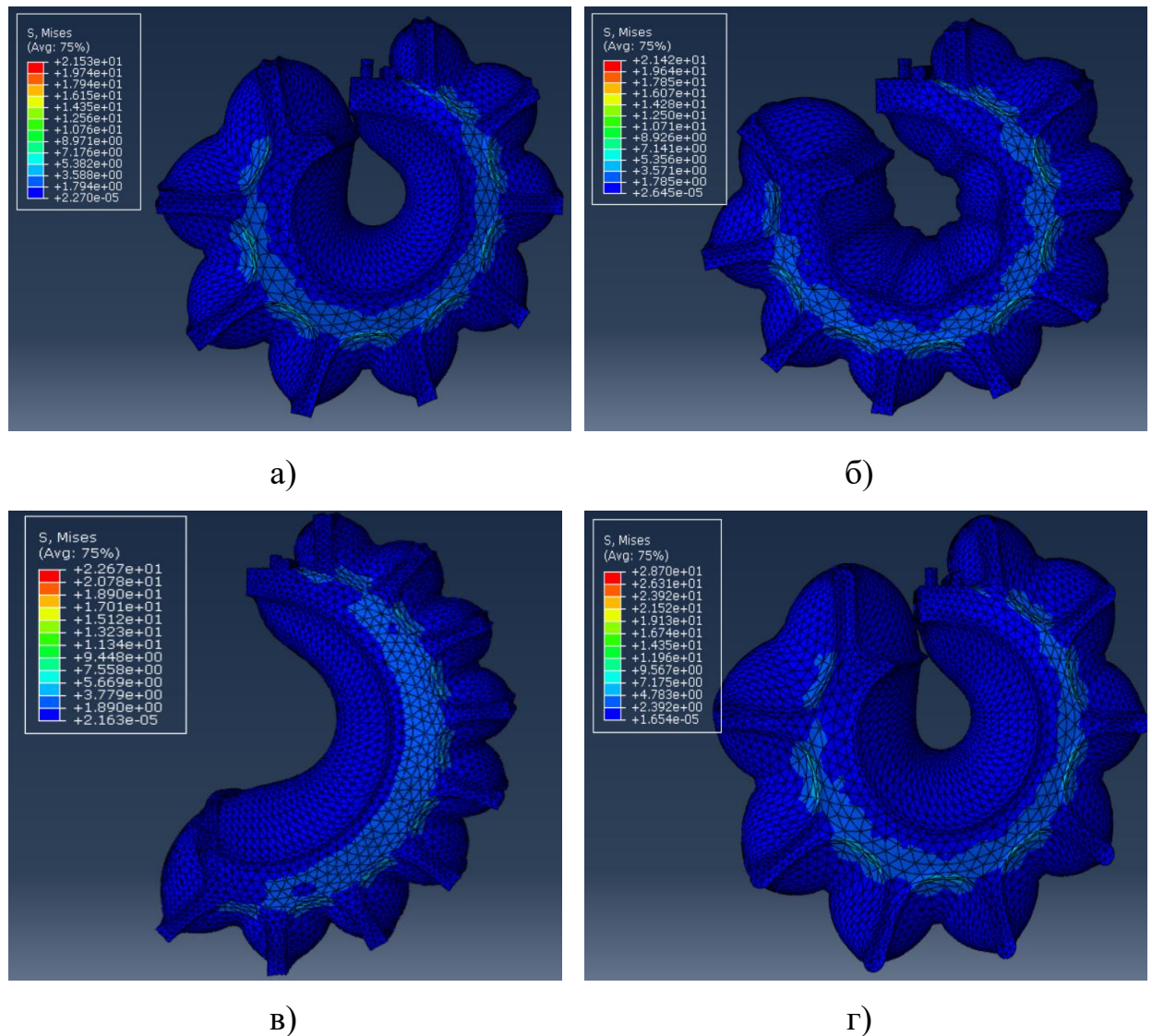
- а) результат симуляції першого схвату;
 б) результат симуляції другого схвату;
 в) результат симуляції третього схвату;
 г) результат симуляції четвертого схвату

Рисунок 3.6 – Моделювання вигину схватів при входному тиску 50 кПа

З результату можна сказати, що об'єм з третім моделюванням ще збільшився і відповідно навантаження між кутами зменшилося, що свідчить

кольорова шкала. Також можна сказати, що спостерігається рівномірне збільшення об'єму як в камерах та і нижній частині. Найменше збільшується нижня частина другого схвату.

Четвертий експеримент для всіх чотирьох схоплювачів проводився з вхідним тиском 80 кПа. Отримані результати представлені на рисунку 3.7.



- а) результат симуляції першого схвату;
- б) результат симуляції другого схвату;
- в) результат симуляції третього схвату;
- г) результат симуляції четвертого схвату

Рисунок 3.7 – Моделювання вигину схватів при вхідному тиску 80 кПа

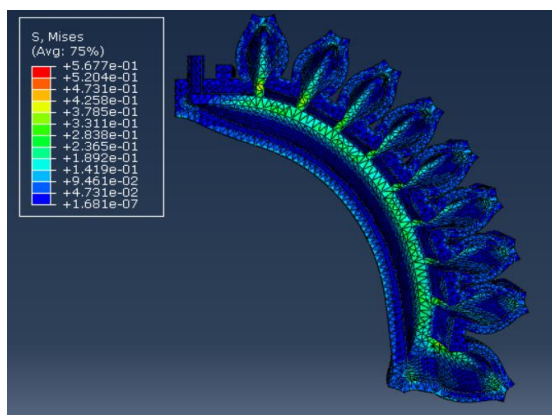
При вхідному тиску 80 кПа, кут вигину для першого схвату дорівнює 180° , другий має 161° , третій становить 108° та четвертий дорівнює 177° . Для першого та четвертого схвату даний тиск є максимальним, тобто їх вигин дорівнює повному оберту. Для другого схвату даний тиск також можна вважати кінцевим, так як при 90 кПа кут буде вже занадто великий і кінець приводу буде тиснути на його початок. Для третього схвату проводилось додаткове тестування з вхідним тиском 100 кПа, для перевірки чи збільшиться кут вигину з більшим тиском. Дане тестування показало, що кут дорівнює 112° , що майже не відрізняється від кута з тиском 80 кПа, відмінність полягає в тому, що далі збільшується вже об'єм, а не кут приводу.

За шкалою з рисунку 3.7, можна зрозуміти, що навантаження на зовнішні стінки приводу є мінімальним, що свідчить про те, що м'які змодельовані приводи є надійними при експлуатації і при роботі їх розрив маловірогідний.

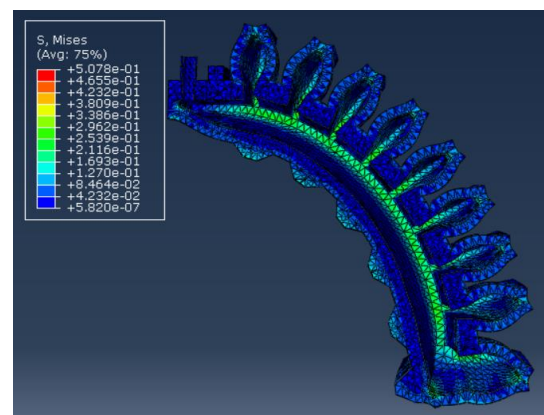
З усіх проведених тестів, як зазначалось при подачі вхідного тиску розширюється не тільки верхня частина з камерами, а й нижня. Це відбувається за рахунок того, що висота нижньої частини є досить невеликою. По-перше розширення нижньої стінки впливає дозволяє схвату збільшити кут вигину. Бо якщо нижня стінка може розширюватися, це може збільшити кут вигину пальця. За таких умов, захват може легше адаптуватися до об'єктів різних розмірів та форм. По-друге дане рішення впливає на більше навантаження при взаємодії з об'єктом. Так як розширення нижньої стінки може також збільшити зону контакту з об'єктом під час захоплення. Це може допомагати розподіляти навантаження на більшу площу що може бути корисним при роботі неоднорідними об'єктами, або об'єктами з нерівномірною поверхнею. Вразі необхідності обмеження деформації нижнього шару, необхідно просто при створенні схвату у матриці додати до нижньої частини нормовану тканину, це заблокує нижню частину к розширенню через більшу жорсткість матеріалу ніж у використовуваного силікону.

Різниця між зовнішніми стінками та стінками камери по боках, в камерах та знизу становить 2 мм. Для перевірки як висота стінок впливає на м'який

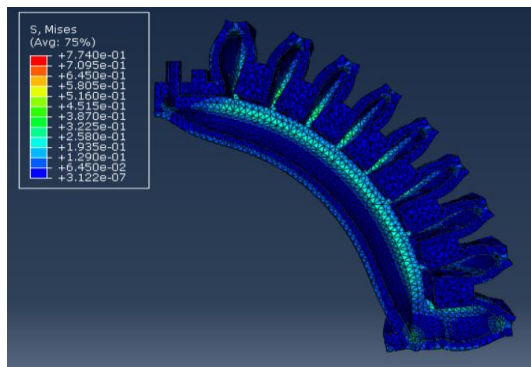
схоплював було також проведено додаткові симуляції, для перевірки як працюватиме схоплювач при вхідному тиску 30 кПа з стінками, які становить 1 мм. Тестування не було успішним і програма показала помилку, так як навантаження на стінки було дуже великим і схоплювач його не витримав. Так як на відміну від зовнішніх стінок навантаження всередині камери на бокові стінки є вищим ніж на зовнішні. На рисунку 3.8 зображено схоплювачі в перерізі при вхідному тиску 10 кПа. З рисунку видно, що за шкалою в середині камери є більше навантаження ніж між з'єднаннями зовні.



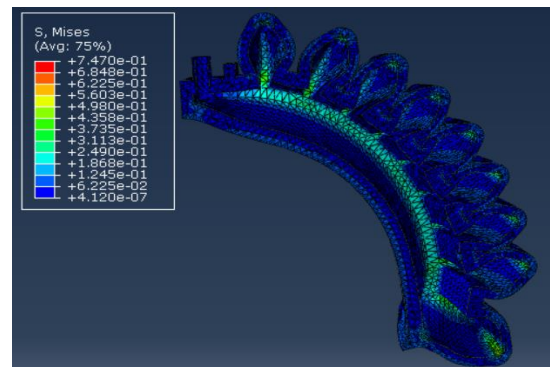
а)



б)



в)



г)

- а) результат симуляції першого схвату;
- б) результат симуляції другого схвату;
- в) результат симуляції третього схвату;
- г) результат симуляції четвертого схвату

Рисунок 3.8 – Моделювання вигину схватів в розрізі при вхідному тиску 10 кПа

З рисунку 3.8 також видно, що навантаження йде не тільки на бокові стінки, а й на верхні стінки камер. За результатами шкали, можна спостерігати, що другий привод, має навантаження і на нижніх зубцях, це відбувається через те що, нижні стінки намагаються розширюватися, а дані зубці додають більшої жорсткості схвату. Для всіх протестованих рушійних тисків, дане навантаження майже не змінюється і воно є в межах норм.

Всі отримані результати куту вигину приводів на вхідний тиск зібрані у таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Отримані результати моделювання

Задіяний тиск	Привод 1	Привод 2	Привод 3	Привод 4
10 кПа	53°	50°	47°	52°
30 кПа	95°	93°	82°	95°
50 кПа	158°	136°	98°	151°
80 кПа	180°	161°	108°	177°

Крім того графічні результати представлені на рисунку 3.9, які чітко показують залежність куту приводу кожного схоплювача від тиску і їх порівняння між собою.

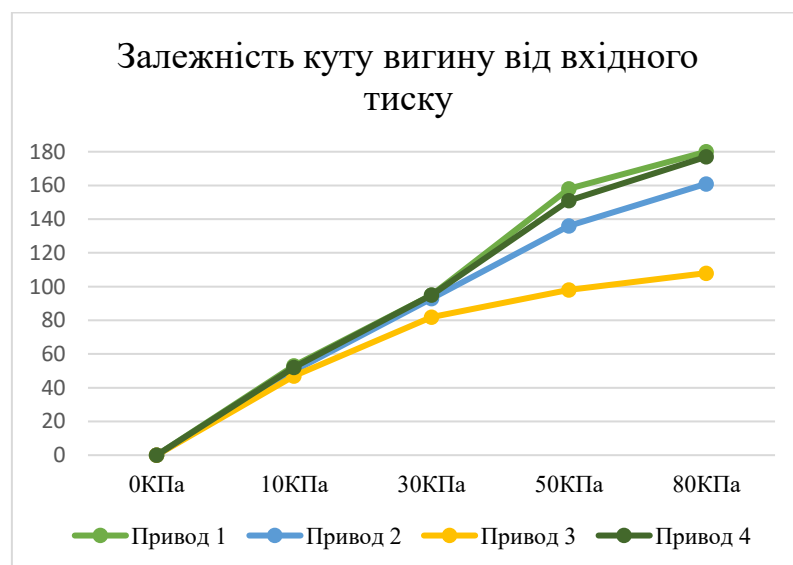


Рисунок 3.9 – Результати моделювання

Візуальний аналіз результатів показує, що при 10 кПа та 30 кПа всі змодельовані приводи демонструють схожу поведінку. Однак при докладнішому огляді відзначаються відмінності, які стають більш видимими при збільшенні тиску.

Порівнюючи розроблені топології м'яких приводів в інших статтях можна зробити висновок, що при однакових вхідних тисках створені моделі схоплювачів перевищують кут вигину при симуляції приблизно на 26%.

З проведених експериментів було розглянуто приблизний діаметр об'єктів які вони можуть схопити. При 10 кПа змодельовані схоплювачі можуть підхопити об'єкт діаметром приблизно 50-54 мм, в системі з двох або трьох пальців. Також при захваті об'єктів з вхідним тиском 30 кПа схоплювачі повинні бути в системі і приблизний об'єм об'єктів становить 15-40 мм. При вхідному тиску 50 кПа перший, другий та третій можуть працювати самостійно, але тоді максимальний об'єм становить 10-30 мм, а якщо брати тиск 80 кПа то це десь 10-20 мм. Третій через відносно невеликий вигін повинні працювати тільки в системі. Також можна сказати, що об'єм схопленого об'єкта залежить від хвата-схоплювача.

Визначити залежність вихідного тиску від вхідного не було через низьку продуктивність ноутбуку.

3.4 Висновки к третьому розділу

В даному розділі магістерської роботи було розглянуто та обрано програмне забезпечення для проведення експерименту моделювання м'яких приводів методом скінчених елементів. Для проведення симуляції використовувалась програма ABAQUS, яка має всі необхідні інструменти для моделювання м'яких приводів MSE, з налаштуванням гнучких матеріалів. Потім було проведено всі налаштування змодельованих м'яких схоплювачів для проведення симуляції. Був встановлений матеріал за допомогою моделі Yeoh. Далі перетворили моделі схватів на Mesh геометрію та встановили

параметри такі як: гравітація та вхідний тиск для виконання симуляції. Моделювання приводів проводився при вхідному тиску: 10 кПа, 30 кПа, 50 кПа та 80 кПа.

Проведений експеримент показав, що всі схоплювачі є дієздатними та мають різні кути при одному тиску. Перший схват має кути при першій симуляції 53° , на другому 95° , при 50 кПа кут становить 158° і при останньому моделюванні кут вже 180° . Другий схват показав наступні результати: 50° , 93° , 136° і при вхідному тиску 80 кПа його кут дорівнює 161° . Третій привод має кут вигину 47° при 10 кПа, 82° при 30 кПа, на третій симуляції його кут є 98° і при 80 кПа кут – 108° . І останній змодельований схоплювач має наступні кути при різному вхідному тиску: 52° , 95° , 151° та 177° . За результатами проведеного моделювання можна зробити висновок, що кожен параметр топології акuatorів впливає на їх кут вигину. Даний експеримент показав, що перший, другий та четвертий схват, можуть працювати як окрема так і в системі з декількома приводами, на відміну від третього схвату, який має максимальний кут вигину 108° і тому може працювати тільки в поєднанні з іншими схватами. Також слід зазначити, що в системі можуть бути тільки приводи однієї топології, так як всі вони мають різні вигони при різному вхідному тиску, а зазвичай в РМ при схопленні об'єкта подається однаковий тиск одразу на всі приводи.

Також були проведені додаткові симуляції, які показали, що висота стінок з'єднань, висота камер схвату, відстань з'єднань між камерами, ширина бокових та нижніх стінок сильно впливають на те, як буде працювати привод при подачі тиску. Якщо обрати параметри, які є дуже малі за шириною чи висотою, то схоплювач не витримає вхідний тиск і просто розірветься.

4 ВИГОТОВЛЕННЯ МАКЕТУ М'ЯКИХ СХОПЛЮВАЧІВ

4.1 Моделювання прес-форм м'яких захоплювачів

Виготовлення прототипів м'яких приводів можна реалізувати декількома способами в залежності від матеріалу з якого виготовляється акuator. Це або друк на 3D-принтері з еластичного матеріалу або ж створення прес-форм, чи їх ще називають форми для лиття або матриці. Другий спосіб є більш актуальним, так як виготовлення схватів безпосередньо на 3D-принтері є досить дорого і при цьому є обмеження в виборі еластомерів. Тому для створення фізичного макета розроблених м'яких приводів було обрано метод лиття у форму.

Створення прес-форм для м'яких захоплювачів є важливим етапом у процесі виготовлення фізичної моделі м'якого привода. Прес-форми використовують для виготовлення конкретної геометрії та деталей змодельованих схватів з високою точністю. Дані форми дозволяють забезпечити високу якість і однорідність м'яких захоплень шляхом лиття або відтворення м'яких матеріалів в певних конфігураціях, що є важливим кроком для забезпечення однорідності і повторюваності виготовлених копій. Це також важливо для досягнення передбачуваних характеристик і функцій в реальних умовах експлуатації.

Для м'яких акuatorів однорідність є важливим показником через можливу розгерметизацію, яка може привести до недієздатності всього захоплювача. Тому при створенні форми необхідно враховувати той факт, що привод має бути залитий одразу повністю без додаткових склеювань.

Для всіх захоплювача було розроблено прес-форму, яка повторює детальну геометрію кожного приводу. В результаті для створення фізичної

форми м'якого схоплювача було виготовлено прес-форму, яка складається з чотирьох частин, це:

- форма лівої частини привода;
- форма правої частини привода;
- форма камери привода;
- заглушка.

Заглушка потрібна для того щоб створити отвір через який буде потрапляти повітря в камеру м'якого приводу і активувати захват. Модель заглушки підходить для всіх чотирьох схватів. На рисунку 4.1 зображена змодельована модель заглушки.

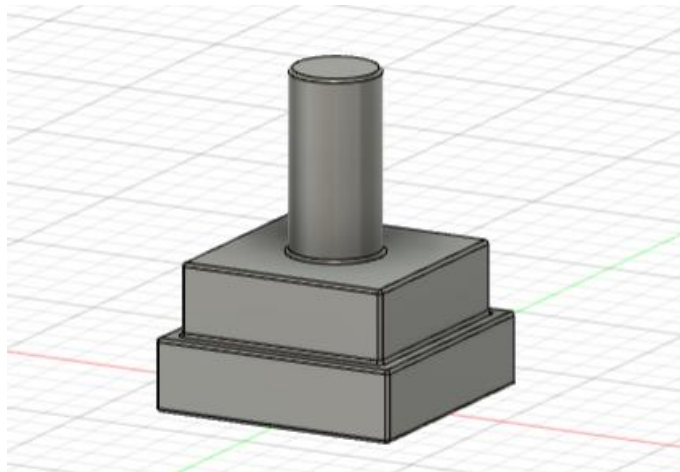


Рисунок 4.1 – Змодельована заглушка

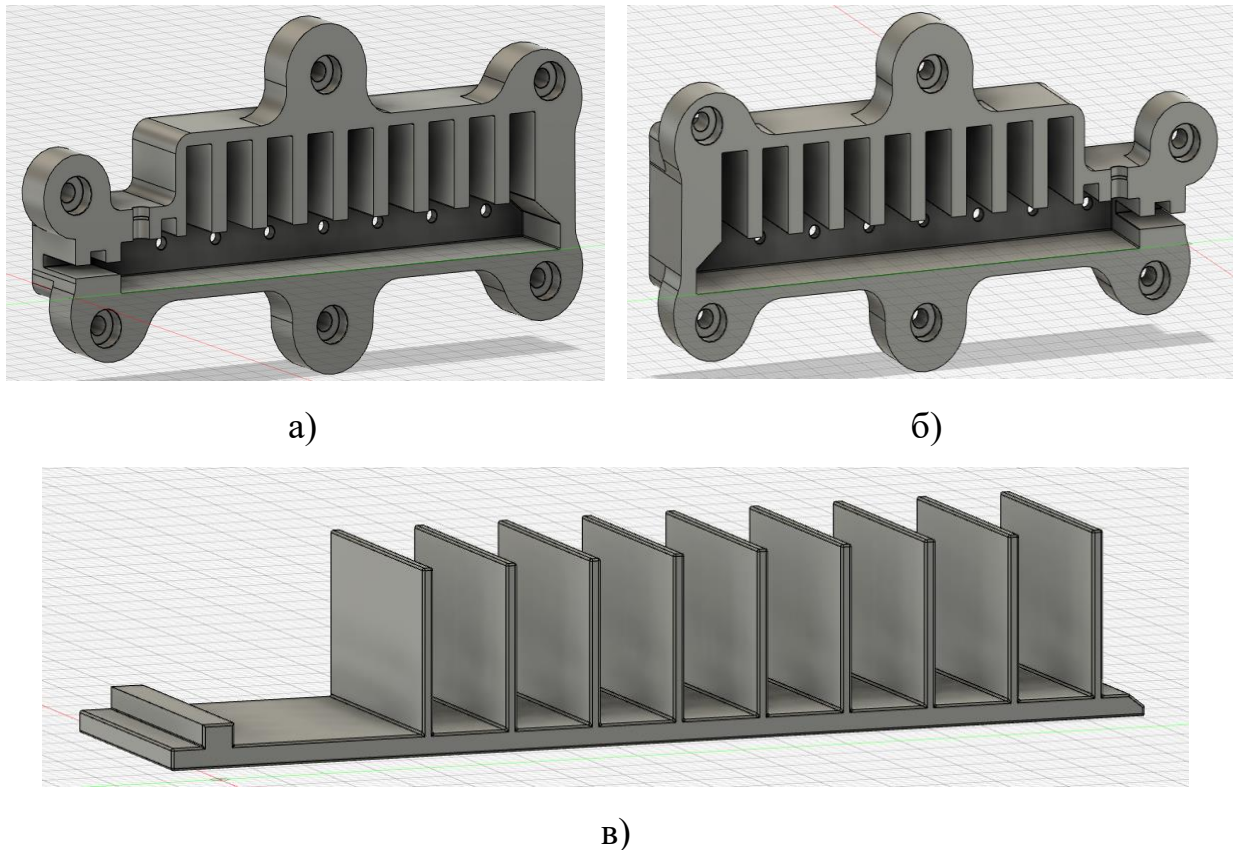
Розроблена модель має циліндр довжиною 5 мм та діаметром 3 мм та квадратичну основу висота якої становить 4 мм, верхній шар основи має розміри 7x7, а другий дорівнює 6x6. Дві основи були створені для того щоб деталь можна було легко вставити та висунути з зібраної конструкції.

Загалом розроблені прес-форми зовні мають однакову будову, яка складається з прямокутної основи та шести отворів які в свою чергу необхідні для кращого закріплення всієї конструкції між собою. Це зроблено для того щоб під час застигання силікону він не витік з форми. Ці отвори призначенні

для закріплення болтів, які стискають дві частини форми між собою. Дані отвори зроблені для 3 мм болтів.

Також в конструкції є вісім отворів на боковій частині форми, які призначені для виведення з молду надлишок силікону.

На рисунку 4.2 зображено прес-форму всієї конструкції.



- а) матриця лівої частини першого схвату;
- б) матриця правої частини першого схвату;
- в) прес-форма камери

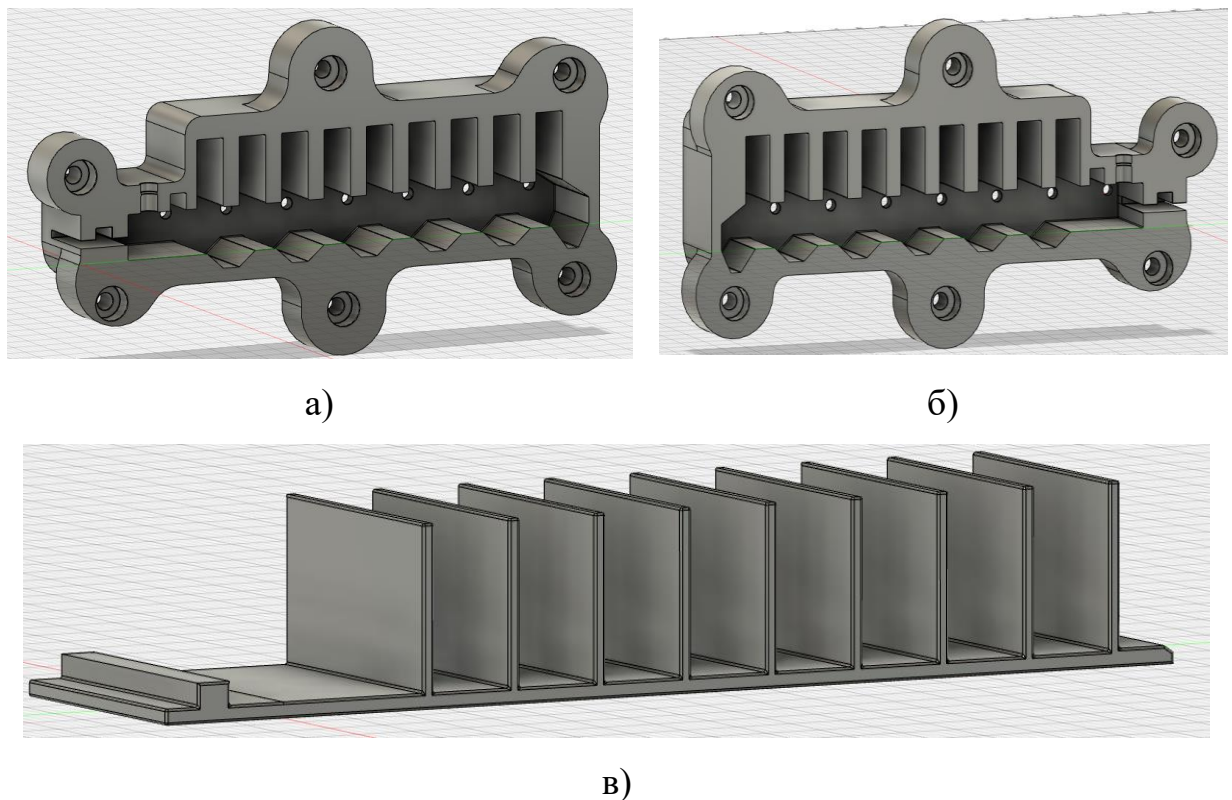
Рисунок 4.2 – Прес-форми першого схвату

Вище було зазначено, що розробка топології м'яких приводів була змодельована з розрахунком на те щоб можна було зробити фізичну модель. Завдяки цьому розроблена прес-форма внутрішньої камери має нижню основу висота якої 2 мм та дев'ять блоків які розташовані на осі Z основі і мають довжину 1 мм. Коли силікон застигне, дану камеру необхідно буде витягнути,

зламавши перед цим усі блоки, це буде легко зробити завдяки їх невеликій довжині і потім пінцетом обережно витягти.

Також для більш кращого закріплення та легшого витягання пластини камери на початку форми було змодельований зубець, який надійніше закріпить конструкцію.

На рисунку 4.3 зображено прес-форму для створення фізичної моделі другого схвату.

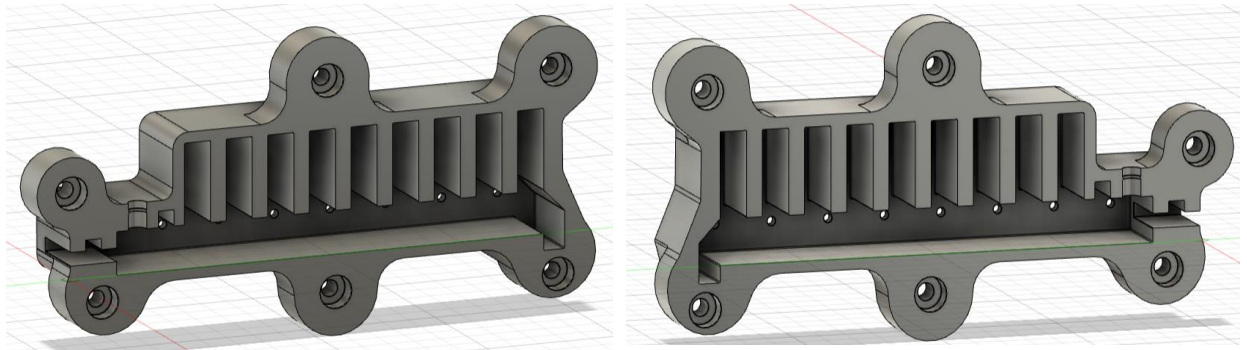


- а) матриця лівої частини другого схвату;
- б) матриця правої частини другого схвату;
- в) прес-форма другої камери

Рисунок 4.3 – Прес-форми другого схвату

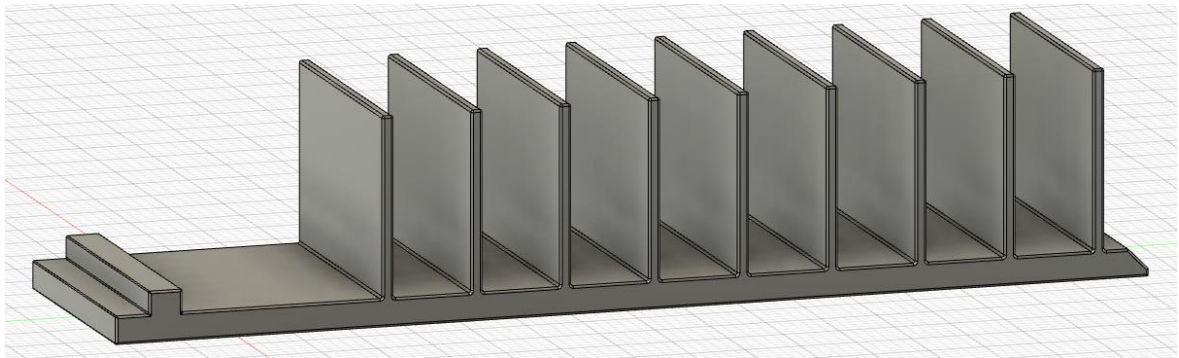
Основа камери другого схоплювача має висоту 1,3 мм, а довжину 93 мм. Дані матриці зроблені таким чином, щоб їх можна було використовувати повторно, а так як при готовності камеру необхідно зламати, то такі прес-форми камер є одноразові.

На рисунку 4.4 зображено матрицю третього приводу. Всі розроблені матриці мають загальну ширину 16 мм та між зовнішньою та внутрішньою стінкою ширина становить 2 мм. Всі інші параметри приводів зазначені в таблицях 4.1-4.2.



а)

б)



в)

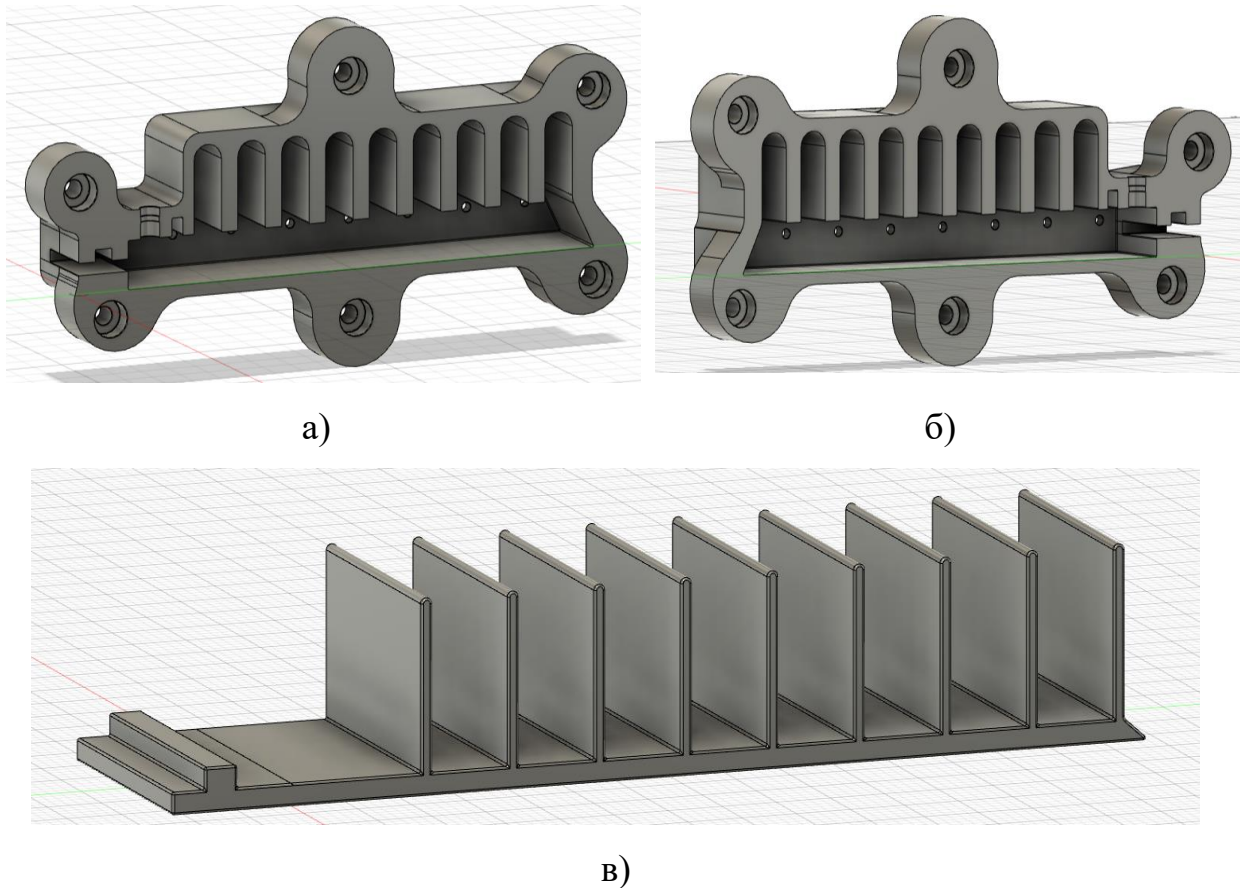
а) матриця лівої частини третього схвату;

б) матриця правої частини третього схвату;

в) прес-форма третьої камери

Рисунок 4.4 – Прес-форми третього схвату

На рисунку 4.5 зображено прес-форма четвертого акuatorу. Як можна побачити, загальний вигляд всіх матриць має майже однаковий вигляд, відмінності полягають в декількох параметрах, таких як висота та довжина, а основна різниця є в середині матриці, які вже повторюють будову змодельованих топології приводів.



- а) прес-форма лівої частини четвертого схвату;
 б) прес-форма правої частини четвертого схвату;
 в) прес-форма четвертої камери

Рисунок 4.5 – Прес-форми четвертого схвату

Також з всіх рисунків можна побачити, що в змодельованій матриці немає гострих кутів. Всі кути мають невеликий «offset», які становлять 0,1 мм або 0,2 мм. Це зроблено для того, щоб зменшити ризик розколу форми при 3D-друці. Бо гострі кути досить легко зламати і принтер не завжди їх чітко друкують.

На рисунку 4.6 зображена зібрана прес-форма, як повинна виглядати при заливці матеріалу в матрицю.

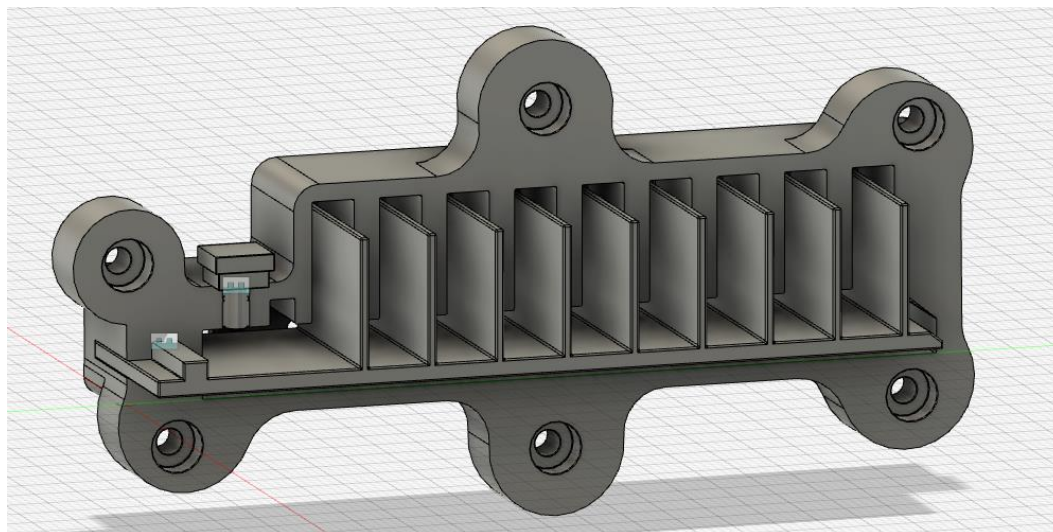


Рисунок 4.6 – Прес-форма в зібраному виді

У таблиці 4.1 представлені всі параметри розроблених прес-форм.

Таблиця 4.1 – Параметри прес-форм

Параметр	Значення
Ширина всієї матриці	16 мм
Ширина закріплюваної частини	8 мм
Ширина між зовнішньою та внутрішньою стінкою	2 мм
Довжина	99 мм; 98 мм; 94 мм; 93,6 мм
Висота без закріплень	26 мм; 29 мм; 26,9 мм; 26,5 мм
Діаметр отвір для витікання залишку матеріалу	1,5 мм
Діаметр отвір для головки болта	6 мм
Діаметр отвір для болтів	3 мм
Ширина закріплюваного зубця	3 мм
Довжина закріплюваної частини	11 мм
Діаметр заокругленої частини	8 мм

У таблиці 4.2 параметри камер прес-форм.

Таблиця 4.2 – Параметри змодельованих камер

Параметр	Камера 1	Камера 2	Камера 3	Камера 4
Висота від основи	2 мм	1,34 мм	2,5 мм	2 мм
Довжина	93 мм	94 мм	93 мм	90 мм
Висота з камерами	17 мм	15,35 мм	18,5 мм	17 мм

4.2 Виготовлення макета м'яких захоплювачів

Наступним кроком після розроблення прес-форм було їх надрукування на 3D-принтері з PLA-пластику. В загальній сумі всі необхідні деталі друкувались приблизно 15 годин. На рисунку 4.7 зображено надруковані деталі.

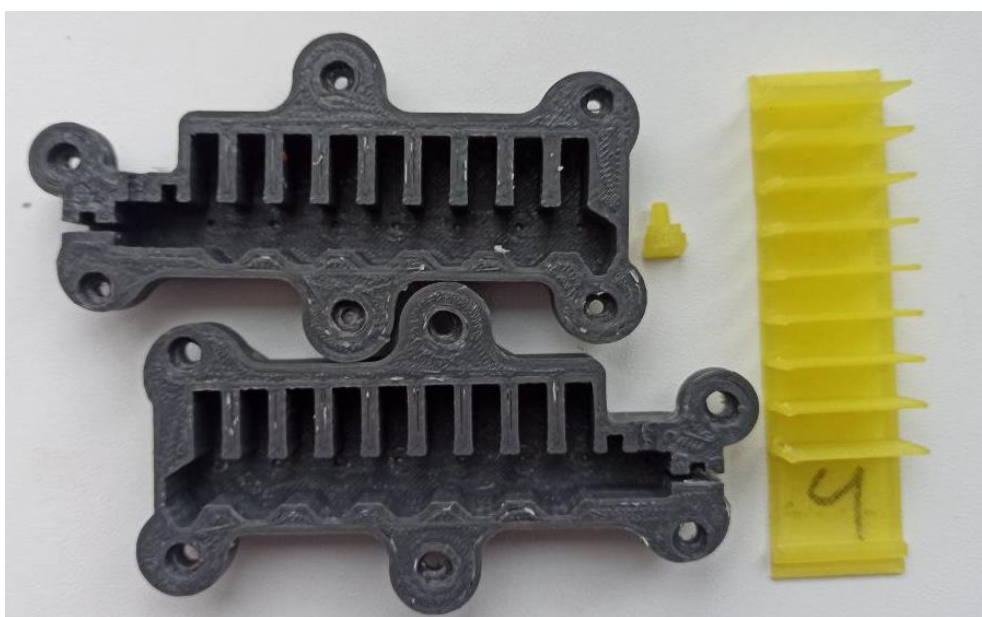


Рисунок 4.7 – Надруковані деталі прес-форм

Для виготовлення фізичної моделі захватного пристрою було вирішено обрати силікон ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33 для середньої твердості. Даний силікон за своїми технічними характеристиками побідний на силікон DragonSkin30, який краще всього підходить для виготовлення таких схатів. Також вибір ґрунтувався на тому, що симуляцію проводили з DragonSkin30, а

цей силікон зараз важко дістати в Україні. Технічні характеристики ЕЛАСТОЛЮКС представлені у таблиці 4.3.

Таблиця 4.3 – Технічні характеристики силікону ЕЛАСТОЛЮКС [31]

Характеристика	Значення
Твердість за Шором	33 А
В'язкість	20000 ср
Відносне подовження при розриві	600 %
Міцність на розрив	5 МПа
Час повного затвердіння	1-24 г

Порівнюючи таблицю 1.1 та 4.3 можна сказати, що характеристика майже подібні.

Перед тим як був залитий в прес-форми силікон, надруковані деталі ошліфувались, для того щоб прибрати надлишки пластику.

Для того, щоб виготовити фізичну модель з матриці, спочатку необхідної її покрити роздільником, так як для виготовлення приводу використовується силікон на платиновій основі, а він може окислюватися зі смолами та певними видами пластику, і якщо не змазати прес-форму то на краях силікон не застигне і схват буде недієздатним. В даному випадку було обрано вазелін в якості роздільника.

Силікон ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33 змішується в пропорції 1:1. Перша частина це основа, а друга – каталізатор або його називають ще затверджувач. Силікон змішується з пластмасовій формі та ретельно перемішується, приблизно 3-4 хв, для того щоб більше повітря вийшло з силікону перед тим як заливати в матрицю. Далі силікон заливається у форму та 2 хв дві частини форми стоять окрема, це зроблено для того щоб прибрати повітряні бульбашки з форм (рис. 4.8). Всього для одного захвату виходить приблизно 50 г силікону. Потім всі частини прес-форми з'єднуються шістьма

болтами М4х18 . На рисунку 4.9 зображено зібрану прес-форму з залитим силіконом.



Рисунок 4.8 – Залитий силікон в праву прес-форму



Рисунок 4.9 – Зібрана прес-форма

На весь цей процес є приблизно 60 хв, бо саме такий час життя даного силікону. Залитий силікон залишається застигати на добу, а саме 24 год при температурі повітря не нижче 25 °С, цей фактор є дуже важливим, бо якщо

температура буде нижчою то силікон не затвердіє. Дана модель застигала 22 години при температурі 28-33 °С.

Після того, як силікон затвердіє його необхідно спочатку з однієї частини дістати, а потім тримаючи за кріплення з другої частини. Все робити необхідно повільно, щоб не пошкодити схват. На рисунку 4.10 зображено схват, який витягнутий з правої матриці.

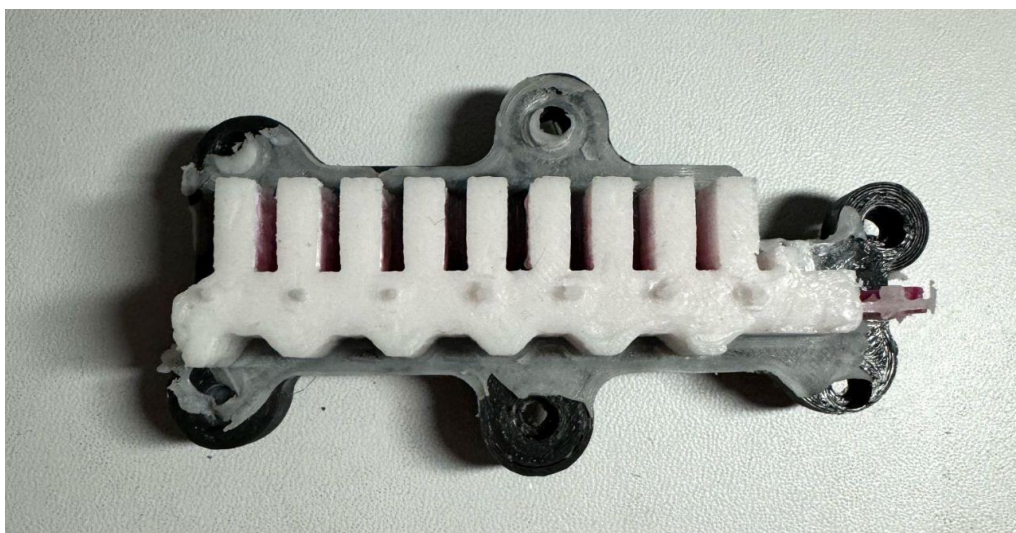


Рисунок 4.10 – Привод витягнутої з правої матриці

Після того, як схват витягнутий з матриці, він має вигляд, який зображено на рисунку 4.11.

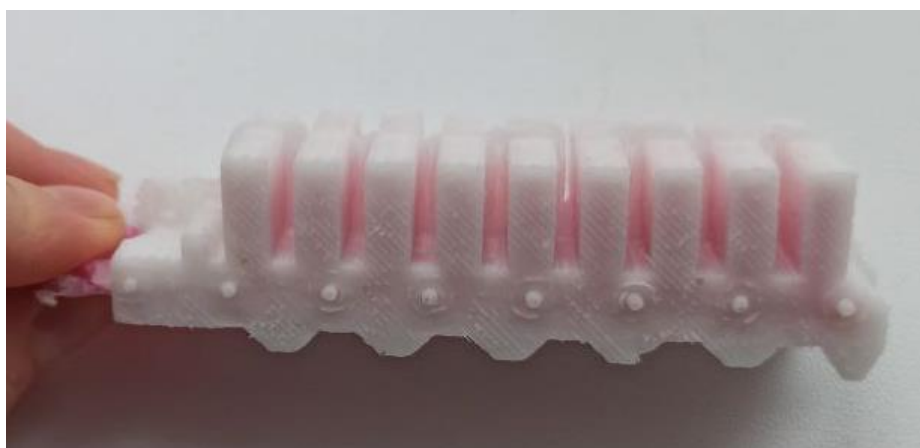


Рисунок 4.11 – Витягнута модель з матриць

З рисунку можна побачити, що висвічується рожева матриця форма. Спочатку було зламано кожен зубець в обидві сторони, витягнута основа та пінцетом витягнутий кожен зубець окремо. На рисунку 4.12 зображено форму матриці після того, як її витягли с схвату.

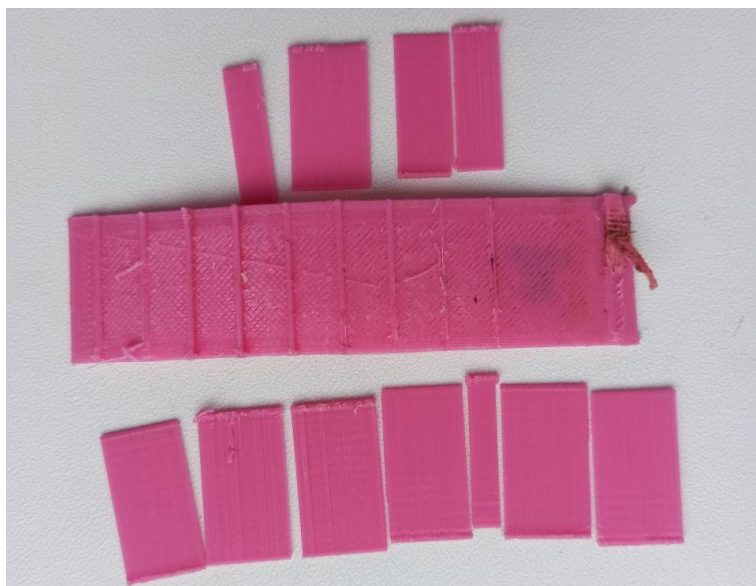


Рисунок 4.12 – Витягнута матриця камери

Готова фізична модель м'якого схоплювача зображена на рисунку 4.13.



Рисунок 4.13 – Готова фізична модель м'якого схвату

4.3 Зборка конструкції кінцевого ефектору з м'яким схватом

На рисунку 4.14 зображено задню частину приводу.



Рисунок 4.14 – Задня частина приводу

На даному рисунку видно, що після того як форма камери була витягнута в задній частині залишається отвір. Щоб закрити отвір було змодельовані затвори для кожного схвату. Всі вони є однаковими тільки відрізняються за розмірами отвору. На рисунку 4.15 зображений надрукований затвор.



Рисунок 4.15 – Надрукований на 3D-принтері затвор

Даний затвор вставляється в отвір та для додаткової надійності покривається весь герметиком, щоб при активації захвату повітря невиходило. На рисунку 4.16 зображено закритий задню частину привода з закритим отвором.

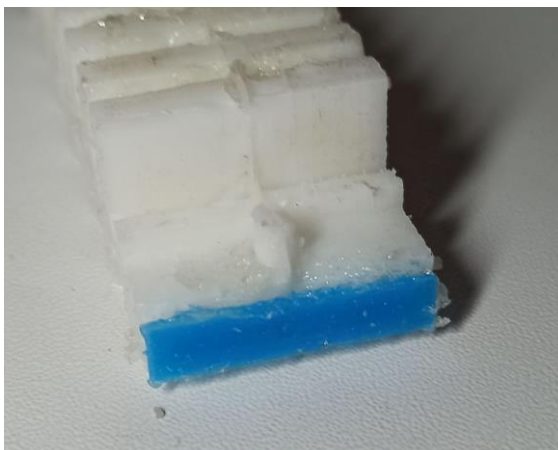


Рисунок 4.16 – Задня частина з затвором

Також було змодельоване маніпуляційне кільце для утримання декількох приводів, яке закріплюється на маніпулятор. Щоб закріпити приводи на дане кільце було змодельований фіксатор м'яких приводів на рисунку 4.17 зображено верхня та нижня частина фіксатора.



а)



б)

а) верхня частина фіксатора

б) нижня частина фіксатора

Рисунок 4.17 – Змодельовані та надруковані на 3D-принтері деталі для кріплення до маніпулятора

На рисунку 4.18 зображений фіксатор в зібраній формі та загальний вигляд маніпуляційного кільця.



а)



б)

а) фіксатор в зібраному вигляді

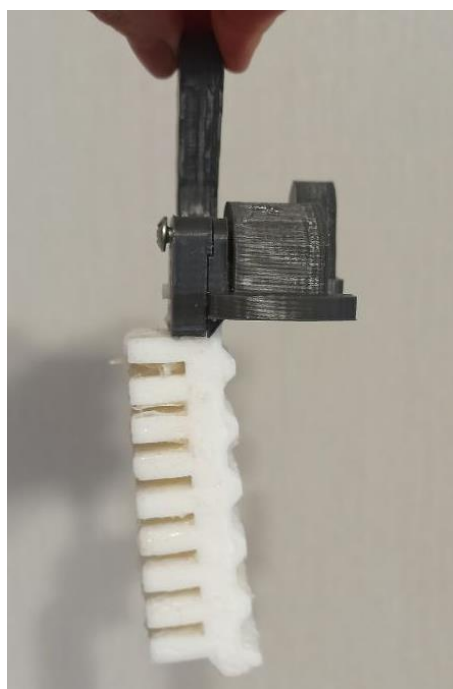
б) маніпуляційне кільце

Рисунок 4.18 – Загальний вигляд фіксатора в зібраному вигляді та маніпуляційне кільце надруковане на 3D-принтері

Повністю зідраний кінцевий ефектор для РМ зображено на рисунку 4.19.



а)



б)

а) кінцевий ефектор вид прямо;

б) кінцевий ефектор вид збоку

Рисунок 4.19 – Кінцевий ефектор з м'яким приводом

Через повітряні бульбашки при застиганні силікони, які неможливо повністю прибрати без додаткового обладнання, зробити фізичну модель повністю герметичної не має змоги. Також був спосіб замазати герметиком всі створені від бульбашок отвори, що можна побачити з рисунку 4.19, але повністю їх закрити не вийшло.

Також слід зазначити, що даний силікон є аналогом DragonSkin30, який є більш жорстким на відміну від звичайних силіконів і дані приводи є одного розміру зі шприцом і повітря, яке він може дати недостатньо для активації захвату.

4.4 Розрахунки мікроклімату та освітленості

Виготовлення макету м'якого схвату відбувається в лабораторії з використанням 3D-принтера. Для забезпечення оптимальних умов праці важливо дотримуватися визначених правил.

Розрахунки мікроклімату та освітлення в лабораторії при роботі там є важливими показниками, оскільки вони впливають на комфорт та безпеку людини. У лабораторних приміщеннях на робочих місцях повинно забезпечуватись оптимальні значення параметрів мікроклімату, а саме температури, відносної вологості та рухливості повітря, враховуючи вимоги стандартів, таких як ГОСТ 12.1.005-88 та ДСН 3.3.6.042-99, для забезпечення здорових та безпечних умов праці [32].

При виконанні роботи в лабораторії з 3D-принтерами під час холодного періоду року необхідно підтримувати температуру повітря у межах 22-24 °C, а в теплий період: від 23 до 24 °C. Відносна вологість повинна бути в діапазоні 40-60%, а також швидкість руху повітря має бути на рівні 0,1 м/с для забезпечення комфортних умов праці.

Світло є одним з ключових елементів робочого середовища і забезпечує візуальний зв'язок між працівниками та навколишнім середовищем, тому дотримання правил освітленості в лабораторії є необхідним для безпечної

роботи. Площа даної лабораторії становить 20 м^2 з 5 лампочками, потужність кожної становить 60 Вт. Штучне освітлення розраховується за методом питомої потужності, яку має формулу:

$$\omega = \frac{P_0}{S}, \quad (4.1)$$

де P_0 – потужність всіх ламп;

S – площа освітленої ділянки.

За формулою (4.1) матимемо результат:

$$\omega = \frac{300}{20} = 15 \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2}.$$

Відповідно до вимог ДБН В. 2.5-28-2006 стосовно штучного освітлення, значення питомої потужності, яке складає 15, відповідає стандартам для досягнення освітленості на рівні 300 лк.

4.5 Висновки до четвертого розділу

В четвертому розділі було розроблено та надруковано на 3D-принтері прес-форми для виготовлення фізичної моделі м'яких приводів. Загалом для виготовлення одного м'якого схвату необхідна матриця, яка складається з чотирьох частин, а саме правої та лівої закріплюваної прес-форми, камери та заглушки. Для виготовлення м'яких приводів використовувався силікон ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33, який за своїми технічними характеристиками подібний до DragonSkin30. Для того щоб створити фізичну модель м'яких приводів форми треба спочатку було змазати вазеліном матриці, щоб силікон легко відійшов від форми, далі змішати основу силікону з каталізатором та ретельно перемішати, щоб прибрати повітряні бульбашки які виникають при

змішуванні. Потім було заповнено матрицю силікон, для всієї форми знадобилося 50 г силікону, та з'єднали їх воєдино та залишити до повного затвердіння, це становить приблизно 24 години при температурі 25-33 °С. Після того як силікон застиг, його дістали з форми та витягнули прес-форму камери, зламавши при цьому всі зубці.

Коли фізична модель була готова отвір з якого витягували форму камери закрили затвором використовуючи герметик, для більш надійного закріплення та вставили інфузійну трубки для закачування повітря в середину камер для активації захвату. Також для закріплення м'якого приводу на маніпулятор, було змодельовані та виготовлені фіксатори, які з зібраному становищі представляють собою кінцевий ефектор з м'яким захоплювачем.

ВИСНОВКИ

В магістерській кваліфікаційній роботі було проведено аналіз схватних пристроїв робота маніпулятора з м'яким захопленням, а саме проаналізовано види м'яких схватів, топології м'яких захоплень методу FEA та матеріали для виготовлення м'яких захоплень. Базуючись на цьому аналізі було обрано технологію м'якого приводу, визначено актуальність даної теми, мету роботи, об'єкт розробки, предмет розробки та поставлені задачі, які необхідно виконати для досягнення поставленої мети.

В другому розділі було обрано середовище моделювання м'яких приводів, це: Fusion360 та змодельовані чотири топології м'яких схватів, які відрізняються між собою за різними геометричними характеристиками, для майбутнього порівняння їх при роботі. Також в даному розділі було розроблено кінетичну модель м'яких схватів.

Наступним етапом було проведення експерименту, щоб зрозуміти, в яких умовах краще всього буде працювати змодельовані приводи. Експеримент проводився для різних вхідних тисків, а саме: 10 кПа, 30 кПа, 50 кПа та 80 кПа. Всі тестування показали, що захвати є дієздатними, але кути вигину відрізняються.

Перший схват показав, що при вхідному тиску 10 кПа вигин становить 53° , при 30 кПа вигин дорівнює 95° , 158° при 50 кПа і при 80 кПа вигин вже 180° , що є максимальним вигином. Дана топологія може працювати, як один так і в поєднанні двох і більше схватів.

Другий привод має кути вигину: 50° , 93° , 136° і при останньому експерименті з 80 кПа кут вигину становить 161° .

Третя топологія має найменші кути вигину, тому може працювати тільки в системі. Кут при першому тестуванні був 47° , при 30 кПа кут становив 82° , від вхідного тиску 50 кПа кут дорівнює 98° і при 80 кПа вигин має кут 108° .

І останній четвертий схоплювач має кути вигину при 10 кПа – 52°, при 30 кПа вигин становить 95°, при 50 кПа кут дорівнює 151° та при вхідному тиску 80 кПа кут вже 177°. Даний схват так само може працювати, як один так і в системі з іншими.

Слід вказати, що максимальний об'єм захоплюваних об'єктів становить приблизно 55 мм. І такі схвати не можуть підіймати важкі об'єкти на відміну від традиційних КЕ.

В останньому розділі було розроблено матриці м'яких приводів для створення фізичних макетів м'яких схватів. Всього для одного схвату було створено чотири деталі прес-форми, це: права та ліва частина форми, камера та заглушка для отвору подачі повітря. Всі змодельовані деталі було надруковано на 3D-принтері з PLA пластику, даний пластик не містить смоли, що дозволить силікону на платиновій основі отвердіти. Силікон для фізичних моделей використовувався ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33, який є аналогом силікону DragonSkin30. Для виготовлення макету знадобилося 50 г силікону. Затвердіння відбулося за 22 години при температурі 28-33 °С.

Для розробленого макету було змодельовані та надруковані кріплення до маніпуляційної частини РМ, що і представляють собою КЕ.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАНЬ

1. Методичні вказівки з підготовки та захисту кваліфікаційної роботи здобувачами другого (магістерського) рівня вищої освіти спеціальності 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології, освітньо-професійних програм: «Автоматизоване управління технологічними процесами», «Комп'ютерно-інтегровані технологічні процеси і виробництва», «Комп'ютеризовані та робототехнічні системи» / Упоряд. І. Ш. Невлюдов, Р. В. Артюх, В. В. Безкоровайний, Н. П. Демська, В. В. Євсєєв, О. І. Филипенко, О. М. Цимбал. – Харків: ХНУРЕ, 2021. – 55 с
2. ДСТУ 3008-15. Документація. Звіти у сфері науки та техніки. структура та правила оформлення. Введ. 2015-06-22. К. Держстандарт України, 2017. 29 с.
3. Лучанінова О. Ю. Робот-маніпулятор з м'яким захопленням / О. Ю. Лучанінова // «Automation and Development of Electronic Devices» ADED-2022 : Collection of Students' Scientific Paper. – Kharkiv : Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics [electronic edition], 2022. – Part 2. – P. 122-126.
4. Robotic Manipulator Ultimate Guide: Definition, Parts, Applications // Shenchong, 30 серпня 2022р. URL: <https://www.shenchong.com/robotic-manipulator-definition-parts-applications.html> (дата звернення: 10.10.2023).
5. Проектування мобільних маніпуляційних роботів : монографія / І. Ш. Невлюдов, А. О. Андрусевич, В. В. Євсєєв, С. П. Новоселов, Н. П. Демська ; М-во освіти і науки України, Харків. нац. ун-т радіоелектроніки. – Харків : ХНУРЕ, 2022. – 427 с.
6. What are End Effectors in Robotics? Types of End Effectors, Applications, Future // Wevolver, 23 лютого 2023р. URL: <https://www.wevolver.com/article/what-are-end-effectors-in-robotics-types-of-end-effectors-applications-future> (дата звернення: 11.10.2023).

7. Yuhao Wang. Dielectric elastomer actuators for artificial muscles: A comprehensive review of soft robot explorations / Yuhao Wang, Xuzhi Ma, Yingjie Jiang та іх. // Resources Chemicals and Materials. – 2022. –Vol. 1. – P. 308-324.
8. Jianshu Zhou. A Soft-Robotic Gripper With Enhanced ObjectAdaptation and Grasping Reliability / Jianshu Zhou, Student Member, Shu Chen та іх. // IEEE ROBOTICS AND AUTOMATION LETTERS. –2017. –VOL. 2. – P. 2287-2293.
9. L. Sun. Stimulus-responsive shape memory materials: A review / L. Sun, W.M. Huang, Z. Ding та іх. // Materials & Design. –2012. – Vol. 33. – P. 577-640.
10. Jun Shintake. Soft Robotic Grippers / Jun Shintake, Vito Cacucciolo, Dario Floreano, Herbert Shea. // Advanced Materials. –2018. –Vol. 30.
11. Changhong Linghu. Universal SMP gripper with massive and selective capabilities for multiscaled, arbitrarily shaped objects / Changhong Linghu, Shun Zhang, Chengjun Wang та іх. // SCIENCE ADVANCES. –2020. –Vol. 6.
12. M. Dzareeeful F. Abdullah. Development of shape memory allow (SMA) based artificial muscle for application in soft gripper / M. Dzareeeful F. Abdullah, Azni Nabela Wahid, Asan G.A. Muthalif. // Journal of Engineering Science and Technology. –2023. –Vol. 18. –P. 1413-1426.
13. Liu M. A novel design of shape-memory alloy-based soft robotic gripper with variable stiffness / Liu M, Hao L, Zhang W, Zhao Z. // International Journal of Advanced Robotic Systems. –2020. –Vol. 17.
14. Jung-Hwan. Dielectric Elastomer Actuator for Soft Robotics Applications and Challenges / Youn, Jung-Hwan, Seung Mo Jeong та іх. // Applied Sciences. – 2020. –Vol. 10.
15. F. Ouyang. An Optimization Design Method of Rigid-Flexible Soft Fingers Based on Dielectric Elastomer Actuators / Ouyang, Fuhao, Yuanlin Guan, Chunyu Yu та іх. // Micromachines. –2022. –Vol. 13.
16. Amir Pagoli. Review of soft fluidic actuators: classification and materials modeling analysis / Amir Pagoli, Frédéric Chapelle, Juan-Antonio Corrales-Ramon та іх. // Smart Materials and Structures. –2022. –Vol. 31.

17. Zhang H. Design, Fabrication, and Performance Test of a New Type of Soft-Robotic Gripper for Grasping / Zhang H, Liu W, Yu M, Hou Y. // *Sensors*. – 2022. –Vol. 22.

18. Fedchishina M.V. Analysis of the parameters influencing the quality manufacture of flexible accessories / Fedchishina M.V. // *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології у виробництві та освіті: стан, досягнення, перспективи розвитку: матеріали Всеукраїнської науково-практичної Internet-конференції*. – Черкаси, 2018. –С. 9-12.

19. Chih-Hsing Liu. Topology Optimization Design and Experiment of a Soft Pneumatic Bending Actuator for Grasping Applications / Chih-Hsing Liu, Li-Jyun Chen, Jui-Chih Chi, Jyun-Yi Wu. // *IEEE Robotics and Automation Letters*. –2022. –Vol.7. –P. 2086-2093.

20. Handling Nets and Bags with GorillaFingers // *SoftGripping*. URL: https://soft-gripping.com/assets/downloads/wp_nets_and_bags.pdf (дата звернення: 15.10.2023).

21. Rad C. Data-Driven Kinematic Model of PneuNets Bending Actuators for Soft Grasping Tasks / Rad C, Hancu O, Lapusan C. // *Actuators*. –2022. –Vol.11.

22. Matheus S. Xavier. Finite Element Modeling of Soft Fluidic Actuators: Overview and Recent Developments / Matheus S. Xavier, Andrew J. Fleming, Yuen K. Yong. // *Advanced Intelligent Systems*. –2020. –Vol. 3.

23. Luc Marechal. Toward a Common Framework and Database of Materials for Soft Robotics / Luc Marechal, Pascale Balland, Lukas Lindenroth та ін. // *Soft Robotics*. –2021. –Vol.8. –P. 284-297.

24. Ecoflex™ Series. Super-Soft, Addition Cure Silicone Rubbers // *Smooth-On*. URL: https://www.smooth-on.com/tb/files/ECOFLEX_SERIES_TB.pdf (дата звернення: 18.10.2023).

25. Dragon Skin™ Series. Addition Cure Silicone Rubber Compounds // *Smooth-On*. URL: https://www.smooth-on.com/tb/files/DRAGON_SKIN_SERIES_TB.pdf (дата звернення: 18.10.2023).

26. Smooth-Sil™ Series. Addition Cure Silicone Rubber Compounds // Smooth-On. URL: https://www.smooth-on.com/tb/files/SMOOTH-SIL_SERIES_TB.pdf (дата звернення: 18.10.2023).

27. Lissette Wilhelm. A thesis: Design of 3D-Printed Soft Pneumatic Actuator for Robotic Fruit Harvesting/ Oregon State University, Oregon 2022.

28. Autodesk Fusion 360: More than CAD, it's the future of design and manufacturing // Autodesk. URL: <https://www.autodesk.com/products/fusion-360/overview?term=1-YEAR&tab=subscription&plc=F360> (дата звернення: 05.12.2023).

29. Jing Lei. Design and Manufacture of a Flexible Pneumatic Soft Gripper / Jing Lei, Zhenghao Ge, Pengju Fan та ін. // Applied Sciences. –2022. Vol. 12.

30. Abaqus. Finite Element Analysis for Mechanical Engineering and Civil Engineering // Dassault Systems. URL: <https://www.3ds.com/products/simulia/abaqus> (дата звернення: 10.12.2023).

31. Силікон для форм ЕЛАСТОЛЮКС Платинум 33 білий середньої твердості // Інститут в'яжучих та адгезивів. URL: <https://elasto.com.ua/ua/p35868557-silikon-dlya-form.html> (дата звернення: 15.12.2023).

32. Охорона праці в офісі. Вимоги до робочого місця офісного працівника // Сайт GCC. URL: <https://gc.ua/uk/oxorona-praci-v-ofisi-vimogi-do-robochogo-miscya-ofisnogo-pracivnika/> (дата звернення: 03.01.2024).