

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
СУМСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Факультет електроніки та інформаційних технологій

Кафедра наноелектроніки та модифікації поверхні

**БАКАЛАВРСЬКА РОБОТА**

зі спеціальності 153 – «Мікро- та наносистемна техніка»

на тему:

**«Аналіз процесу збирання комплексних 3D мезоструктур з багаточарових матеріалів»**

**Радченко Денис Ярославович**

**Завідувач кафедру**

\_\_\_\_\_ проф. О.Д.Погребняк

**Науковий керівник**

\_\_\_\_\_ доц. О.В. Ющенко

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

«\_\_» \_\_\_\_\_ 2021 р.

Суми 2021

## РЕФЕРАТ

Об'єктом дослідження бакалаврської роботи є процес збирання 3D мезоструктур методом стискаючого-вигину.

Мета роботи полягає у дослідженні нового методу збирання 3D мезоструктур та аналіз характеристик цих структур.

Під час виконання роботи використовувалися: програмне забезпечення Solidwork; FEM аналіз.

У даній роботі було досліджено два види 3D мезоструктур зібраних методом стискаючого-вигину з підтримкою та без із трьох різних матеріалів: мідь (Cu), поліімід (PI), поліетилентерфелат (PET).

Робота викладена на 51 сторінці, у тому числі містить 23 малюнки, 8 таблиць, список цитованої літератури із 14 джерел.

**КЛЮЧОВІ СЛОВА:** 3D МЕЗОСТРУКТУРА, FEM АНАЛІЗ, СТИСКАЮЧИЙ-ВИГИН.

## ЗМІСТ

<b>ВСТУП</b> .....	4
<b>РОЗДІЛ 1. АНАЛІТИЧНИЙ ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРИ</b> .....	6
1.1 3D багат шарові мезоструктури з повністю окремими конфігураціями .....	6
1.2 3D багат шарові мезоструктури з допоміжними функціями.....	11
1.3 3D багат шарові мезоструктури з переплетіннями.....	16
1.4 3D мезоструктури с когерентно зв'язаними багат шаровими шарами методом селективного зв'язування.....	19
<b>РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКА СТВОРЕННЯ 3D ЗРАЗКУ ТА ПІДГОТОВКА ДО FEM АНАЛІЗУ</b> .....	23
2.1 Створення 3D зразку.....	23
2.2 Підготовка до FEM аналізу.....	27
<b>РОЗДІЛ 3. РЕЗУЛЬТАТИ ДОСЛІДЖЕНЬ</b> .....	32
3.1 Матеріали.....	32
3.2 Аналіз результатів симуляції.....	35
<b>РОЗДІЛ 4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПЕРСОНАЛЬНИМ КОМП'ЮТЕРОМ</b> .....	45
<b>ВИСНОВКИ</b> .....	48
<b>СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ</b> .....	50

## Вступ

Складні, тривимірні (3D) мезоструктур повсюдно зустрічаються в біології. Технології з аналогічними 3D-архітектурою можуть мати широке застосування в біомедичних пристроях, мікроелектромеханічних системах, метаматеріалів, батареях, фотонних та оптоелектронних компонентах та інших областях, де в даний час домінують традиційні, площинні архітектури. Основна проблема при реалізації цих систем полягає у відсутності методів виготовлення / збірки, які одночасно забезпечували б доступ до 3D-геометрії з необхідними мікро/нано розмірами елементів і з необхідними класами функціональних матеріалів. Наприклад, методи тривимірного друку і двухфотонної / багатифотонної літографії забезпечують високу роздільну здатність і структурну універсальність, але не можуть використовуватися з напівпровідниковими приладами. Підходи, засновані на деформаційному вигині / фальцюванню, сумісні з передовими матеріалами в звичайних 2D мікросистемах, але доступний діапазон 3D-геометрії обмежений. Деякі роботи показують, що цими 2D-структурами можна маніпулювати концептуально інакше, шляхом стискаючого вигину, викликаного еластомірною підтримкою, що дозволяє отримати широкий спектр 3D-архітектур, що характеризуються відкритими сітками, ниткоподібними мережами, збірками пластин / мембран, а також різними комбінаціями. Тут 2D прекурсори, селективно пов'язані в літографічно певних ділянках з попередньо напруженим еластоміром, при вивільненні попереднього напруження геометрично перетворюються в детерміністично керовані 3D-архітектури. Характер процесів вигину (наприклад, пропорційна залежність максимальної деформації матеріалу від товщини прекурсора) в цих випадках обмежує діапазон реалізованих тривимірних мезоструктур в порівнянні з тими, які мають відкриту геометрію з переважно порожніми внутрішніми областями. Тут використовуються багатосарові 2D прекурсори, які можуть бути реалізовані для збірки якісно різних класів 3D мезоструктур, що характеризуються суттєво підвищеними коефіцієнтами заповнення

(наприклад, більш ніж в три рази в багатьох розглянутих тут прикладах). Набір нових технологій виготовлення і концепцій дизайну розширює концепції в збірці з вигином, дозволяючи багатошарове штабелювання незалежно виготовлених 2D прекурсорів (кожен з яких з різними матеріалами, розмірами і малюнками) і окремі, літографічно певні колекції місць з'єднання між кожним з цих шарів і попередньо напруженою підкладкою. Отримані мезоструктури мають рівень геометричної складності, недосяжний для одношарових 2D прекурсорів. Наприклад, спеціалізовані схеми забезпечують локальні силові приводи і структурні опори для 3D-геометрії, які в іншому випадку були б недосяжні. В даній роботі буде показано декілька різновидів 3D структур, сформованих з використанням кремнію, полімеру, металу, і їх гетерогенних комбінацій, кожна з яких має унікальні рівнями топологічної складності і структурної стійкості. Крім того, застосування в антенах технологій зв'язку ближнього поля (NFC) демонструє корисність трансформованих тривимірних геометрій з багатошарових 2D-попередників для підвищення коефіцієнта якості (Q) і поліпшення робочого кута в порівнянні зі звичайними двомірними аналогами.

## 1. Дослідження

### 1.1 3D багат шарові мезоструктури з повністю окремими конфігураціями

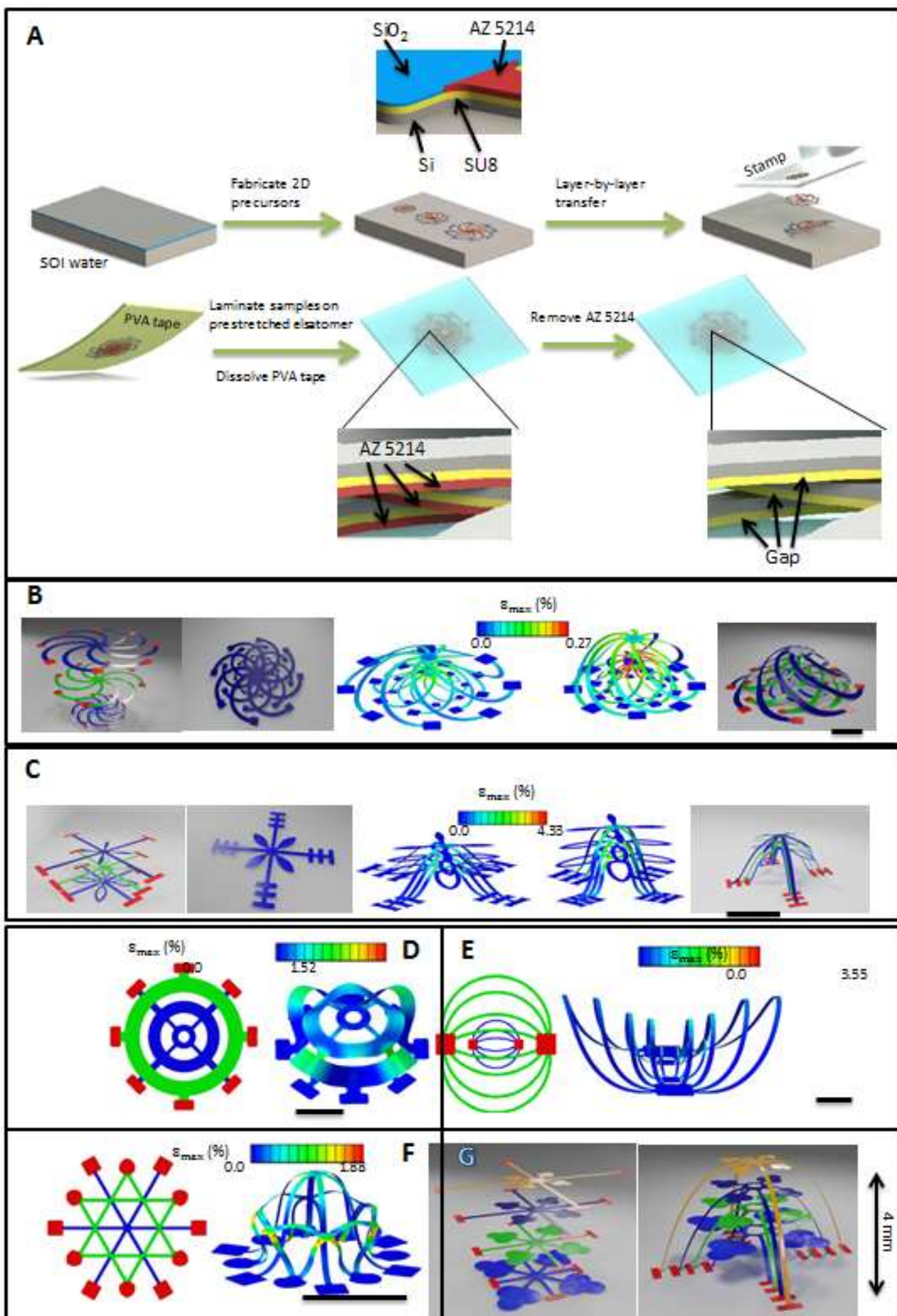
На рис. 1 представлені концепції проектування, підходи до складання і процеси виготовлення тривимірних мезоструктур з вивільняючих багат шарових 2D-попередників, утворених за допомогою пошарового трансферного друку. Показовий приклад тришарових вкладених кремнієвих сепараторів представлений на рис. 1 (А і В). Процес починається з підготовки літографічно певних 2D-попередників кругових сіток в кремнієво-керамічних двошарових з трьома різними розмірами (радіуси, 1500, 1000 і 700 нм) на кремнієво-ізоляторних (SOI) пластинах (товщина 1,5 мкм). Жертовні шари (AZ 5214), візерункові поверх кожного 2D-попередника, визначають положення місць склеювання, а також дозволяють їх подальше вивільнення один від одного шляхом трансферного друку після укладання (з вирівнюванням центрів). Подача тришарової структури на попередньо напружену (~ 70%, однакову двовісну) силіконову підкладку з подальшим видаленням жертовних шарів і релаксацією попереднього напруження викликає стискаючі сили, що викликають незалежне поза площинне згинання кожного з трьох 2D-попередників для формування тривимірної вкладеної структури каркаса. Початковий та проміжний стан збірки, показані в двох лівих рамках рис. 1В, що вказує на те, що кожен шар збирається незалежно один від одного без будь-якої взаємодії між шарами в процесі вигину. Кінцева конфігурація відповідає вкладеним клітинам, які проілюстровані на трьох малюнках справа (рис. 1В). Зверніть увагу, що проміжна і кінцева конфігурації позначають форми тривимірної мезоструктур в зім'ятому стані, коли попереднє напруження частково і повністю розслаблене, відповідно. Колір в FEA ілюструє розподіл максимальних головних деформацій, вказуючи на те, що пікові значення залишаються значно нижче порогів руйнування (~ 2%) для силікону. На малюнку 1С представлений інший

приклад у вигляді тривимірної тришарової мікроструктури з епоксидної смоли, що нагадує дерево. Тут пошаровий трансферний друк на попередньо напруженої підкладці (60%) дозволяє здійснювати збірку; кінцева геометрія демонструє кількісну відповідність з передбаченнями FEA (праві дві рамки на рис. 1C). Ці концепції проектування і підходи до складання застосовні до тривимірних багатошарових мезоструктур з безліччю різних конфігурацій. Репрезентативні приклади на мікрошкالی включають двошарові сідла з епоксидної смоли (рис. 1E), коробки з кремнію (рис. 1F) і мембрани з кремнію (рис. 1D). Багатошарові 2D прекурсори, сформовані з різних матеріалів в різних шарах, дозволяють створювати тривимірні гетерогенні мезоструктури. Наприклад можна взяти структуру рис. 1B, в якій замінити нижній та верхній шари епоксидною смолою, а середній шар - кремнієм.

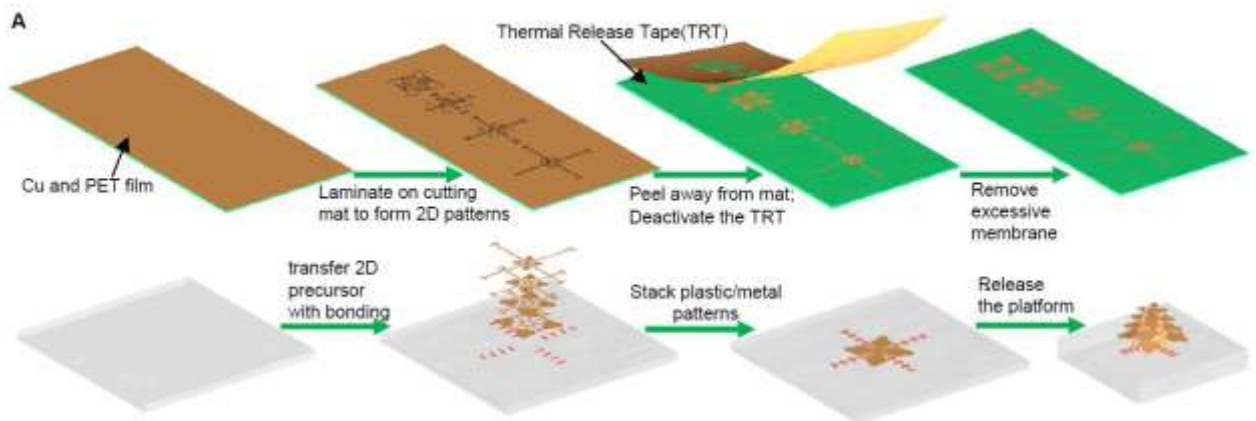
Методи механічного/ лазерного різання надають альтернативу фотолітографії для виготовлення багатошарових 2D-попередників з порівняно великими розмірами (наприклад, від  $\sim 100$  мм до декількох сантиметрів). Процес виготовлення схематично проілюстровано на Рис. 2. Висока складність 3D геометрії може бути досягнута за допомогою цих методів, як показано на прикладі Cu (1 мм) / PET (50 мм) заготовок на рис. 1 (G). Варіант деревовидної структури на рис. 1C, що складається з чотирьох шарів і складною "листовою" конфігурацією, проілюстрована на рис. 1G і рис. 1C. Стрічки, які безпосередньо з'єднуються з ділянками з'єднання, мають ширину  $\sim 300$  мм, а весь бічний розмір чотиришарового дерева становить менше 1 см. У всіх прикладах кінцева 3D-конфігурація може бути налаштована безперервно з використанням різних рівнів попередньої деформації. Залежність максимальних поза площинних зсувів різних верств від попереднього напруження для трьох репрезентативних прикладів показана на Рис. 3. Всі поза площинні зміщення різних верств зростають монотонно, щоб наблизитися до відповідних максимумів зі збільшенням попередньої деформації. У різних 3D-архітектурах на рис. 1 не спостерігається явних зморшок в контактних подушках, пов'язаних з

підкладкою, оскільки довжина хвилі зморшок для нескінченно великою плівки (з однаковою товщиною), спресованої з попередньо розтягнутої підкладкою з одного і того ж матеріалу, завжди більше, ніж характеристика контактних подушок плоского розміру, як правило,  $v > 2$  рази. Наприклад, кількісні розрахунки на основі представлених аналітичних моделей дають довжини хвиль зморшок  $\sim 0.43$ ,  $\sim 0.61$  і  $\sim 0.61$  мм для нижнього, середнього і верхнього шарів, відповідно, вкладених 3D-клітин (рис. 1В). Ці значення більше відповідних площинних розмірів ( $\sim 0.13$ ,  $\sim 0.2$  і  $\sim 0.3$  мм) квадратних сполучних колодок. На додаток до Cu / PET заготовлях ці ж методи можуть бути застосовані для формування тривимірних багат шарових структур в пластмасі.

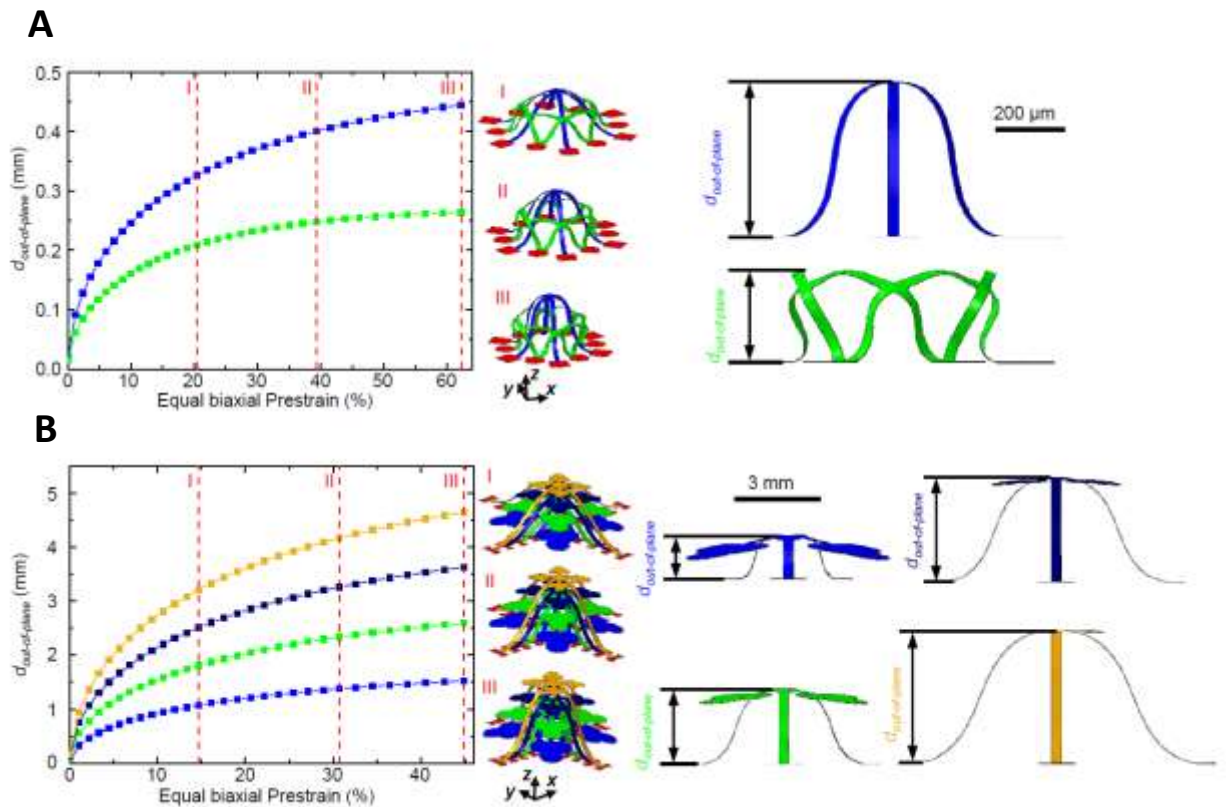




**Рис. 1.1** Процес детерміністичної збірки 3D мезоструктур з визволених, багатошарових, 2D прекурсорів та наочних прикладів. (A) Схематична ілюстрація процедур виготовлення тривимірних багатошарових мезоструктур з кремнію методом пошарового трансферного друку. (B) Роз'єдане уявлення трьох шарів прекурсорів, результати FEA, що описують формування тришарових вкладених сіток з кремнію, і відповідна 3D модель кінцевої конфігурації. (C) Аналогічні результати для тришарової 3D-мікроструктури з епоксидної смоли, що нагадує дерево. (Від D до F) Багатошарові 2D попередники, прогноз FEA для 3D мезоструктур і відповідна 3D модель для двошарових вкладених сітка з епоксидної смоли (E), двошарові вкладені коробки з кремнію (F), двошарові вкладені мембрани з кремнію (D). Вид 3D мезоструктури з двошарових мезоструктур, що складаються з міді (1 мм) і поліетилентерефталату (PET) (50 мм) чотиришарового "дерева" (I). Колір в результатах FEA від (B) до (G) відповідає величині максимальної основний деформації. Масштабні смуги, 400 мм (B та G) [1].



**Рис. 1.2** Процес детерміністичної збірки тривимірних багатошарових структур з використанням методів механічного різання [1].



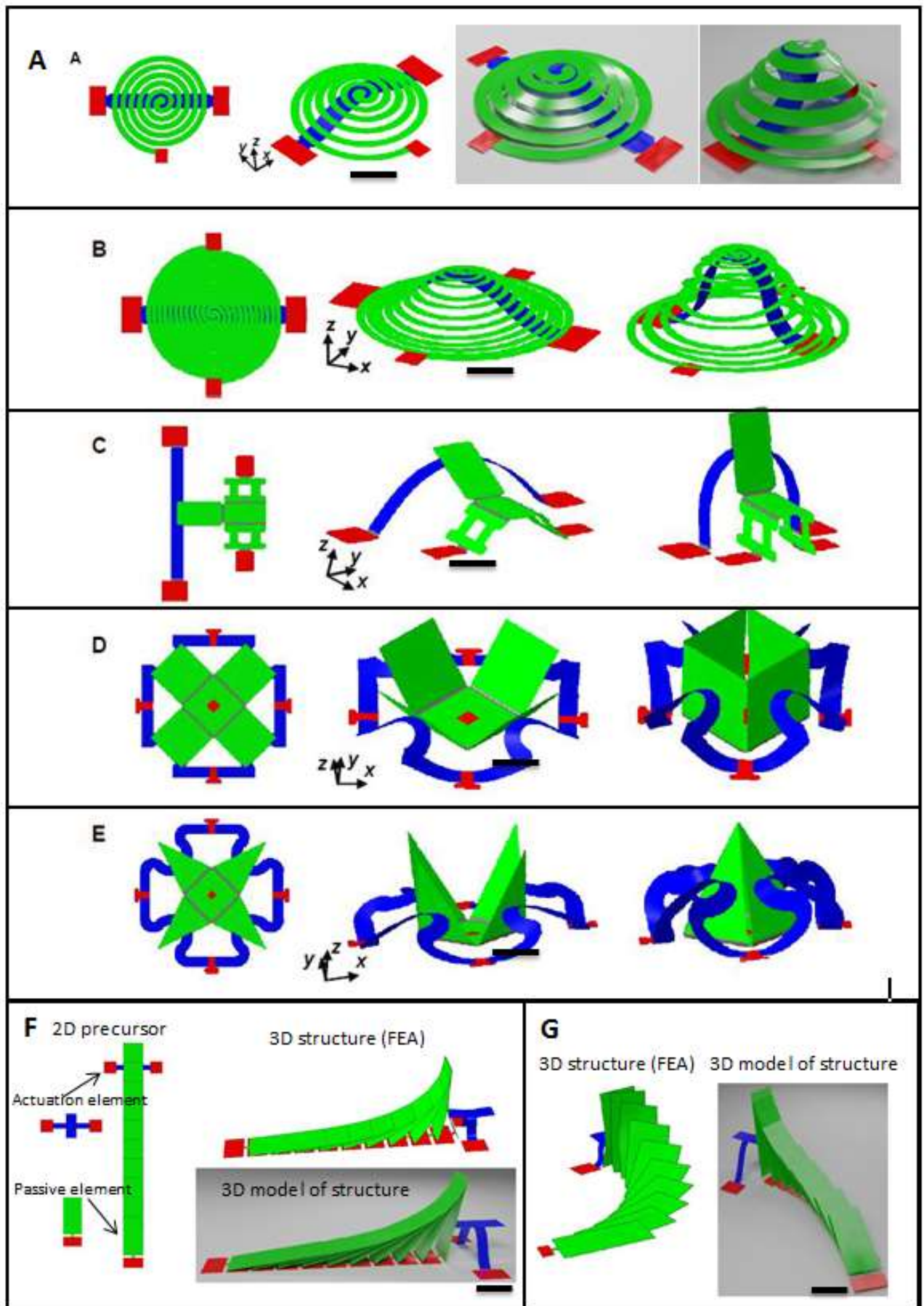
**Рис. 1.3** Результати FEA для максимального поза площинного зміщення (подвоєння площині) в різних шарах в порівнянні з попереднім напруженням в підкладці: (A) двошарові вкладені коробки, (B) чотиришарове "дерево" [1].

## 1.2 3D багат шарові мезоструктури з допоміжними функціями

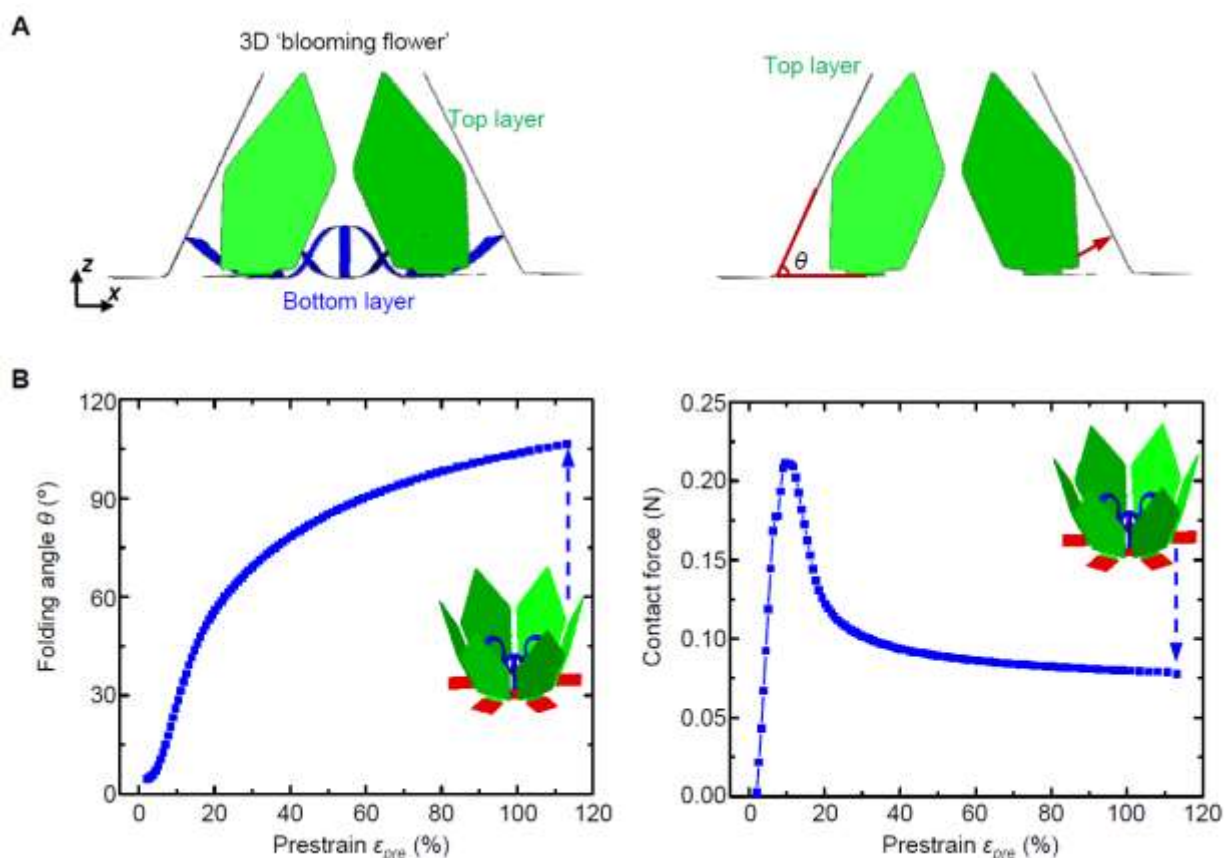
Кожен шар в прикладах на рис. 1 збирається незалежно, без механічних взаємодій з іншими шарами. Завдяки ретельному підбору геометрії різних шарів, місць їх з'єднання і рівнів попередньої деформації можна спроектувати індивідуальні взаємодії, які допоможуть в процесі складання і / або структурно стабілізувати кінцеву 3D-архітектуру. На рис. 2A наведені репрезентативні приклади взаємодіючих 3D біслойних мікроструктур з пластику але також можна використовувати поліїмид (PI), епоксидну смолу та мідні / PI двошарові шари. У лівій колонці показані компонування покладених 2D-попередників. Розслаблення попереднього напруження

ініціює поза площинне згинання шарів основи. Їх взаємодія з накладеними шарами передає в обраних місцях сили, які перетворюють системи в запрограмовані тривимірні конфігурації. Проміжний стан збірки і кінцева конфігурація задаються за допомогою моделювання FEA та SEM/3D-зображень в центральній і правій колонках рис. 2А, відповідно. Перші два приклади на рис. 2А - шпилі образні 3D двошарові мезоструктур. Тут перев'язана стрічка базового шару призводить до перетворення одиночної і подвійної катушок в перекрестних шарах в тривимірні шпилі. Отримані мезоструктури можуть бути використані в NFC пристроях, як описано нижче. Більш того, можна застосовувати як кірігамі, так і принципи конструювання орігамі, як показано на стільці, коробки і пірамідальної структурі на рис. 2А. Ці мікроструктури можна зворотньо відкривати та закривати шляхом механічного розтягування / стягування еластомерної підкладки, тим самим виконуючи роль незвичайних видів мікроманіпуляторів. Три нижні рамки рис. 2А відповідають тривимірним багатошаровим структурам в пластмасі, з формами, що нагадують поліедричні коробки, сітки і квітучі квіти. Конструкція "екрану" формується шляхом одночасного локального складання, яке виникає в результаті стиснення місць зчеплення і глобального обертання за рахунок сили, переданої поза площинними деформаціями основного шару. Квітуча квітка "має шість пелюсток, складених під дією замкнутої, кругової форми серпантинних стрічок нижнього шару. У всіх наведених вище прикладах механічні взаємодії можуть бути налаштовані кількісно, за допомогою FEA, для точного контролю кінцевих тривимірних геометрій. Ці взаємодії, в основному у формі нормальних контактних сил, діють прямо або побічно (через згинальні моменти) для зміни форми перекрещуючих шарів. Малюнок 5 ілюструють залежність кута складання і контактної сили від попереднього напруження. Кут складання збільшується монотонно зі збільшенням попередньої деформації до тих пір, поки не утвориться близька геометрія. Навпаки, контактне зусилля різко зростає і потім незначно зменшується з подальшим збільшенням попередньої

деформації, так як точка контакту при високій попередньої деформації переміщається далі від місць складання (поблизу місць з'єднання). Аналогічні концепції проектування можуть бути розширені для формування тривимірних форм, схожих на частково згорнуті масиви Доміно, розташовані або прямим (рис. 2F), або криволінійним (рис. 2G) траєкторіями. Тут в якості виконавчого елемента служить товста, перехресна стрічка (пластмаса, ~ 250 мм), розташована в базовому шарі, а пасивними елементами для перенесення навантаження служать 10 ідентичних прокладок [Cu (1 мм) / PET (50 мм) двухшарових] з гнучкими швами, з'єднаними з місцями склеювання. Через відносно малій жорсткості згинання областей стиків, пасивні елементи піддаються зморщуванню, які можуть послідовно передаватися на сусідні прокладки. Моделювання показує, що рух керуючого елемента може бути перенесено на відносно велику відстань (наприклад, більш ніж в три рази довжини пасивної прокладки) для конструкції, представленої на рис. 2G



**Рис. 1.4** Експериментальні та обчислювальні дослідження різних багатошарових структур з асистуючими властивостями. (А-Е) Багатошарові 2D-попередники, передбачення FEA і експериментальні зображення частково і повністю зібраних 3D-структур, сформованих з використанням біаксіальної поперечної деформації в підкладці. Всі структури виконані з пластикових плівок. Червоний колір в 2D-попередників позначає місця скріплення, зелений – пасивні елементи а синій – активні елементи. (F) Багатошарові 2D-попередники, прогноз FEA тривимірних структур з біслоїв, що складаються з міді (1 мм) і ПЕТ (50 мм), і відповідне 3D зображення для частково згорнутих масивів доміно з прямим траєкторією. (G) Аналогічні результати для частково згорнутих масивів доміно з вигнутим контуром. Масштабні лінійки, 600 мм (А та В) 20 мм (С, D, E) і 5 мм (F і G) [1].



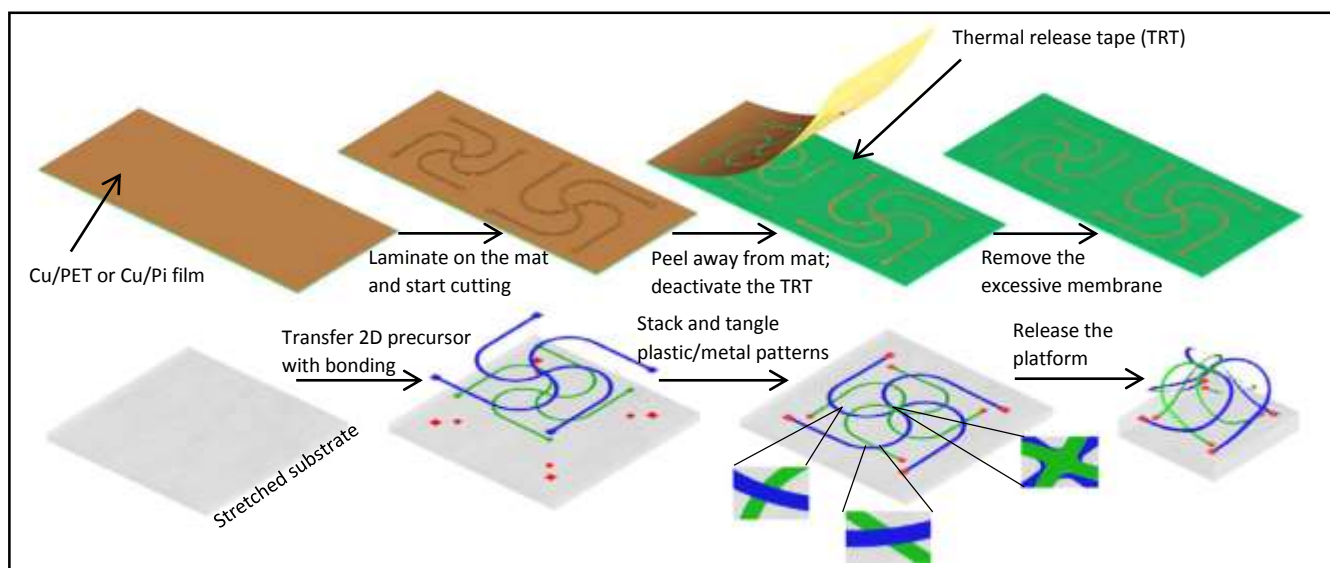
**Рис. 1.5** Схематична ілюстрація і розрахунок результатів для кута складання і нормального зусилля контакту як функції поперечної

деформації для 3D квітки. Дана 3D-структура виготовлена з багат шарових пластикових плівок, відповідних останньої структурі на рис. 4 (E) [1].

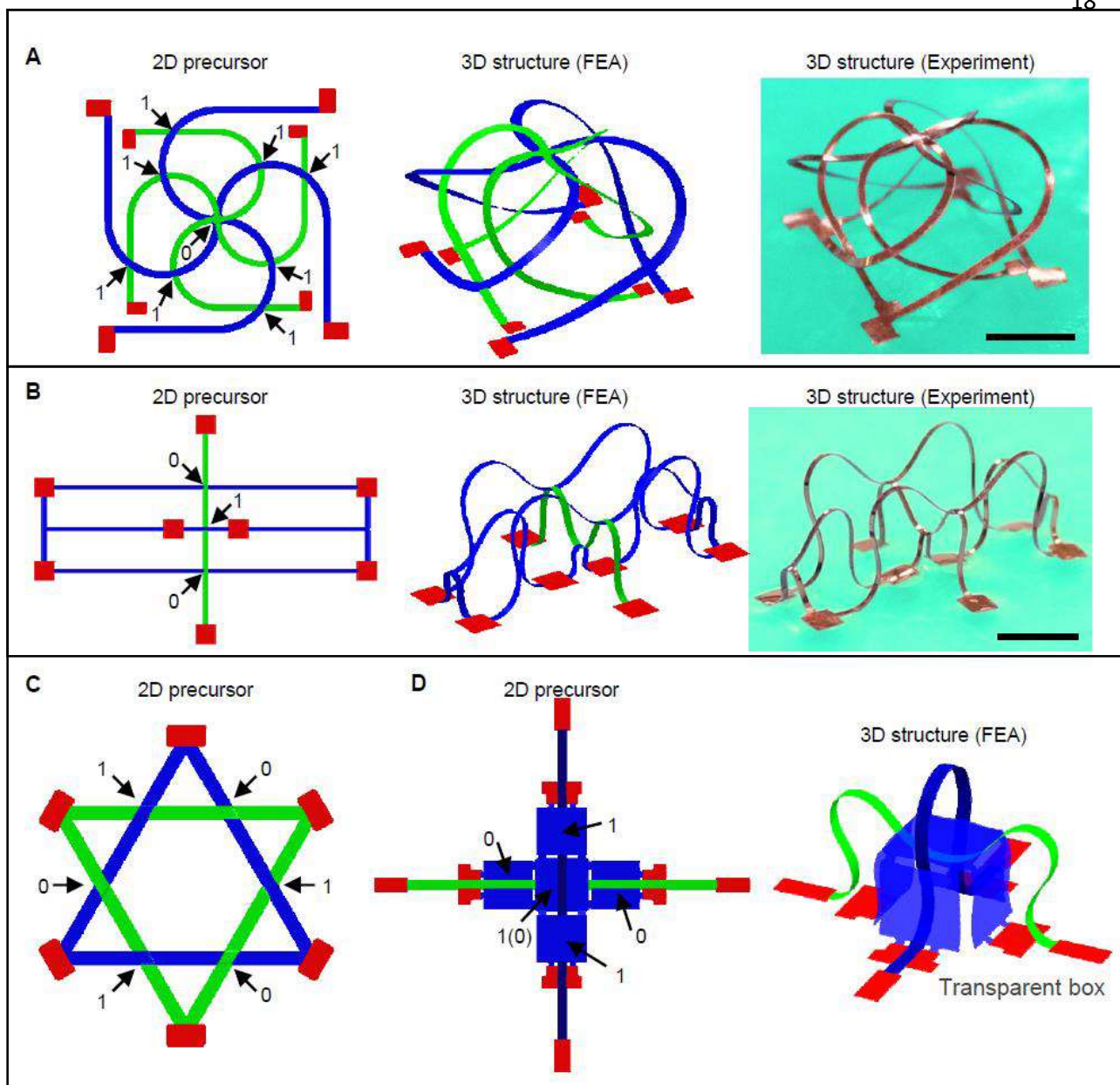
### 1.3 3D багат шарові мезоструктури з переплетіннями

Інший клас багат шарових конструкцій включає в себе переплетені багат шарові конструкції в якості 2D-попередників, відкриваючи тим самим доступ до 3D мезоструктур з заплутаними топологіями. Ці конструкції можуть бути реалізовані за допомогою фотолітографії або за допомогою згаданих раніше технологій механічної / лазерного різання. Схематична ілюстрація процесу, що використовує механічне різання, представлена на рис. 3A і малюнку. S9A, в якому переплетені області реалізуються мікроманіпуляціями. У цій конструкції шар зеленого кольору лежить вище шару синього кольору в центральній області, але нижче його в усіх інших областях контакту. Отримані 3D мезоструктури впливають з колективного згинання двох заплутаних стрічок. Остаточна конфігурація нагадує закручений вузол, як видно з результатів FEA і SEM зображень на рис. 3B. Мал. 3C і рис. S9B ілюструє мережу стрічок, де зелений шар розщеплює вигнуті хвилі на дві субхвилі. Ці структури можуть бути цікаві як будівельні ліси для електричного або механічного моніторингу та / або стимулювання росту клітин. Малюнок 3D і рис. S9C демонструють використання переплетеного малюнка Кагоме, що складається з двох ідентичних трикутників, як 2D попередників. Остаточна конфігурація має шестикратну симетрію і відповідає заплутаним, хвилястим дугам, сполученим в замкнуту форму. Більш складні схеми переплетення можуть включати мембрани кірігамі зі стратегічно продуманими розрізами, слугуючими стежками для переплетення стрічкоподібних попередників. Приклад куба 3D кірігамі з двома переплетеними стрічками показаний на рис.3 і рис.S9D. Ці багат шарові конфігурації можуть, наприклад, забезпечувати електромагнітне екранування ланцюгів, які виникають всередині коробки.





**Рис. 1.6** Процес детерміністичної збірки 3D структур з переплетених, багат шарових, 2D прекурсорів. Схематична ілюстрація процедур виготовлення тривимірних переплетених багат шарових структур з мідно-РЕТ або мідно-РІ біслойних сумішей методом механічного різання. [1].

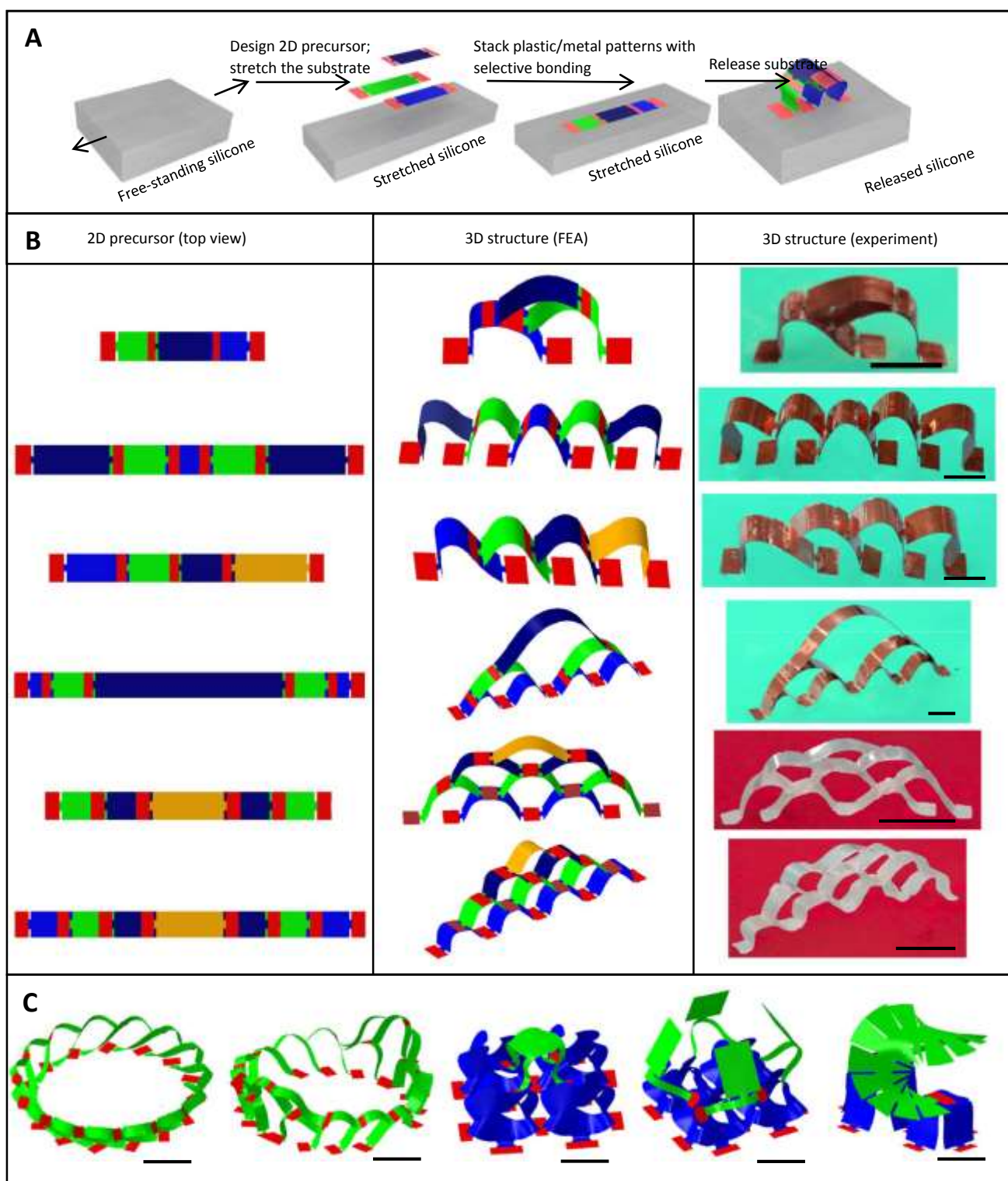


**Рис. 1.7** Конструкції і мідно-РЕТ-структури, зібрані з переплетених, багат шарових, 2D-попередників. Прогнози FEA і СЕМ зображення двох багат шарових мезоструктур в заготовках з міді (9 мм) і РІ (12 мм) зі сплетеними конфігураціями. Число "0" (або "1") позначає, що синій шар знаходиться внизу (або зверху) зеленого шару. (D і E) FEA-прогнози і оптичні зображення двох багат шарових структур в заготовках з міді (1 мм) і РЕТ (50 мм) зі сплетеними конфігураціями. Масштабні смуги, 5 мм. [1].

#### **1.4 3D мезоструктури с когерентно зв'язаними багат шаровими шарами методом селективного зв'язування.**

У вищевказаних конструкціях 2D шари прекурсорів припускають незначні (Рис. 1) або спеціально розроблені (Рис. 4 і 7) механічні взаємодії один з одним, але без будь-якого міжповерхневого зв'язку. Введення такого зв'язку в певних місцях може ще більше розширити конструкторські можливості, як це схематично показано на рис. 8. На прикладі багат шарових 2D-попередників, що складаються з паралельних прямих стрічок, селективне зв'язування дозволяє отримати багатий діапазон тривимірних топологій, що виходить за рамки тих, які можливі без такого зв'язування. Для випадку з одною віссю прерстреної деформації приклади наведені на рис. 8В для структур в бішару з міді / PET, пластика і гібридних комбінацій. Перша і друга колонки (рис. 8В) зображують багат шарові 2D-попередники в верхньому і поперечному розрізах. Червоні області виділяють місця зв'язку або з підкладкою, або між шарами. Відповідні тривимірні прогнози FEA і експериментальні результати з'являються в останніх двох колонках. Перша конструкція складається з трьох шарів-попередників, в яких синій, зелений і синій шари мають два, один і нульовий кінці, відповідно, пов'язані з підкладкою. Отримана тривимірна структура відрізняється від структури, зібраної з попередників без зв'язку. У наступних двох конструкціях кожен шар-попередник зв'язується з підкладкою, принаймні, з одним кінцем, що призводить до утворення тривимірних мезоструктур з обмеженим між шаровим зміщенням. Останні три приклади на рис. 8В показують, що великі поза площинні зміщення можуть бути реалізовані шляхом компонування різних слоїв прекурсорів таким же чином, як і при компонуванні блоків іграшок. Зокрема, багат шарова структура в четвертому кадрі на рис. 8В включає стрічки, які збільшуються по довжині від нижнього шару до верхнього. Ці структури, будучи побудовані з п'єзоелектричних матеріалів, можуть бути доречними для ширококутового механічного прибирання енергії. Аналогічні ідеї, реалізовані з двоосьовими попередньо напруженими

підкладками, забезпечують подальшу підвищену гнучкість конструкції, як показано на рис. 8С. Перший приклад відповідає варіанту третього випадку на рис. 8В, реорганізованого в замкнуту кругову форму. Ця тривимірна структура з міді / PET складається з 15 криволінійних стрічок. Відповідні 2D-попередники показані на рис. 8В. Додавання додаткових шарів до цієї тривимірної структури по поза площинному напрямку також можливо при відповідному виборі компоновок попередників, як показано на другій структурі на рис. 8С. Останні три приклади на рис. 8С ілюструють тривимірні структури, підтримувані зім'ятими мембранами, двомірні попередники яких показані на рис. 8С. Третя і четверта структури використовують ті ж самі круглі мембрани кірігамі розміром 2 x 2 в базовому шарі, в яких серпантинovidні розрізи викликають обертальні рухи під час процесу вигину. Впровадження гібридних стрічково-мембранних візерунків у верхньому шарі призводить до утворення скрученого столу або розгортаються подушечок з верхньої частини мембрани кірігамі. Остання структура на рис. 8С складається з кубічних коробок різних розмірів в базовому шарі і згорнутої мембрани кірігамі.



**Рис. 1.8** Експериментальні та обчислювальні дослідження різних 3D структур з когерентно пов'язаними багат шаровими шарами через селективне зв'язування. (А) Схематична ілюстрація процесу складання тривимірних структур з 2D-попередників з когерентно пов'язаними багат шаровими шарами, з'єднаними між собою в селективних вузлах. (В)


Багатошарові 2D-попередники з верхнього і поперечного перетинів, FEA-прогнози і оптичні зображення для шести багатошарових структур, утворених з використанням одновісної попередньої деформації в підкладці. (С) FEA-прогнози для п'яти багатошарових структур, утворених з використанням двовісний преддеформації в підкладці. Останні два малюнки в (В) виготовлені з пластикових плівок, решта конструкцій зроблено з біслоїв міді (1 мм) і PET (50 мм). Масштабні стрижні, 5 мм. [1].

## 2. Методика створення 3D зразку та підготовка до FEM аналізу

### 2.1 Створення 3D зразку





В даному розділі буде проведена підготовка по створенню зразка та досліди над ним, а саме FEM аналіз. Підготовка та досліди будуть проводитися в ПЗ Solidworks.

Для початку потрібно створити 3D модель структури яка буде досліджуватися

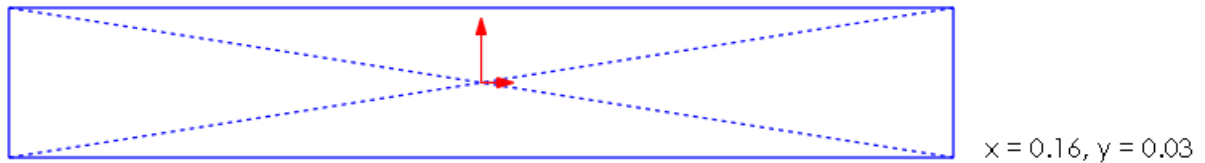
1. Натиснути на **New**  в панелі інструментів. Обрати систему вимірювання, в даному випадку була обрана **MMGS (millimeter, gram. second)**.
2. Натиснути **Part**.
3. Натиснути **OK**.

Відкриється робоча сцена Solidworks де і буде створена 3D модель.

Для створення 3D моделі для початку потрібно створити 2D скетч з розмірами.


1. Натиснути **Extrude Boss/Base**  в панелі інструментів під назвою Features.  
В основному вікні 3D виду з'являться три площини **Front, Top, Right**.
2. Обрати **Top** площину та натиснути. Вид камери зміниться на перпендикулярний до площини яка була обрана. В панелі інструментів відкриється вкладка Sketch.
3. Натиснути на стрілочку вниз біля інструменту **Rectangle cube**  та обрати там **Centerpoint cube** . Панель налаштування інструменту відкриється зліва.
4. Перемістити курсор до центру сцени який позначений як .
5. Натиснути на точку що з'явиться.
6. Переміщувати курсор та спостерігати динамічну зміну фігури поки не буде знайдена оптимальна форма.

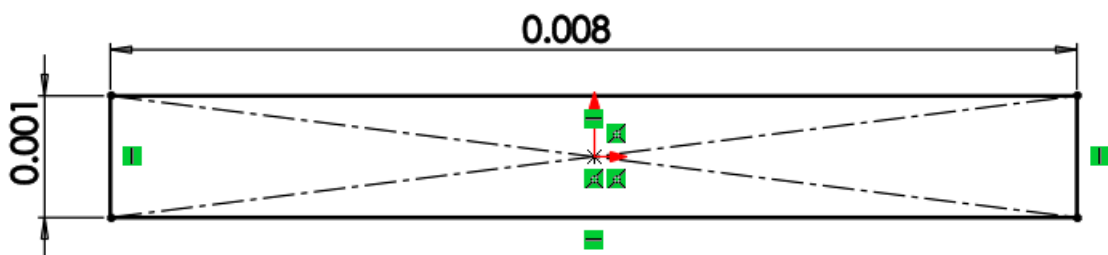
7. Натиснути куди завгодно для завершення операції та натиснути ✓ в налаштування інструменту зліва.



**Рис. 2.1** – 2D скетч досліджуваної фігури.


2D скетч створений вище має приблизну форму яка потрібна але не точні розміри. Для створення точних розмірів сторін потрібно:

1. Натиснути **Smart Dimension** .
2. Обрати одну із сторін прямокутника. Одразу буде видно розмітку сторони та її нинішні розміри.
3. Перемістити курсор куди вам завгодно та натиснути ЛКМ щоб додати цей розмір. Вікно модифікування розмірів відкриється на екрані.
4. В меню модифікування написати точні розміри, в даному випадку  $8mm$  для ширини, для довжини повторити дії з пункту 2 для ширини та вписати  $1mm$ . Натиснути ✓.




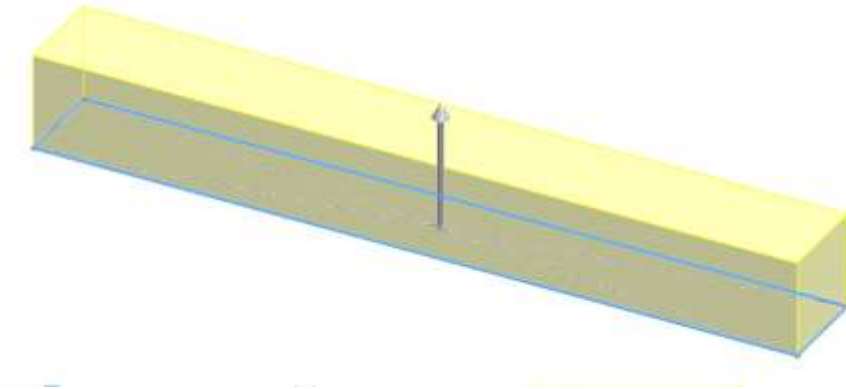
**Рис. 2.2** – 2D скетч з точними розмірами.

Для створення 3D структури із 2D скетчу потрібно:

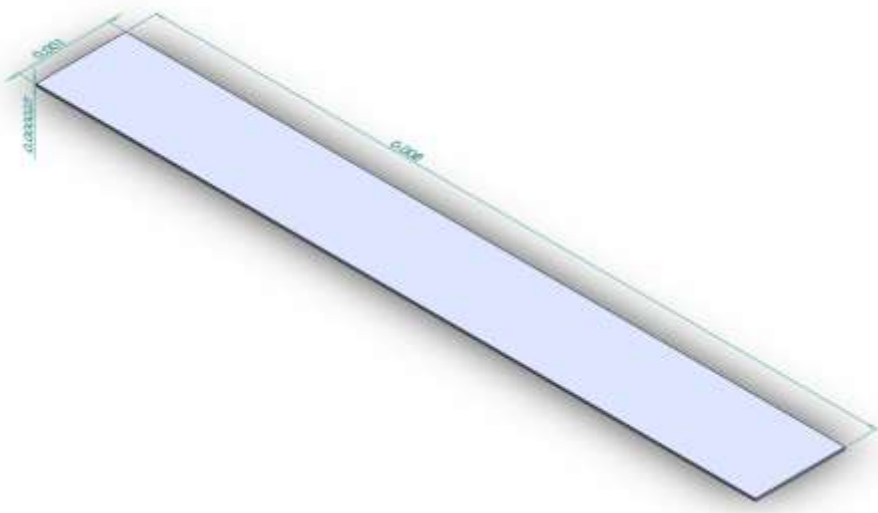
1. Натиснути **Exit Sketch**  в панелі інструментів вкладки Sketch. Зліва відкриються налаштування видавлювання скетчу.
2. В налаштуваннях, під **Direction 1**:



- a) Обрати **Blind** в **End Condition**.
- b) Встановити **Depth**  на значення яке завгодно, в даному випадку товщина *1mil* (0.0000253 – мінімальне значення що доступне).



**Рис. 2.3** – Загальний вид процесу встановлення товщини для 2D скетчу.

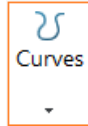


**Рис. 2.4** – Фінальний варіант зразка з розмірами.



Збірка даних структур, що описана в першому розділі, методом стискаючого-вигину потребує в декількох точках опори самого зразка та еластичної підкладки, для створення їх потрібно:

1. Створити скетч містць скелювання як показано на малюнку 5 методами, що описані вище.

2. Перейти в вкладнику **Features** та натиснути на стрілочку під



інструментом **Curves** та обрати **Split line**. Зліва з'являється налаштування інструменту.

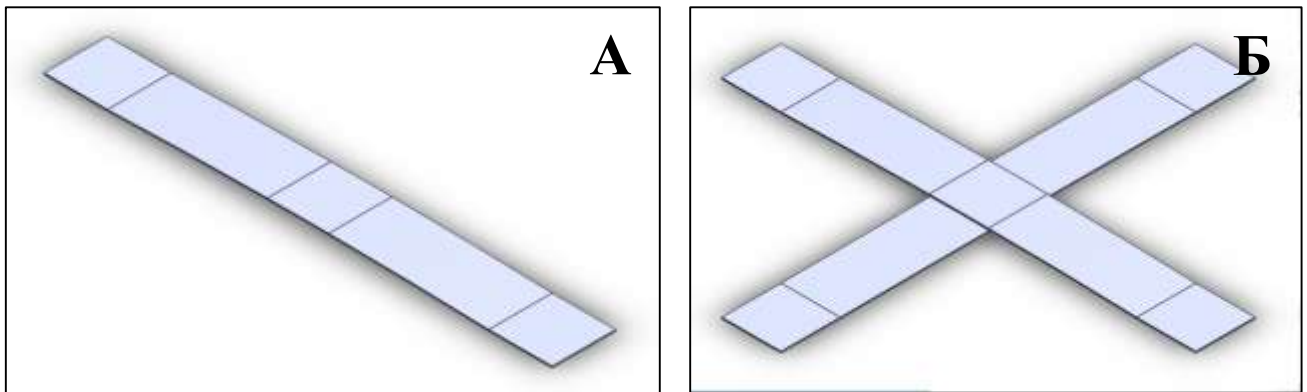
3. В налаштуваннях поставити галочку в пункті **Projection**, нижче є два віконця, в першому віконці яке помічено малюнком  обрати скетч що був створений в пункті 1, в другому вікні  обрати основну модель що буде розрізана. Натиснути ✓.



**Рис. 2.5** – 2D скетч (голубі лінії) для розрізу моделі.

Для порівняльного дослідження з двома однаковими 3D зразками що розволені один на одному але інший повернутий на 90° потрібно:

1. Перейти в вкладнику **Analysis Preparation** на палені інструментів та обрати **Move/Copy Bodies**. Зліва відкриється меню налаштувань.
2. Під **Bodies to Move/Copy** обрати модель що потребується в цьому та нижче поставити галку в пункті **Copy**. Відкрити вкладнику **Rotate** та ввести значення повороту по потрібній осі. Натиснути ✓.





**Рис. 2.6** – Фінальні варіанти 3D моделей для симуляції та порівняння одне з одним.

## 2.2 Підготовка до FEM аналізу







FEM аналіз - це метод скінченних елементів, який використовується інженерами та вченими для математичного моделювання і чисельного вирішення складних структурних, рідинних завдань. Звичайна елементна модель Звичайно-Елементна модель містить систему точок, або "вузлів", які формують конструкцію. З цим вузлами пов'язані самі кінцеві елементи, які утворюють сітку кінцевих елементів і містять матеріальні і структурні властивості моделі, визначаючи, як вона буде реагувати на різні умови. Щільність сітки кінцевих елементів може бути різною в різних точках матеріалу, в залежності від того, які зміни рівня напруги очікуються в той чи іншій галузі. Області з різкою зміною напруги зазвичай вимагають більш щільної сітки, ніж те, в яких змін коментарі або вони незначні. Особлива увага приділяється точкам руйнування раніше випробуваного матеріалу, заокруглення, кутах, складним деталям і областям з високою напругою.

Для початку налаштування симуляції потрібно:

1. Натиснути на вкладнику Simulation в панелі інструментів.
2. Натиснути вкладнику **New study**  та обрати однойменну кнопку. Зліва відкриється список симуляцій.
3. Обрати **Non-linear** . Відкриється нова вкладника знизу з симуляцією.

Налаштування параметрів симуляції.

Зліва у вікні будуть доступні 5 параметрів налаштування симуляції:

1.   “**назва документу**” - дана вкладника потрібна для налаштування матеріалу об'єкту дослідження.
  - a) Натиснути ПКМ на вищевказану вкладнику та обрати Apply/Edit material. Відкриється вікно зі списком всіх доступних матеріалів.
  - b) Обрати або створити необхідний матеріал. Натиснути Apply потім Close.
2.  **Connections** – вкладника для ручного або автоматичного визначення сторін різних моделей що будуть пересікатися під час симуляції. Якщо в симуляції є дві сторони що пересікаються але вони не вказані в даній вкладниці то симуляція буде недостовірною. Після обирання сторін час симуляції може збільшитися в декілька разів в залежності від складності моделі та симуляції.
  - a) Натиснути ПКМ на вищевказану вкладнику та обрати **Contact set** . Зліва відкриється вкладника налаштування.
  - b) Під **Type** обрати параметр взаємодії двох площин, ще нижче обрати дві площини або декілька площин що будуть взаємодіяти. Натиснути .
3.  **Fixtures** – створення статичних частей моделі що не будуть рухатися або будуть але в одному напрямку.
  - a) Натиснути ПКМ та обрати **Advanced fixtures**, дана вкладника включає

в себе три вкладники вище та має більше налаштувань. Зліва відкриється вкладника налаштування.







- b) Під **Advanced** обрати тип кріплення та сторони в залежності від ситуації, вище буде приклад кріплення в залежності від вибору. Нижче **Translate** можна обрати рух закріпленої площини в трьох напрямках







та обрати розмірність здвигу сторін. Якщо обрати один параметр та не встановлювати параметр здвигу то площина не зможе рухатися в тому напрямі який був обраний, в два інші зможе. Натиснути ✓.

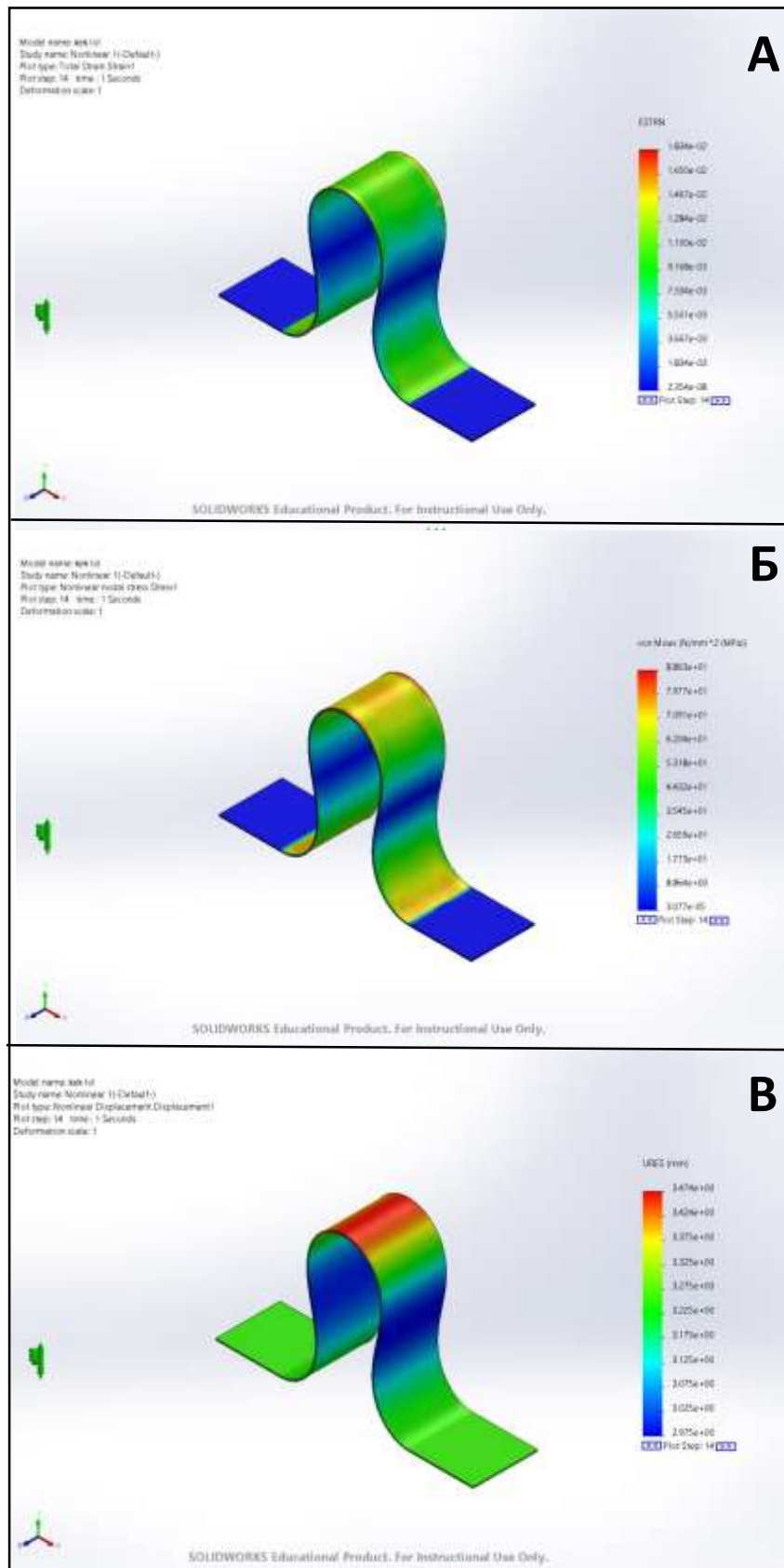
Приклад

для фіксування даної роботи показана на малюнку 6.

4.  **External loads** – дана вкладника потрібна для обрання фізичних параметрів взаємодії з об'єктом, такими як: температура, тиск, сила, гравітація та інші.
- a) Натиснути ПКМ та обрати **Pressure** . Зліва відкриється меню налаштувань.
- b) В полі  обрати сторону до якої буде прикладений тиск, нижче **Pressure value** обрати одиниці виміру тиску та вписати силу тиску. Натиснути ✓.
- c) Натиснути ПКМ та обрати **Temperature** . Зліва відкриється меню налаштувань.
- d) В полі  обрати сторони на які буде впливати температура, якщо це потрібно для всієї моделі то натиснути кнопку **Select all exposed faces**, нижче **Temperature** обрати величину температура та її розмірність. Під **Variation with time** натиснути на **Time curve** , для постійної температури без змін на протязі симуляції, якщо потрібна зміна то натиснути на Edit та налаштовувати криву.

5.  **Mesh** – в цій вкладниці відбувається налаштування топології моделі, її ретопологія, тобто збільшення полігонів для кращого прорахунку симуляції але водночас це збільшує час симуляції.
- a) Натиснути ПКМ та обрати **Create mesh** . Зліва відкриється меню налаштувань.
  - b) В налаштуваннях переміщувати повзунок вліво – менше полігонів, вправо – більше. Натиснути .

Етап налаштувань симуляції завершено, для запуску симуляції натиснути ПКМ на верхню вкладнику з назвою проекту та обрати **Run** .



**Рис. 2.7** – Приклад тестової симуляції зі зміщенням опор на 2 мм по осі X (координатні осі показані знизу зліва). На малюнку А зображено карту розподілу розтягу/натягу, шкала розподілу кольорів по числовим значенням

показана зправа. На малюнку Б зображено карту розподілу напруги. На малюнку В зображено карту розподілу деформації, тобто в яких місцях більше всього була деформована модель (червоний колір).

### 3. Результати досліджень

В попередньому розділі було створено дві 3D моделі досліджуваних зразків (Рис. 2.6) та налаштовано параметри симуляції для FEM аналізу (Рис. 2.7). В даному розділі буде налаштовані параметри досліджуваних матеріалів в ПЗ Solidworks для дослідів та аналіз самих досліджень.

#### 3.1 Матеріали

ПЗ Solidworks має досить детальне налаштування параметрів матеріалу, до цих параметрів входять:

**1. Elastic modulus** або **модуль пружності** – здатність твердого тіла пружно деформуватися при наданні сили до нього.

$$E \stackrel{\text{def}}{=} \frac{d\sigma}{d\varepsilon}$$

- E – модуль пружності;
- $\sigma$  – напруга, викликана діючою силою в зразку (дорівнює силі, поділеної на площу прикладеної сили);
- $\varepsilon$  - пружна деформація зразку, викликана напругою (дорівнює відношенню зміни розміру зразку після деформації до його початкового розміру).

**2. Poisson`s Ratio** або **коефіцієнт Пуассона** – величина відношення поперекового стиснення до повздовжньому розтягненню.

$$\mu = -\frac{\Delta d}{d} \frac{l}{\Delta l}$$



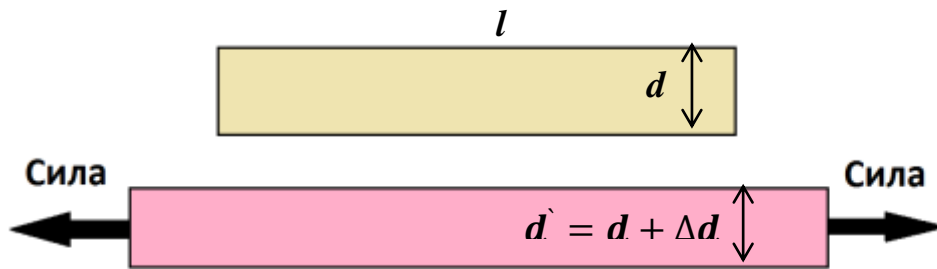


Рис 3.1 - Однорідний стержень до та після надання розтягуючи сил до нього.

3. **Shear Modulus** або **модуль зсуву** – фізична величина, що характеризує здатність матеріалу чинити опір деформації зсуву.

$$G = \frac{Fl}{A\Delta x}$$

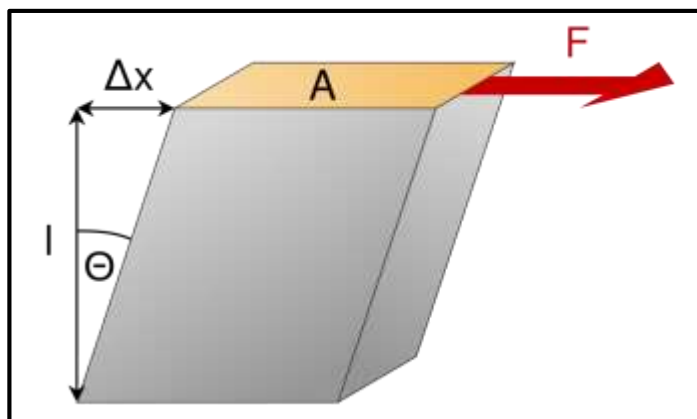


Рис 3.2 – Деформація зсуву.

- $F$  – діюча сила;
- $A$  – площа, на яку діє сила;
- $\Delta x$  – зміщення;
- $l$  – початкова довжина.

4. **Mass Density** або **густина** – скалярні фізична величина, обумовлена як відношення маси тіла до його об'єму.

5. **Tensile Strength** або **межа міцності** – механічна напруга, вище якої відбувається руйнування матеріалу.

6. **Compressive Strength** або **міцність стиснення** – це здатність матеріалу або конструкції витримувати навантаження, маючи тенденцію до зменшення розмірів.

7. **Yield Strength** або **межа текучості** – це напруга, при якій відбувається задалегідь визначена величина постійної деформації.

8. **Thermal Conductivity** або **теплопровідність** – здатність матеріальних об'єктів проводити енергію від більш нагрітих частин до менш нагрітих шляхом хаотичного руху частинок тіла.

9. **Specific Heat** або **питома теплоємність** – це відношення теплоємності до маси, теплоємність одиничної маси речовини.

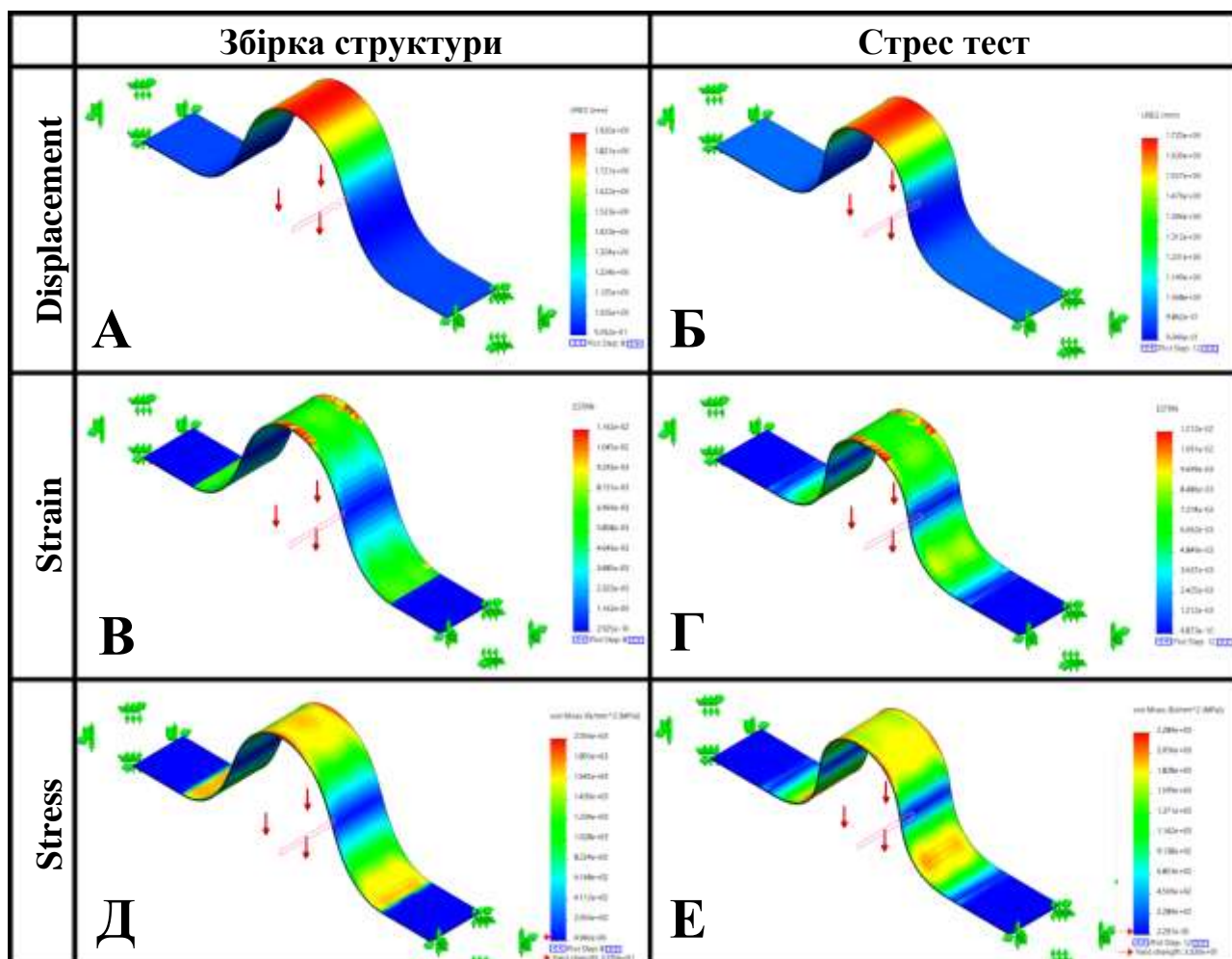
Для експерименту було обрано три матеріали: мідь (Cu), поліімід (Pi), поліетилентерефталат (PET). Характеристики цих матеріалів показані на таблиці 3.1 та були взяті з сайту Material Property Data (MatWeb.com).

Property/Material	Value			Units
	Cu	PI	PET	
Elastic Modulus	110000	46900	5200	N/mm <sup>2</sup>
Poisson`s Ratio	0.343	0.41	0.35	N/A
Shear Modulus	46000	110	50	N/mm <sup>2</sup>
Mass Density	8930	1880	1450	kg/m <sup>3</sup>
Tensile Strength	210	345	90	N/mm <sup>2</sup>
Compressive Strength	330	570	103	N/mm <sup>2</sup>
Yield Strength	33.3	230	90	N/mm <sup>2</sup>
Thermal Conductivity	385	1.73	0.29	W/(m*K)
Specific Heat	385	1130	1500	J/(kg*K)

Таблиця 3.1 – Характеристики матеріалів.

## 3.2 Аналіз результатів симуляції

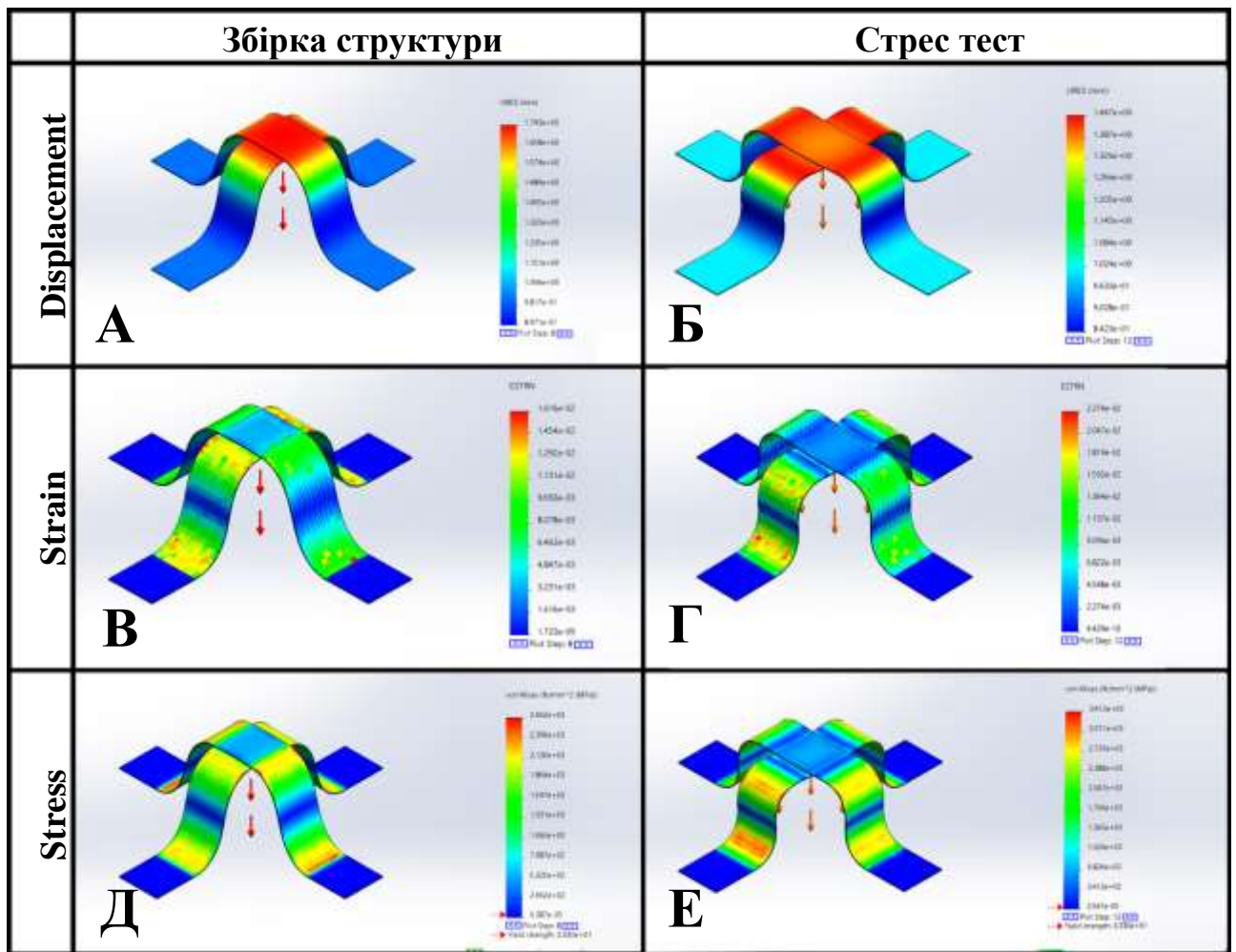
### 3.2.1 Мідь (Cu)



**Рис. 3.2** - Результати збірки та стрес тесту структури з міді методом стискаючого-вигину по осі X на 1 мм одне до одного за допомогою FEM аналізу. На малюнках **А, В, Д** зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (**А**), розтягування/стиску (**В**), напруження (**Д**). На малюнках **Б, Г, Е** зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 1 МПа на  $1 \text{ мм}^2$ .

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,92	1,72	mm
Strain	0,01162	0,01212	N/A
Stress	2056	2284	MPa

**Таблиця 3.2** – Крайні значення для структури із міді.

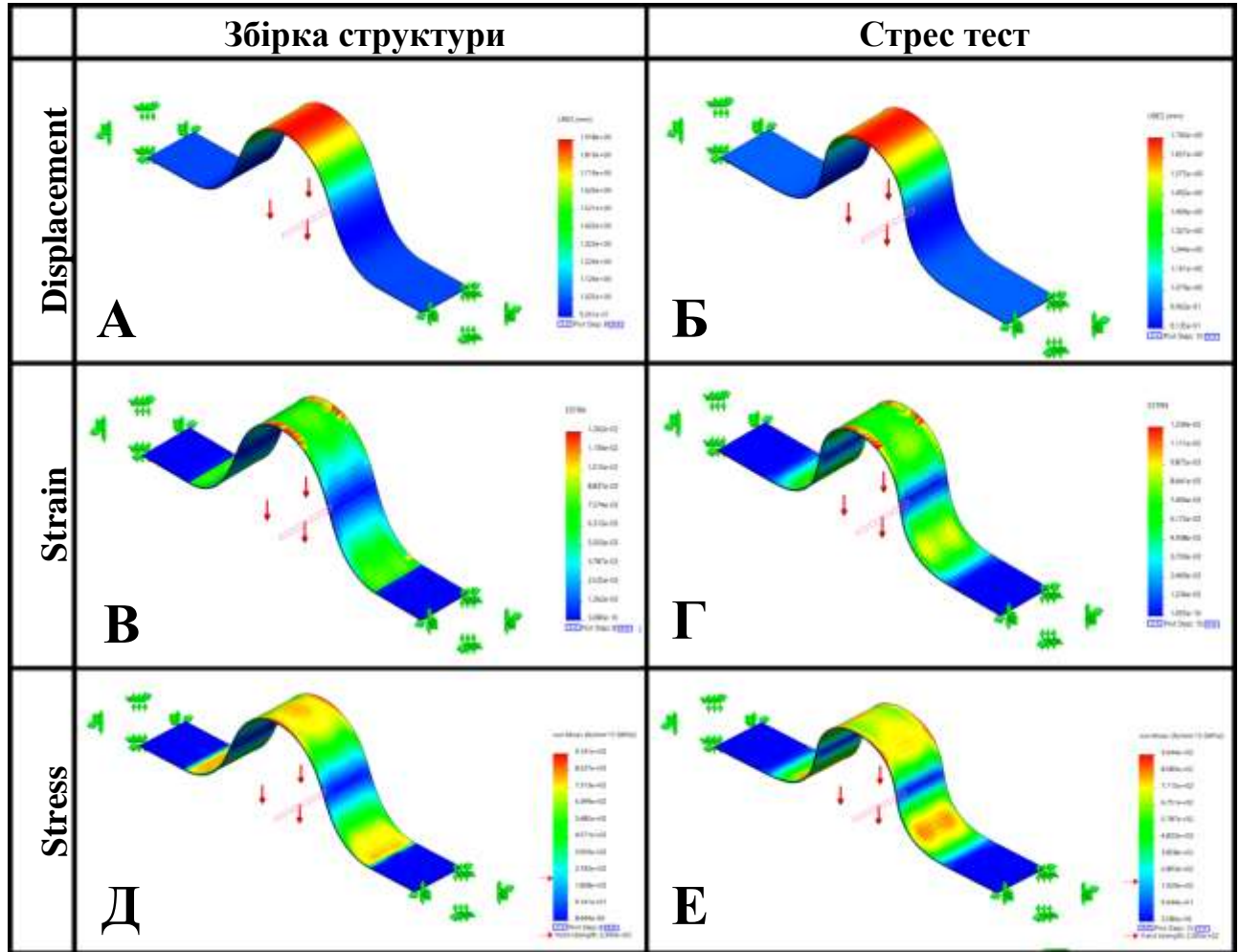


**Рис. 3.3** - Результати збірки та стрес тесту структури з міді із додатковою підтримкою методом стискаючого-вигину по осі X та Y на 1 мм до центру за допомогою FEM аналізу. На малюнках **А, В, Д** зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (**А**), розтягування/стиску (**В**), напруження (**Д**). На малюнках **Б, Г, Е** зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 2 МПа на  $1 \text{ мм}^2$ .

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,743	1,447	mm
Strain	0,01616	0,02274	N/A
Stress	2662	3412	MPa

**Таблиця 3.3** – Крайні значення для структури з міді із додатковою підтримкою.

## 3.2.2 Поліімід (PI)



**Рис. 3.4** - Результати збірки та стрес тесту структури з поліімиду методом стискаючого-вигину по осі X на 1 мм одне до одного за допомогою FEM аналізу. На малюнках **А, В, Д** зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (**А**), розтягування/стиску (**В**), напруження (**Д**). На малюнках **Б, Г, Е** зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 1 МПа на 1 мм<sup>2</sup>.

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,918	1,74	mm
Strain	0,01262	0,01234	N/A
Stress	914,1	964,4	MPa

**Таблиця 3.4** – Крайні значення для структури з поліімиду.

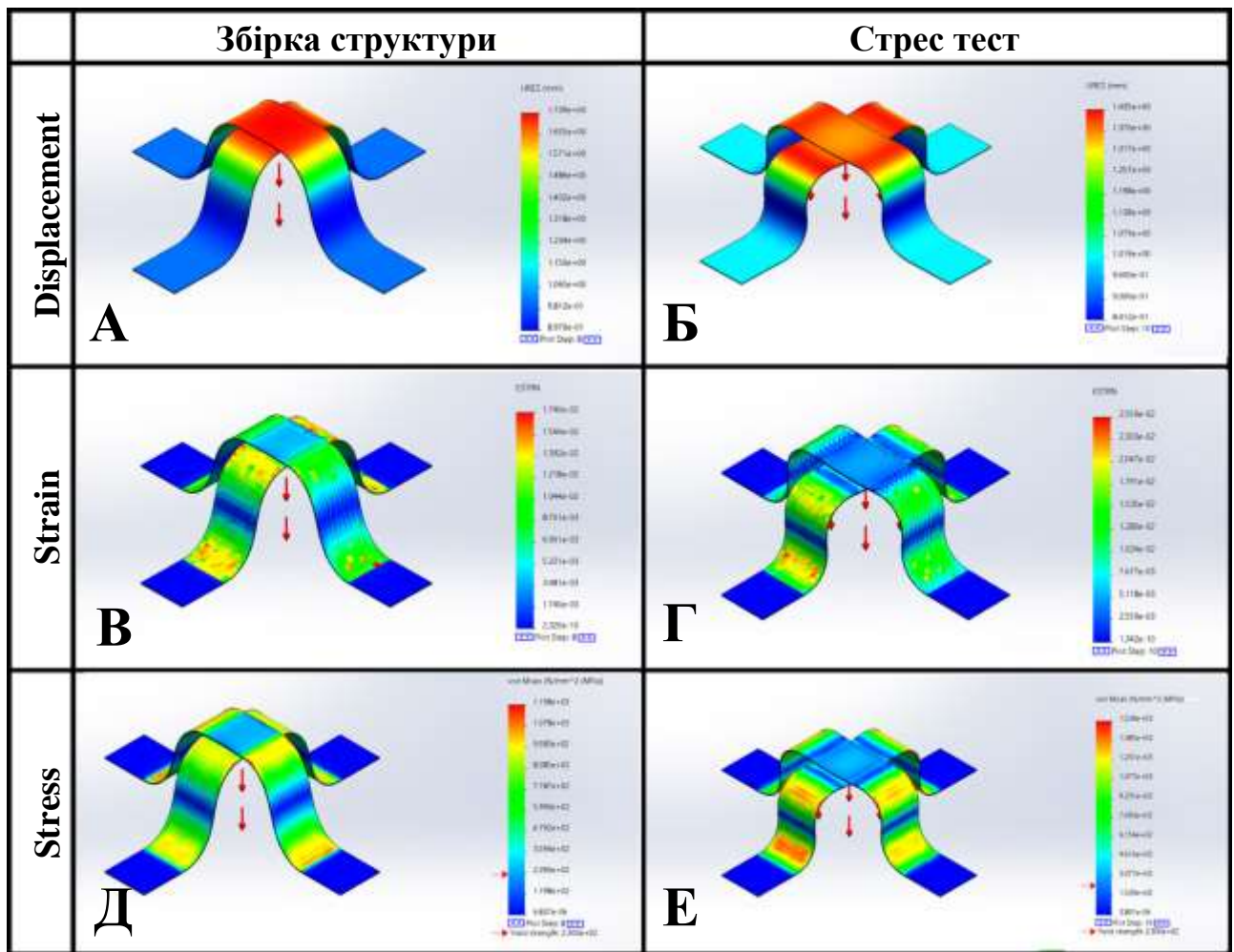
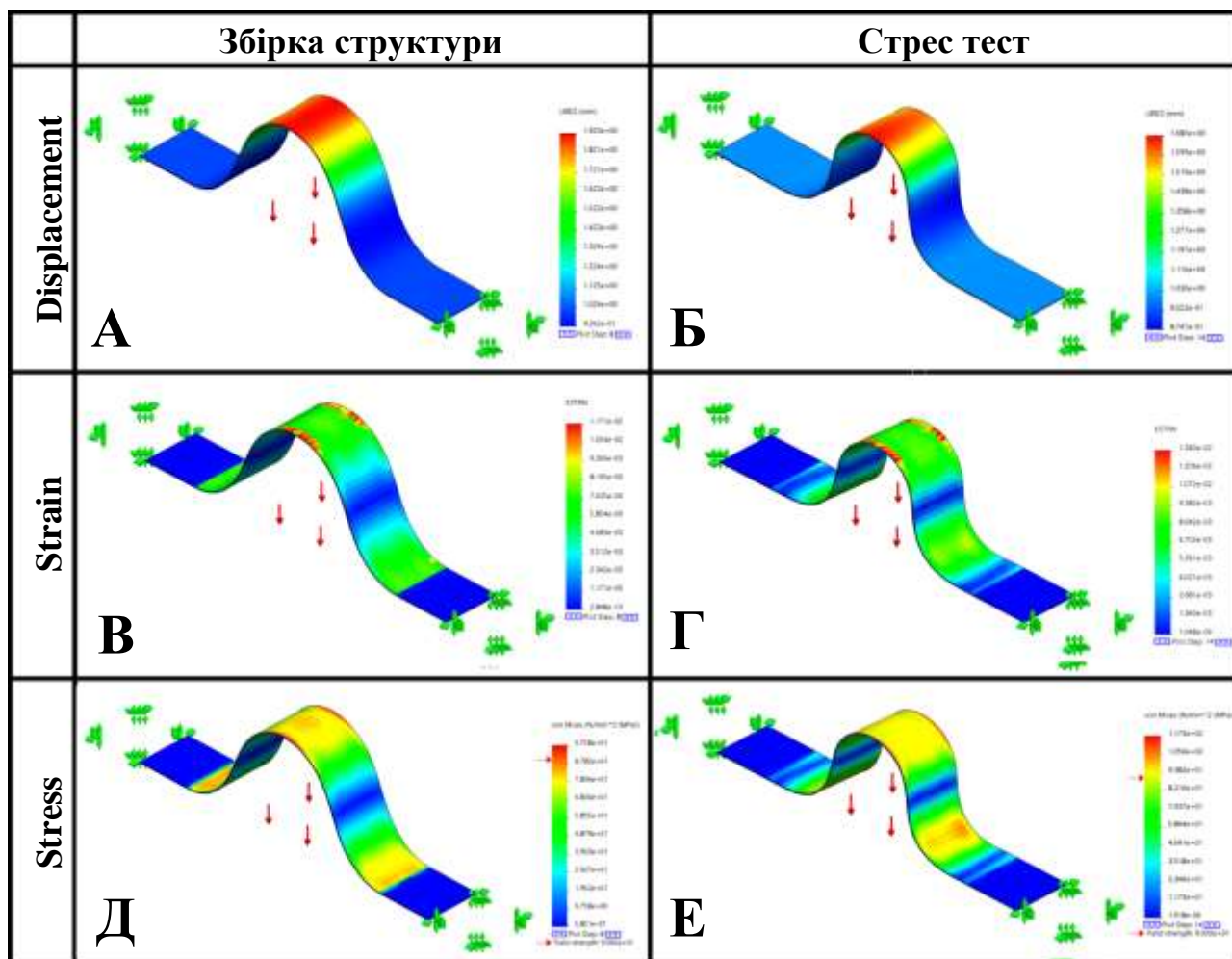


Рис. 3.5 - Результати збірки та стрес тесту структури з поліімиду із додатковою підтримкою методом стискаючого-вигину по осі X та Y на 1 мм до центру за допомогою FEM аналізу. На малюнках А, В, Д зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (А), розтягування/стиску (В), напруження (Д). На малюнках Б, Г, Е зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 1 МПа на  $1 \text{ мм}^2$ .

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,739	1,435	mm
Strain	0,0174	0,02559	N/A
Stress	1198	1539	MPa

Таблиця 3.5 – Крайні значення для структури з поліімиду із додатковою підтримкою.

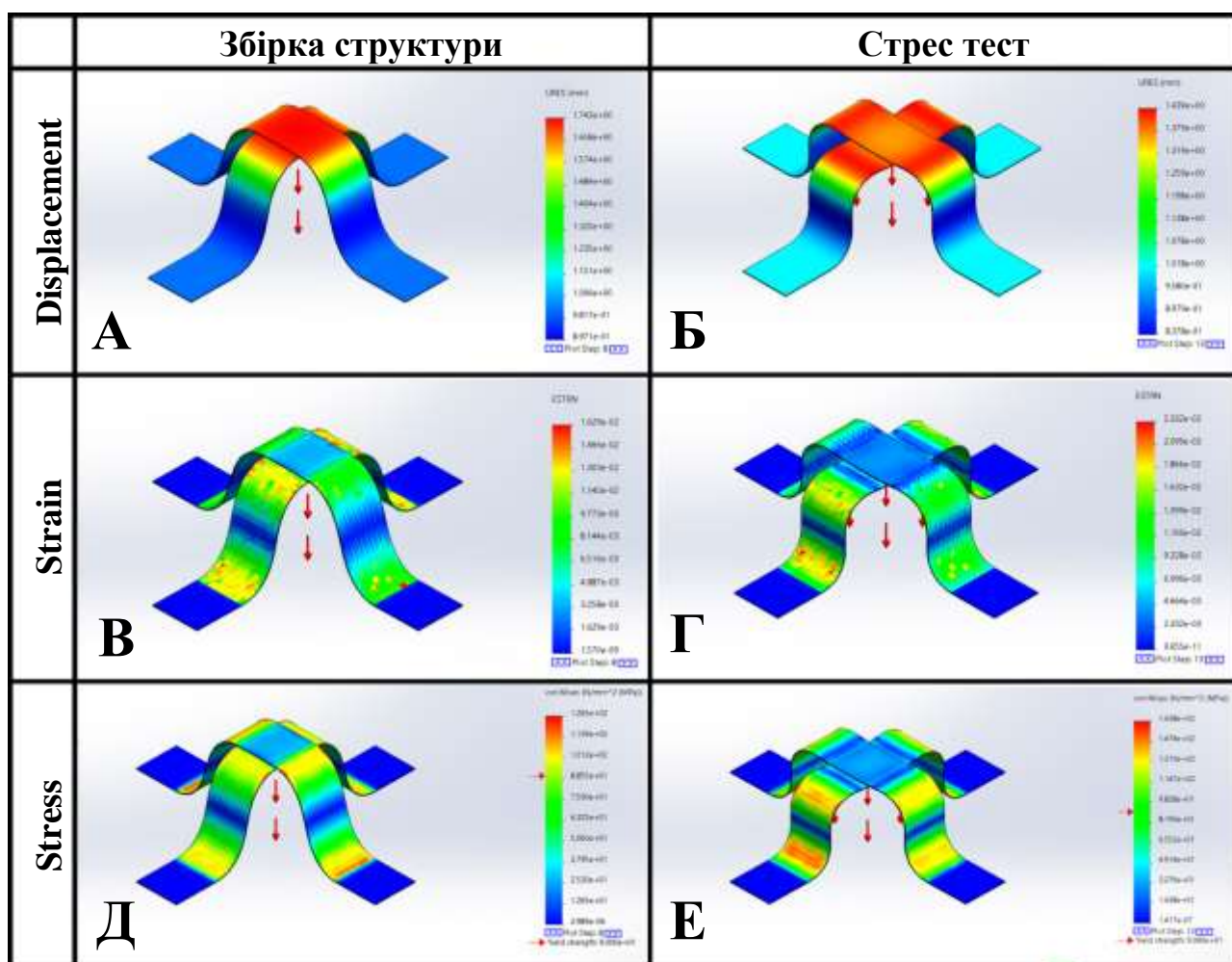
### 3.2.3 Поліетилентерефталат (PET)



**Рис. 3.6** - Результати збірки та стрес тесту структури з поліетилентерефталат методом стискаючого-вигину по осі X на 1 мм одне до одного за допомогою FEM аналізу. На малюнках **А, В, Д** зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (**А**), розтягування/стиску (**В**), напруження (**Д**). На малюнках **Б, Г, Е** зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 0.5 МПа на 1 мм<sup>2</sup>.

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,92	1,68	mm
Strain	0,01171	0,0134	N/A
Stress	97,58	117,3	MPa

**Таблиця 3.6** – Крайні значення для структури з поліетилентерефталату.



**Рис. 3.7** - Результати збірки та стрес тесту структури з поліетилентерефталат із додатковою підтримкою методом стискаючого-вигину по осі X та Y на 1 мм до центру за допомогою FEM аналізу. На малюнках **А, В, Д** зображений фінальний результат збирання структури та три карти розподілу деформації (**А**), розтягування/стиску (**В**), напруження (**Д**). На малюнках **Б, Г, Е** зображений результат стрес тесту, де на вже зібрану структуру було прикладено тиск в напрямку осі  $-Z$  величиною 0.5 МПа на  $1 \text{ мм}^2$ .

	Збірка структури	Стрес тест	Одиниці виміру
	Максимальні значення		
Displacement	1,743	1,439	mm
Strain	0,01629	0,02332	N/A
Stress	126,5	163,8	MPa

**Таблиця 3.7** – Крайні значення для структури з поліетилентерефталату із додатковою підтримкою.



Вище були продемонстровані малюнки симуляції різних структур та таблиці з їх крайніми результатами. Крайні результати означають що при подальшій симуляції, структура втрачала свою форму та починала деформуватися або хилиться як в випадку з структурою із поліетилентерефталату на малюнку **3.6 Б, Г, Е**. Всі структури мали одні й тіж налаштування геометрії та симуляції що були продемонстровані в параграфі 2.

З вище вказаних результатів можна зробити висновок що найміцніша структура без підтримки це мідна структура (згідно стрес тесту **Рис. 3.2 Б, Г, Д, Таблиця 3.2**), максимальне значення навантаження після якого структура сильно змінює свою початкову форму або просідає - 2284 МПа при відношенні початкового розміру до кінцевого (Strain) в 0,01212 що приблизно 1,21% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні який дорівнює 60%, тобто при розтягуванні матеріалу більш ніж на 60% від початкового розміру приведе до руйнування матеріалу. Максимальна міцність міді при стисканні (Compressive Strength), значення після якого матеріал деформуватися без можливості повернення в початковий стан - 330 МПа (**Таблиця 3.1**), але для цього потрібно дотриматися двох параметрів, це максимальна міцність та міцність при стисканні/розтягненні. Навантаження яке було прикладено по осі  $-Z$  до даної структури становило 1 МПа на площу в  $1 \text{ мм}^2$ , при значенні в 0,95 МПа симуляція видавала помилку при якій вказувалося що максимальній характеристики структури були перевищені, тобто структура починала сильно змінювати свій початковий стан (якій нам і потрібен) переходячи в 2D структуру або взагалі руйнуватися при значеннях вище ніж 0,95 МПа, з цього значення можна отримати максимально витримувань масу згідно формули тиску (2), з якої ми виводимо масу (3).

$$P = \frac{mg}{S} \quad (2)$$

$$m = \frac{PS}{g} \quad (3)$$

$P$  – тиск;

$m$  – маса;

$S$  – площа на яку діє сила;

$g$  – гравітаційна константа що дорівнює 9,8.

Підставивши значення в формулу (3) ми знаходимо максимально витримувану масу структури до сильної зміни своєї початково форми, що становить 97 грамів (об'єм не враховується).

Що до структури з додатковою підтримкою, максимальне значення навантаження в структурі (згідно стрес тесту **Рис. 3.3 Б, Г, Д, Таблиця 3.3**) 3412 МПа, відношення початкового розміру до кінцевого (Strain) вже становить 0,02274 що приблизно 2,27% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні. Навантаження по осі  $-Z$  на площу 1 мм<sup>2</sup> все становило 2 МПа, при 1,6 МПа структура починала невитримувати навантаження та симуляція видавала помилку як і в випадку вище. Максимальна вага яку витримала ця структура становить 163 грами. Тобто додавши додаткову підтримку до структури було досягнуто збільшення витримуваної міцності приблизно в 1,5 рази, цеж спостерігається в структурах з іншого матеріалу що буде описано далі.

Структура без підтримки з полііміду при навантаженні по осі  $-Z$  в 1 МПа на площу 1 мм<sup>2</sup> (згідно стрес тесту **Рис. 3.4 Б, Г, Д, Таблиця 3.4**), мала максимальну міцність до сильної зміни форми та просідання - 964 МПа при відношенні початкового розміру до кінцевого (Strain) в 0,01234 що приблизно 1,23% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні який дорівнює 200%. Максимальна міцність полііміду при стисканні (Compressive Strength), значення після якого матеріал деформуватися без можливості повернення в початковий стан - 570 МПа (**Таблиця 3.1**), тобто поліімід найбільш придатливий до стиску але в той

же час менш міцніший, при 0,4 МПа симуляція видавала помилку, тобто структура без підтримки з даного матеріалу має меншу міцність в порівнянні з тією же структурою але з міді. Максимально витримувана вага 41 грам.

Структура з додатковою підтримкою з полііміду при навантаженні по осі  $-Z$  в 1 МПа на площу  $1 \text{ мм}^2$  (згідно стрес тесту **Рис. 3.5 Б, Г, Д, Таблиця 3.5**), мала максимальну міцність до сильної зміни початкової форми та просідання - 1539 МПа, відношення початкового розміру до кінцевого (Strain) становить 0,02559 що приблизно 2,55% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні (даний показник більше в 2 рази ніж інші із-за еластичності матеріалу). При 0,8 МПа структура починала сильно змінювати свою початкову форму та просідати не витримуючи навантаження, збільшення міцності при додаванні додаткової підтримки в 2 рази. Максимально витримувана вага 82 грами.

Структура без підтримки з поліетилентерефталату при навантаженні по осі  $-Z$  в 0,5 МПа на площу  $1 \text{ мм}^2$  (згідно стрес тесту **Рис. 3.6 Б, Г, Д, Таблиця 3.6**), мала максимальну міцність до сильної зміни форми та просідання - 117 МПа при відношенні початкового розміру до кінцевого (Strain) в 0,0134 що приблизно 1,34% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні який дорівнює 600%. Максимальна міцність поліетилентерефталату при стисканні (Compressive Strength), значення після якого матеріал деформуватися без можливості повернення в початковий стан - 103 МПа (**Таблиця 3.1**). Поліетилентерефталат найбільше придатливий до деформації і найменш міцний, також унікальність даного матеріалу що при розтягненні більше ніж 6% вже неможливе повернення його до початкової форми. При 0,1 МПа симуляція видавала помилку, тобто структура без підтримки з даного матеріалу має найменшу міцність із тих що представлені. Відмічу що дана структура при симуляції єдина почала хилитися вбік. Максимально витримувана вага 10 грамів.

Структура з додатковою підтримкою з поліетилентерефталату при навантаженні по осі  $-Z$  в 0,5 МПа на площу 1 мм<sup>2</sup> (згідно стрес тесту **Рис. 3.7 Б, Г, Д, Таблиця 3.7**), мала максимальну міцність до сильної зміни початкової форми та просідання - 163 МПа, відношення початкового розміру до кінцевого (Strain) становить 0,02332 що приблизно 2,33% від максимального запасу міцності при стисненні/розтягуванні (даний показник більше в 2 рази ніж інші із-за еластичності матеріалу). При 0,8 МПа структура починала сильно змінювати свою початкову форму та просідати не витримуючи навантаження, збільшення міцності при додаванні додаткової підтримки в 3 рази. Максимально витримувана вага 31 грами.

	Матеріал	Макс. навантаження, МПа	Вага, g
Структура без підтримки	Cu	0,95	10
	PI	0,4	41
	PET	0,1	97
Структура з підтримкою	Cu	1,6	31
	PI	0,8	82
	PET	0,3	163

**Таблиця 3.8** – Порівняльна таблиця результуючих характеристик після FEM аналізу всіх матеріалів.

## **4. ТЕХНІКА БЕЗПЕКИ ТА ОХОРОНА ПРАЦІ ПРИ РОБОТІ З ПЕРСОНАЛЬНИМ КОМП'ЮТЕРОМ**

### **4.1 Загальні вимоги до роботи з ПК**

При роботі з комп'ютером можливі такі небезпечні та шкідливі фактори, що можуть впливати на користувача:

- підвищений рівень статичної електрики;
- нерівномірність яскравості;
- підвищена яскравість;
- ураження електричним струмом;
- тривалі напруження зору та уваги;
- тривале навантаження.

Для запобігання цим шкідливим факторам потрібно дотримуватися таких правил:

- унеможливити пряме засвічування екрана природним освітленням;
- при природному освітленні мати сонцезахисні засоби;
- не допускати відблиски від частин робочого місця в очі.

Для зручного користування робочого місця біля комп'ютеру слід враховувати такі елементи:

- робочу позу;
- кількість вільного місця де можна розмістити або записувати робочі матеріали;
- кількість місця для користувача;
- можливість огляду елементів робочого місця та поза його межами;
- елементи робочого місця не повинні заважати рухам користувач;
- монітор повинен бути на відстані очей користувача 600-700 мм в залежності від розміру екрану;
- клавіатура повинна бути розміщена або на окремому столі на відстані 100-300 мм від краю з боку користувача або на робочому столі. Не допускати хитання клавіатури;

- стіл повинен відповідати вимогам для розміщення на ньому обладнання що використовують, з урахуванням кількості, розмірів, та особливостей роботи з ним;
- крісло має підтримувати робочу позу під час виконання роботи та давати можливість змінювати її. Тип крісла обирати в залежності від типу та тривалості роботи.

Під виразом “Раціональна поза користувача” розуміють:

- ноги розташовані на підлозі або на підставці для ніг;
- стегна розташовані горизонтально до підлоги;
- руки вертикально;
- лікті зігнуті у межах 70-90°;
- зяп'ястя зігнуті під кутом не більше ніж 20°;
- голова нахилена у межах 15-20°.

Правила встановлювання ПК на робочому місці:

- встановлювати ПК на рівній та твердій поверхні;
- не встановлювати ПК впритул до стіни щоб не загороджувати вентиляційні отвори ПК;
- розетка повинна бути встановлена в доступному місці для своєчасного відмикання ПК в аварійних ситуація;
- не допускати ушкодження чи модифікування шнура живлення;
- не експериментувати з під'єднанням ПК до електромережі.

#### **а. Вимоги безпеки перед початком роботи за ПК**

- огляд робочого місця та наведення ладу якщо там захламлено;
  - перевірити надійність встановлення апаратури на робочому місці.
- Впевнитись в правильному розташуванні монітору, щоб він не стояв на краю, був розташований під прямим кутом до користувача і трохи зверху вниз;
- перевірити стан з'єднувальних шнурів ПК;
  - вставити вилку в розетку і впевнитися, що вона міцно тримається;
  - встановити зручні параметри крісла для користувача;

- за потреби приєднати до ПК іншу необхідну апаратуру.

Приєднувати та відмикати кабелі тільки при вимкненому ПК;

- відрегулювати яскравість та контраст монітору;
- при виявленні несправності, вимкнути комп'ютер та визвати майстра.

#### **б. Вимоги безпеки під час виконання роботи**

Під час роботи за ПК:

- встановити клавіатуру так що вона не хиталась та був доступ до її повороту та переміщення;
- забезпечити велику кількість вільної поверхні для роботи з мишею та зручного упору ліктьового суглоба;
- під час роботи за клавіатурою сидіти рівно та не напружуватися;
- періодично прибирати пил з поверхонь апаратури спеціальними серветками.

При роботі з ПК заборонено:

- самостійно ремонтувати або розбирати компоненти комп'ютера;
- вставляти сторонні предмети до вентиляційних отворів апаратури;
- ставити сторонні ємкості на системний блок.

Тривалість роботи за ПК не повинна перевищувати 2 години. Після цього необхідно зробити перерву в 15 хвилин та комплекс вправ для зниження напруження. Якщо під час роботи виникає дискомфорт в очах, необхідно зробити коротку перерву.

#### **с. Вимоги безпеки після закінчення роботи**

- зберегти інформацію;
- вимкнути ПК;
- прибрати робоче місце.

## Висновок

Після дослідження двох 3D мезоструктур унікальним методом збірки стискаючим-вигином, з додатковою підтримкою та без, з трьох різних матеріалів таких як мідь (Cu), поліімід (PI) та поліетилентерефталат (PET) можна зробити висновок що дані 3D конфігурації цих структур зібраних таким методом можна застосовувати в реальному житті. Що до саме характеристик структур з різних матеріалів, 3D мезоструктури з міді виявилися найміцнішими витримуючи навантаження в 0,95 МПа для структури без підтримки, та 1,6 МПа з підтримкою, але найменш придатної до деформації, тобто при перевищенні навантажень від максимальних велика ймовірність що матеріал зруйнується. 3D мезоструктура з поліімиду виявилася менш міцною, в порівнянні з міддю, маючи показники навантаження 0,4 МПа для структури без підтримки та 0,8 МПа з підтримкою, в цей же час згідно Таблиці 3.1 цей матеріал має найбільший показник с стискання/розтягу, тобто даний матеріал не буде руйнуватися при великому тиску або силі до нього, тобто можна його використовувати як перемикач або тригер при високому тиску на нього, тобто коли зверху щось буде тиснути настільки сильно щоб найвищу точку структури притиснути до підкладки, комбінуючи цей матеріал з міддю (як це описано в оглядовій частині) можна додати гарних електричних характеристик, так як опір поліімиду досить високий  $10^{16}$  Ом/см, та підвищити механічні характеристики одне одного матеріалу. 3D мезоструктури з поліетилентерефталату має найменший показник міцності 0,1 МПа для структури без підтримки та 0,3 МПа з підтримкою, має середні показники стискання/розтягу та найбільший відсоток розтягу матеріалу, приблизно 600%. Комбінуючи цей матеріал з поліімідом або міддю можна досягти покращених механічних та електричних характеристик.



Таким чином, багатошарові концепції проектування і методи виготовлення, в поєднанні з детерміністичними процесами вигину підкладки, відкривають доступ до широкого спектру 3D мезоструктур, починаючи з 2D-попередників, які можуть бути сформовані з використанням найскладніших матеріалів і методів в існуючих мікросистемних технологіях. Десятки прикладів зі шкалами довжин від мікрометрів до сантиметрів, за класами матеріалів від м'яких напівпровідникових тендітних полімерів до пластичних металів, ілюструють основні ідеї та підтверджують корисність комп'ютерного моделювання як інструменту проектування. Кількісний аналіз, заснований на механічно-електромагнітному моделюванні, дозволяє отримати уявлення про взаємозв'язок структури і властивостей цього матеріалу. Як пропонується в основному тексті, в майбутньому додаткові області застосування - це біомедичні пристрої для вирощування та / або моніторингу осередків на активних 3D підмостках і шірокочастотні механічні енергозбиральні комбайни, що інтегрують п'єзоелектричні компоненти в складні структури з спроектованими нормальними режимами вібрації. Вивчення цих інженерних можливостей і встановлення основних міркувань в доступних 3D топологіях є плідними напрямками прикладних і фундаментальних досліджень.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Zheng Yan, Fan Zhang, Fei Liu, Mengdi Han, Dapeng Ou, Yuhao Liu, Qing Lin, Xuelin Guo, Haoran Fu, Zhaoqian Xie, Mingye Gao, Yuming Huang, JungHwan Kim, Yitao Qiu, Kewang Nan, Jeonghyun Kim, Philipp Gutruf, Hongying Luo, An Zhao, Keh-Chih Hwang, Yonggang Huang, Yihui Zhang, John A. Rogers, Mechanical assembly of complex, 3D mesostructures from releasable multilayers of advanced materials, *Sci. Adv.* 2 (9), 2-11 (2016).
2. Park, Yoonseok & Luan, Haiwen & Kwon, Kyeongha & Zhao, Shiwei & Franklin, Daniel & Wang, Heling & Zhao, Hangbo & Bai, Wubin & Kim, Jong & Lu, Wei & Kim, Jae-Hwan & Huang, ying-sheng & Zhang, Yihui & Rogers, John. (2019). Transformable, Freestanding 3D Mesostructures Based on Transient Materials and Mechanical Interlocking. *Advanced Functional Materials.* 29. 10.1002/adfm.201903181.
3. Zhao, Hangbo & Li, Kan & Han, Mengdi & Zhu, Feng & Vázquez-Guardado, Abraham & Guo, Peijun & Xie, Zhaoqian & Park, Yoonseok & Chen, Lin & Wang, Xueju & Luan, Haiwen & Yang, Yiyuan & Wang, Heling & Liang, Cunman & Xue, Yeguang & Schaller, Richard & Chanda, Debashis & Huang, ying-sheng & Zhang, Yihui & Rogers, John. (2019). Buckling and twisting of advanced materials into morphable 3D mesostructures. *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 116. 201901193. 10.1073/pnas.1901193116.
4. Zhao, Hangbo & Lee, Yongjun & Han, Mengdi & Sharma, Bhupendra & Chen, Xuexian & Ahn, Jong-Hyun & Rogers, John. (2020). Nanofabrication approaches for functional three-dimensional architectures. *Nano Today.* 30. 100825. 10.1016/j.nantod.2019.100825.
5. Fan, Zhichao & Yang, Yiyuan & Zhang, Fan & Zheng, Xu & Zhao, Hangbo & Wang, Taoyi & Honglie, Song & Huang, ying-sheng & Rogers, John & Zhang, Yihui. (2020). Inverse Design Methods: Inverse Design Strategies for 3D Surfaces Formed by Mechanically Guided Assembly (*Adv. Mater.* 14/2020). *Advanced Materials.* 32. 2070107. 10.1002/adma.202070107.

6. Fan, Zhichao & Yang, Yiyuan & Zhang, Fan & Zheng, Xu & Zhao, Hangbo & Wang, Taoyi & Honglie, Song & Huang, ying-sheng & Rogers, John & Zhang, Yihui. (2020). Inverse Design Strategies for 3D Surfaces Formed by Mechanically Guided Assembly. *Advanced Materials*. 32. 1908424. 10.1002/adma.201908424.

7. Посібник із безпечної та зручної роботи. Hewlett-Packard [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://h20195.www2.hp.com/v2/getpdf.aspx/4AA7-6192UKUA.pdf>

8. Слободян Ф. Охорона праці при роботі з комп'ютерною технікою / Ф. Слободян // Охорона праці і пожежна безпека. – 2017. - № 9. – С.31-37.

9. Селезень В. Д. Охорона праці в комп'ютерному класі / В. Д. Селезень, В. С. Трохимець // Наукові записки [Національного педагогічного університету ім. М. П. Драгоманова]. Сер. : Педагогічні та історичні науки. - 2014. - Вип. 121. - С. 205-210. - Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzped\\_2014\\_121\\_30](http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nzped_2014_121_30) .

10. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20>

11. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=ab35b368ab9c40848f545c35bdf1a672&ckck=1>

12. <http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=9aebe83845c04c1db5126fada6f76f7e&ckck=1>

13. Laurence W. McKeen, in *Film Properties of Plastics and Elastomers (Fourth Edition)*, 2017

14. Johannes Karl Fink, in *High Performance Polymers (Second Edition)*, 2014