Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий Механіко-машинобудівний інститут

Кафедра технології виробництва літальних апаратів

Рівень вищої освіти – перший (бакалаврський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Прикладна механіка пластичності матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ
В.О. завідувача кафедри
_____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ
«___»_____20__ р.

Дипломний проект

на здобуття ступеня бакалавра

з напряму підготовки 131 «Прикладна механіка»

на тему:«Розробка устаткування для інкрементного формування листових деталей»

Виконав (-ла): студент (-ка) __4__ курсу, групи _МД-91_
(шифр групи)

_____ Авєрков Марко Олександрович _____
(прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Керівник _____доцент, к.т.н. Лавріненков Антон Дмитрович___ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище ім'я, по батькові) (підпис)

Консультант _____ _____ _____
(назва розділу) (посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище ім'я, по батькові (підпис)

Рецензент_____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище ім'я, по батькові) (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі
немає запозичень з праць інших авторів
без відповідних посилань.
Студент _____
(підпис)

Київ – 2023 року

Анотація

Дипломний проект на здобуття ступень бакалавра

Для виготовлення деталей за допомогою витяжки (класичний метод) використовується багато енергії та дороге обладнання, дана робота має на меті дослідження та розробку та проектування установки для інкрементного штампування для формування металевих деталей складної форми для не великих компаній.

Об'єктом дослідження є процес інкрементного листового формування

Мета дослідження полягає в розробці робочої установки для інкрементного штампування деталей складної форми з використанням методу скінчених елементів для встановлення енерго-силових параметрів процесу.

Дослідження включають аналіз наявних досліджень з технології інкрементного формування, включаючи відповідні матеріали, їх параметри та типи установок, моделювання процесу інкрементного формування, розробку експериментальної установки для отримання деталей інкрементним штампуванням та аналіз отриманих результатів.

Отримані результати дослідження мають практичне значення, оскільки було проведено моделювання та дослідження процесу формування напівсферичної деталі та коробчатої форми з алюмінієвого сплаву 7075. Крім того, була розроблена установка для інкрементного штампування, яка дозволяє отримувати деталі різних форм.

Ключові слова: Інкрементна штамповка, інкрементне формування, формування напівсверичного виробу, формування коробчастого виробу, розробка устаткування для інкрементного формування,

Abstract
The bachelor's thesis

To produce parts using the extraction method (the classical method), a lot of energy and expensive equipment are used. This work aims to research, develop, and design a setup for incremental stamping to form complex-shaped metal parts for small companies.

The object of the research is the process of incremental sheet forming.

The research goal is to develop a working setup for incremental stamping of complex-shaped parts using the finite element method to establish the energy and force parameters of the process.

The research includes an analysis of existing studies on incremental forming technology, including relevant materials, their parameters, and types of setups, modeling of the incremental forming process, development of an experimental setup to obtain parts by incremental stamping, and analysis of the obtained results.

The obtained research results are of practical significance since the modeling and investigation of the process of forming a hemispherical part and a box-shaped form from aluminum alloy 7075 were conducted. Additionally, a setup for incremental stamping was developed, allowing the production of parts of various shapes.

Keywords: Incremental stamping, incremental forming, hemispherical forming, box-shaped forming, development of equipment for incremental forming.

Зміст

ВСТУП 10
РОЗДІЛ 1 12
ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІНКРЕМЕНТНИМ ШТАМПУВАННЯМ 12
1.1.Штампування класичне 12
1.2.Інкрементне штампування 13
1.3.Програмне забезпечення 14
1.4. Вибір матеріалу для формування 16
1.4.1. Алюмінієві сплави 16
1.4.2. Титанові сплави 19
1.4.3. Нержавіюча сталь 20
1.4.4. Мідь 21
1.5. Види установок 23
1.5.1. ЧПК верстати 23
1.5.2. Робот маніпулятор 28
1.6. Інструменти для формування 29
1.7. Підсумок 30
РОЗДІЛ 2 32
КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІНКРЕМЕНТНОГО ФОРМУВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ABAQUS 32
2.1. Розрахунок траєкторії руху в MathLab 33
2.2.Схеми процесу моделювання Напівсфери 1мм 34
2.3.Схеми процесу моделювання Напівсфери 2мм 42
2.4.Схеми процесу моделювання коробчастої заготовки 1,5мм 45
РОЗДІЛ 3 51
Розробка установки для інкрементного формування 51
3.1. Зусилля для установки 51
3.1.1. Потужність 51
3.1.2.Крутний момент 52
3.2. Розрахунок підшипників 53
3.3. Вибір деталей для установки 56

3.3.1. Каркас 56
3.3.2. Плити 59
3.3.3. Стандартні деталі 64
3.3.4. Електроніка 72
3.3.5. Керування 75
3.3.6. 3D Моделювання 75
3.3.7. Конструкція установки ЧПК 77
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ 80
ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ 82

ВСТУП

Актуальність теми. Інкрементне штампування - це досить новий метод формування металевих деталей, який ще не отримав широкого розповсюдження в промисловості по світу. Цей метод має значний потенціал для покращення якості та ефективності виготовлення деталей, що робить його цікавим для дослідження та розвитку. Цей метод дозволяє виготовляти деталі зі складною формою та високою точністю, що дозволяє знизити витрати на подальшу обробку та збільшити продуктивність виробництва, якщо порівнювати зі звичайними способами формування металевих виробів. Одною з особливостей даного способу є те, що він підходить для виготовлення деталей зі складною геометрією в масштабах малого та середнього виробництва, тому розвиток цієї теми буде актуальним не тільки зі сторони оптимізації виробництва, але й ще з розвитку малого бізнесу, що тягне за собою збільшення робочих місць та додаткові кошти до бюджету держави.

Тому тема дипломної роботи є актуальна, тому що несе в собі вивчення процесів моделювання, програмування та вдосконалення процесу формування листового металу.

Мета роботи. Проектування та створення робочої установки (обладнання) для інкрементного формування деталей складної форми за допомогою методу скінченних елементів (МСЕ) х з метою встановлення енерго-силових параметрів процесу.

Задачі дослідження:

- проаналізувати данні досліджень по технології інкрементного формування; які матеріали та їх параметри (товщина) підходять для обробки; типи та види установок; параметри робочого інструменту;
- моделювання процесу інкрементного формування;
- розробка експериментальної установки для отримання деталей за допомогою інкрементного формування;

- проаналізувати результати проведеного дослідження та конструкторської роботи;

Об'єкт дослідження. Процес інкрементного листового формування

Предмет дослідження. Параметри та режими процесу інкрементного листового штампування

Методи дослідження. Дослідження процесів формування інкрементним формування відбуваються в програмах Abaqus та Matlab, проектування конструкції устаткування відбувається в програмі SolidWorks

Практичне значення отриманих результатів:

- проведено дослідження та скінчено-елементне моделювання напівсферичної деталі товщиною 1 та 2 міліметра, а також коробчатої форми із алюмінієвого сплаву 7075 (аналог вітчизняного алюмінієвого сплаву В95)в програмному комплексі Abaqus;
- розроблено установку для інкрементного штампування для отримання деталей різних форм.

РОЗДІЛ 1

ТЕХНОЛОГІЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІНКРЕМЕНТНИМ ШТАМПУВАННЯМ

1.1.Штампування класичне

Якщо порівнювати інкрементне формування з звичайним класичним, то можна виділити, як позитивні так і негативні сторони обох цих видів. Звичайне (класичне) штампування базується на виготовленні деталей з металевої заготовки за допомогою спеціального обладнання - штампів. В ході класичного штампування метал перетворюється на деталь більш складної форми з використанням одного або більше операційних переходів. У класичному штампуванні є деякі обмеження. Цей процес включає в себе використання штампів з різними формами і розмірами, які встановлюються на пресі. Для кожної деталі (різною за формою) потрібно виготовляти окремий штамп, чи здійснювати заміну його робочих деталей (пуансон, матриця). Зокрема, при виготовленні однієї деталей зі складними формами необхідно використовувати різні штампи для різних операцій. Це призводить до збільшення часу на підготовку та налаштування обладнання, а також до збільшення витрат на обладнання, матеріали та персонал.

Класичним штампуванням можна отримувати деталі простої форми, або симетричної (з використанням одного-двох штампів). Для виготовлення деталей складної форми необхідно використовувати велику кількість штампового обладнання. До класичного штампування відноситься: витяжка металу, прокат, розтягування та інші способи. Не дивлячись на це основна ідея класичного штампування полягає в тому, щоб використовувати штампи для виготовлення великих кількостей ідентичних деталей з мінімальними затратами на виробництво. Класичне штампування широко використовується в виробництві металевих деталей, таких як кузови автомобілів, меблів, апаратури та інше.

Підводячи підсумки, можна сказати, що класичне штампування є ефективним способом виробництва деталей з високою продуктивністю та точністю.

1.2.Інкрементне штампування

Інкрементне листове формування або поступове формування листів (Incremental Sheet Froming - ISF) - це процес формування листів металу для зазвичай дрібносерійного виробництва складних деталей, шляхом поступового точкового впливу на матеріалу за допомогою інструменту (пуансон).

У процесі інкрементного формування, форма листа металу поступово змінюється, набуваючи форми деталі. Інструмент поступово деформує лист металу, рухаючись по заданим координатам (X,Y,Z), а не за один чи декілька переходів, як в класичному штампуванні.

Не дивлячись на те, що зазвичай інкрементне формування використовують в невеличких обсягах, він здобув велику популярність для масового виробництва автомобільних, меблевих елементів, та компонентів електричної побутової техніки, у яких витрати на розробку, виготовлення та випробування штампового обладнання є завеликі, що дає змогу не робити зайві витрати. Однак як зазначають в [1], розуміння всебічного впливу площі контакту та напруження матеріалу на силу деформування все ще є недостатньо вивченою темою, що має критичне значення для отримання зворотної інформації під час процесу, оптимізації самого процесу та проектування устаткування тощо. Тому ця робота міститиме елементи, які спрямовані на покращення прогнозування при інкрементному формуванні в програмному середовищі.

Слід зазначити також, що інкрементне формування бере свій початок з технології обробки металів, яка почалася у 1940-х роках з розробки простих методів витягування. При розвитку гідравлічного пресового обладнання набули розвитку процеси глибокого витягування. З появою комп'ютерних технологій та чисельних методів інженерного аналізу у 1980-х роках, інкрементне штампування стало ширше застосовуватися в промисловості.

1.3.Програмне забезпечення

Як згадувалось раніше, при інкрементному формуванні використовуються програми, які допомагають змоделювати процес деформації матеріалу. Вони відіграють важливу роль в інкрементному формуванні, оскільки саме вони дозволяють інженерам створювати моделі деталей, розраховувати параметри процесу і контролювати результати виробництва.

В результаті огляду програмного забезпечення, яке використовується для інкрементного формування, може вирізнити такі програми, як Abaqus, LS-DYNA, MSC Marc, PAM-STAMP, AutoForm та інші. Наприклад, Abaqus - це програмне забезпечення для складного моделювання механічних систем. Воно дозволяє інженерам моделювати процеси формування металевих деталей, включаючи інкрементне формування. Abaqus має потужні інструменти для аналізу напружень, деформацій і температурних полів, що дозволяє інженерам розробляти оптимальні параметри процесу і прогнозувати результати виробництва. В роботі [2], можна побачити приклад чисельного дослідження процесів інкрементного формування за допомогою Abaqus.

LS-DYNA є іншим програмним забезпеченням, яке використовується для інкрементного штампування. Воно має широкі можливості для моделювання складних процесів формування, включаючи високошвидкісне і глибоке витягування. LS-DYNA дозволяє інженерам прогнозувати результати

виробництва з високою точністю, забезпечуючи точне відтворення фізичних процесів, які відбуваються в процесі формування.

PAM-STAMP є ще однією популярною програмою для інкрементного штампування. Вона дозволяє інженерам моделювати процеси формування з використанням різних методів інкрементного штампування, включаючи метод асиметричного інкрементного формування листів AISF. PAM-STAMP має різноманітні інструменти для аналізу процесів формування і дозволяє інженерам розробляти оптимальні параметри процесу, що зменшує витрати на виробництво.

AutoForm - це ще одне програмне забезпечення для інкрементного формування, яке дозволяє інженерам створювати моделі деталей з високою точністю. Воно має інструменти для аналізу технологій формування, що дозволяє інженерам прогнозувати результати виробництва з високою точністю. AutoForm також дозволяє інженерам створювати оптимальні параметри процесу формування та зменшувати витрати на виробництво. Дослідження, проведені з використанням цих програм, дозволяють інженерам вдосконалювати процес інкрементного формування. Наприклад, в дослідженнях з використанням LS-DYNA було показано, що збільшення швидкості штампування може призвести до збільшення напружень та деформацій. Однак застосування нових технологій та оптимізація параметрів процесу можуть допомогти зменшити ці ефекти.

Таким чином, програмне забезпечення для інкрементного формування є важливим інструментом для інженерів, що дозволяє їм розробляти оптимальні параметри процесу формування, зменшувати витрати на виробництво та покращувати якість виготовлених деталей. Вибір програмного забезпечення для інкрементного формування залежить від конкретних потреб

інженера та виробничої компанії. Кожна програма має свої переваги та недоліки. Наприклад, Abaqus забезпечує потужні інструменти для аналізу напружень, деформацій та температурних полів, тому для цієї роботи був використаний саме він.

1.4. Вибір матеріалу для формування

Вибір матеріалу для інкрементного формування залежить від багатьох факторів, це може включати в себе як товщину матеріалу, так і його властивості та параметри установки, які визначаються вибраною технологією штампування.

Однак, деякі марки матеріалів мають властивості, які роблять їх більш підходящими для інкрементного формування. Зазвичай, для інкрементного формування використовують м'які метали з високою пластичністю, такі як алюміній, але дослідження показали, що також підходять для формування такі матеріали, як латунь та мідь [17], титан, золото, срібло і платина. Вони здатні до значного деформування без розривів та відривів, що робить їх підходящими для процесу формування без використання штампового оснащення.

Крім того, частина з цих матеріалів мають низьку жорсткість та високу міцність при розтягуванні. Але основним матеріалом залишається алюміній.

1.4.1. Алюмінієві сплави

Сплав 2024 є одним з найпопулярніших алюмінієвих сплавів, який використовують для інкрементного формування. Цей сплав має дуже високу міцність і зносостійкість, що дозволяє йому витримувати великі механічні навантаження без деформації або пошкодження, в дослідженнях [3] [4] автори використали експериментальні та чисельні методи для вивчення процесу формування та визначення межі деформації та руйнування листів алюмінію.

Результати дослідження показали, що алюмінієвий сплав 2024 може успішно деформуватись за допомогою інкрементного формування, і що ефективність процесу залежить від величини витягування. Дослідження показали, що сплав 2024 може бути успішно використаний в інкрементному формуванні для виготовлення різних деталей.

Також використовується сплав 7075. Автори [5] проводили дослідження формування листових заготовок зі сплаву Al 7075 за допомогою процесу інкрементного формования та вивчали вплив різних параметрів на формування, а саме таких як швидкість переміщення інструменту, глибина формування, кут нахилу інструменту та кількість проходів.

В результаті досліджень було встановлено, що сплав Al 7075 має високу деформованість при інкрементній формовці. Також було проведено аналіз місць пошкоджень на зразках після формування. Таким чином, сплав Al 7075 може бути використаний для виготовлення складних деталей з високою точністю при інкрементній формовці. Загалом в якості заготовок для інкрементного формування використовують велику кількість сплавів алюмінію і процес дослідження мало чим відрізняється один від одного. Декілька слів про сплави, які також використовуються в процесі.

У статті [7] автори провели дослідження впливу різних параметрів на деформованість сплаву 3003, таких як швидкість переміщення деформуючого інструмента, глибина формування, кут нахилу деформуючого інструменту та кількість проходів. Згідно з отриманих даних, найменший рівень шорсткості поверхні (Ra) досягався при малих швидкостях руху інструмента 500 мм/хв, значення Ra склалало 0,7 мкм .

Проведено дослідження впливу товщини на формування сплаву 5052 [8] за допомогою визначення діаметра та висоти деталі після проходу і порівняли їх з теоретичними даними. Результати показали, що збільшення товщини

листа спричиняє зменшення деформованості заготовки для сплаву AA5052-H32. Також було виявлено, що оптимальна товщина листа для формування залежить від геометрії деталі, а саме її діаметра. Наприклад, для деталі з діаметром 30 мм оптимальна товщина листа складала 0.8 мм, а для деталі з діаметром 40 мм - 1.2 мм.

В [9] досліджується деформування алюмінієвого сплаву 6061 товщиною 1 мм. Процес інкрементного формування проводився з різними формами інструменту, такі як циліндричний, конічний та кульковий, для формування деталей з різними формами та профілями.

У статті [10] досліджувалося формування алюмінієвих сплавів 2024, 5083 та 7075. Було встановлено, що застосування підтримки дозволило збільшити глибину формування до 90 мм для сплаву 2024, 60 мм для сплаву 5083 та 55 мм для сплаву 7075. Також було показано, що застосування підтримки знизу знижує шорсткість поверхні формованої деталі. Зокрема, шорсткість поверхні складала 4,02 мкм, для сплаву 2024, 4,34 мкм, а для сплаву 5083 та 5,29 мкм для сплаву 7075. З'ясувалось, що використання опорної матриці дозволяє зменшити зусилля на робочій матриці, що знижує зношування матриці та підвищує точність формування. Вони також з'ясували, що збільшення глибини формування призводить до збільшення напруження в матеріалі, що може спричинити пошкодження деталі. Застосування холодного висаджування перед формуванням дозволяє зменшити напруження в матеріалі та підвищити його формованість. Крім того, оптимальні параметри формування були визначені для кожного з досліджуваних сплавів: для Al2024 - швидкість формування 100 мм / хв, для Al5083 - швидкість формування 100 мм / хв, а для Al7075 - швидкість формування 50 мм / хв.

Підводячи підсумки можна сказати, що алюмінієві сплави, зокрема 2024, 5052, 6061, 7075 та інші мають високу пластичність, вище вказанні статті підтверджують можливість успішного використання інкрементного

формування, але вони також показують, що ефективність процесу залежить від деяких факторів, таких як кут нахилу деформуючого інструменту, глибини витягування, швидкості деформації та інші. Товщина матеріалу має значний вплив на процес інкрементного формування. Зменшення товщини матеріалу може підвищити його деформованість та знизити відхилення від заданої форми, а також зменшити напруження, що виникають у матеріалі. Однак, занадто тонкий матеріал може призвести до зниження міцності та стійкості, деформації виробів. Тому, вибір оптимальної товщини матеріалу для процесу інкрементного штампування потребує балансування між деформованістю та міцністю виробу, зазвичай обирають товщину в діапазоні від 0,5 мм до 6 мм.

1.4.2. Титанові сплави

Титанові сплави також можуть використовуватись в інкрементнтній формовці. Титан має високу міцність і легкість, що робить його привабливим матеріалом для виробництва легких, але міцних деталей. Однак, титанові сплави мають низьку пластичність та високу тенденцію до зародження тріщин, що може створювати проблеми з формуванням. Тому, дослідження в галузі інкрементного формування титанових сплавів націлені на встановлення оптимальних умов процесу для досягнення максимальної деформованості і мінімізації ризику виникнення тріщин.

У статті [11] досліджували формування тонкостінних деталей з титанового сплаву Ti-6Al-4V товщиною 1 мм. Для інкрементної формовки було використано метод, який базується на поступовому збільшенні глибини обробки під час проходження інструменту над листом, з шагом збільшення глибини обробки 0,2 мм. Дослідники використовували електроімпульсне підсилення (EPA) для поліпшення процесу інкрементної формовки. Під час EPA струм проходить через інструмент та лист, що дозволяє стимулювати пластичність матеріалу та знижувати енергію формування. Використовувалися різні параметри EPA, включаючи струм і тривалість

електричного розряду. Застосування цього методу інкрементної формовки та електроімпульсного підсилення дозволило покращити формовку тонкостінних деталей з титанового сплаву.

В інкрементній формовці титанові сплави показують хорошу деформованість, але для досягнення більшої ефективності формування можуть бути використані додаткові технології. Проте, їхні механічні властивості можуть змінюватися під час процесу інкрементної формовки, що може вплинути на їхню довговічність та міцність. Багато статей, досліджували Ti-6Al-4V, один з найбільш поширених титанових сплавів, в інкрементній формовці. Загалом, дослідження показали, що оптимальні умови для інкрементної формовки титанових сплавів полягають у використанні оптимальних параметрів, таких як швидкість інкрементної формовки та параметри інструмента. Для кращого розуміння деформованості титанових сплавів в інкрементній формовці, необхідні подальші дослідження з використанням різних сплавів, різних товщин та різних параметрів інкрементної формовки.

1.4.3. Нержавіюча сталь

Не дивлячись на те, що основними видами матеріалів для дослідження являються алюмінієві, та титанові сплави, але крім них вивчають ще й деформування нержавіючих сталей. Нержавіюча сталь зазвичай має гарну деформованість під час інкрементної формовки, особливо якщо вона містить низьку кількість вуглецю і високі домішки нікелю і хрому. Однак, деформованість також залежить від конкретного типу нержавіючої сталі та її механічних властивостей. Деякі типи нержавіючої сталі можуть бути більш складними для формування, особливо ті, які містять більш високу кількість вуглецю і інших домішок.

У статті [14] було проведено експерименти процесу формування сталі AISI304 зі зміною глибиною формування від 0.5 до 1.5 мм, швидкості руху інструмента 300-700 мм/хв та радіуса інструмента (4-10 мм). Зокрема, виявлено, що зменшення швидкості руху інструмента з 700 мм/хв до 300 мм/хв при збереженні глибини поглиблення на рівні 1 мм, підвищує деформаційну стійкість листа на 50%.

Аналіз результатів досліджень показав, що вплив параметрів процесу на формування листів в SPIF-Single Point Incremental Forming може бути описаний за допомогою математичних моделей з використанням методу скінченних елементів. Також було виявлено, що формування на поверхні з виїмками або деформації можуть призвести до руйнування матеріалу при певних параметрах обробки.

Загалом, нержавіюча сталь може бути використана в процесі інкрементного формування з деякими обмеженнями. В загальному випадку підігрівання матеріалу може поліпшити його формування під час інкрементної формовки, але це залежить від конкретних умов і налаштувань процесу. Крім того, оптимальні режими обробки, такі як швидкість подачі, глибина обробки та кут інструменту, повинні бути досліджені для досягнення оптимальних результатів формування та мінімізації пошкоджень матеріалу. Однак, дослідження в цій області все ще тривають, і можливі нові відкриття та технологічні покращення для використання нержавіючої сталі в інкрементній формовці.

1.4.4. Мідь

Використання міді в інкрементному штампуванні є досить поширеним, оскільки мідь має хорошу оброблюваність, добру електропровідність та теплопровідність, а також відносно високу міцність та корозійну стійкість. Дослідження показали, що мідь добре піддається інкрементній формовці з використанням різних технологій та параметрів. Однак, при високих

швидкостях обробки, мідні деталі можуть виявляти тенденцію до розриву, що потребує додаткових заходів контролю якості та відповідних виборів параметрів процесу. Дослідження також показали, що мікроструктура та механічні властивості міді після інкрементного формування можуть бути змінені в залежності від параметрів процесу, включаючи швидкість обробки, глибину обробки та форму інструменту.

У статті [15] автори проводять дослідження мікроструктури міді та який вплив має змащування на властивості формовки міді при одноточковому інкрементному формуванні рис.1 [23]. В цьому досліді швидкість переміщення деформуючого інструменту склала 1000 мм/хв, що є в декілька разів більше ніж для тих же алюмінієвих сплавів,. Автори встановлюють взаємозв'язок між мікроструктурою міді та її змащувальними властивостями та досліджують вплив змащувальної рідини на процес формування. Змащення може мати позитивний вплив на якість поверхні та зменшити знос інструменту. Тип змащення може змінюватись залежно від типу матеріалу, що формується. Крім того, твердість матеріалу інструменту також може впливати на його знос при SPIF.

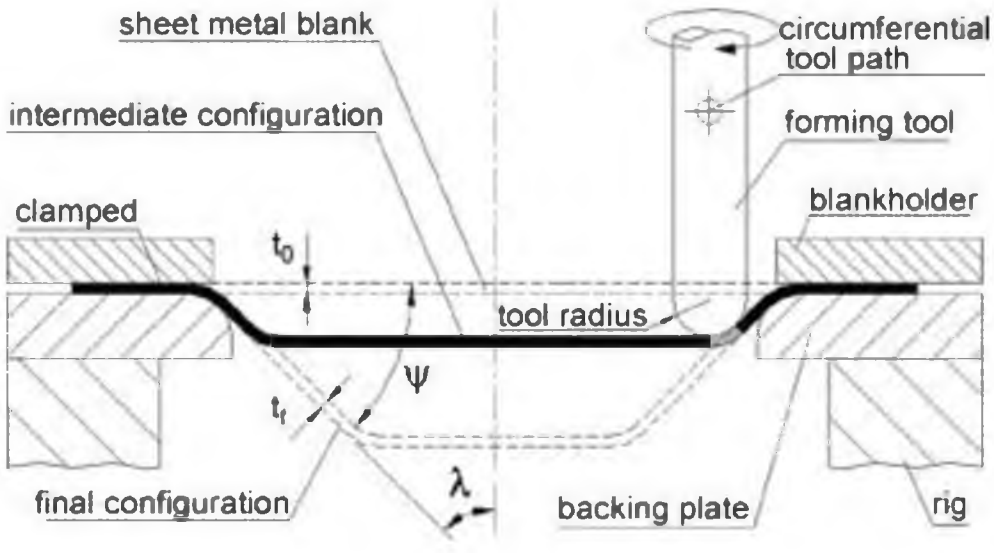


Рис. 1 Одноточкове інкрементне формування

1.5. Види установок

На сьогоднішній день, установки можна розділити на два типи, а саме на верстати ЧПУ, їх використовують як в лабораторних умовах, так і в малих масштабах виробництва. Другий тип це роботизована рука – маніпулятор.

Існують основні схеми для інкрементного формування (рис. 2), кожна з цих схем може використовуватись в ЧПУ верстатах, з роботами використовують схему з одним пуансоном, або з двома.

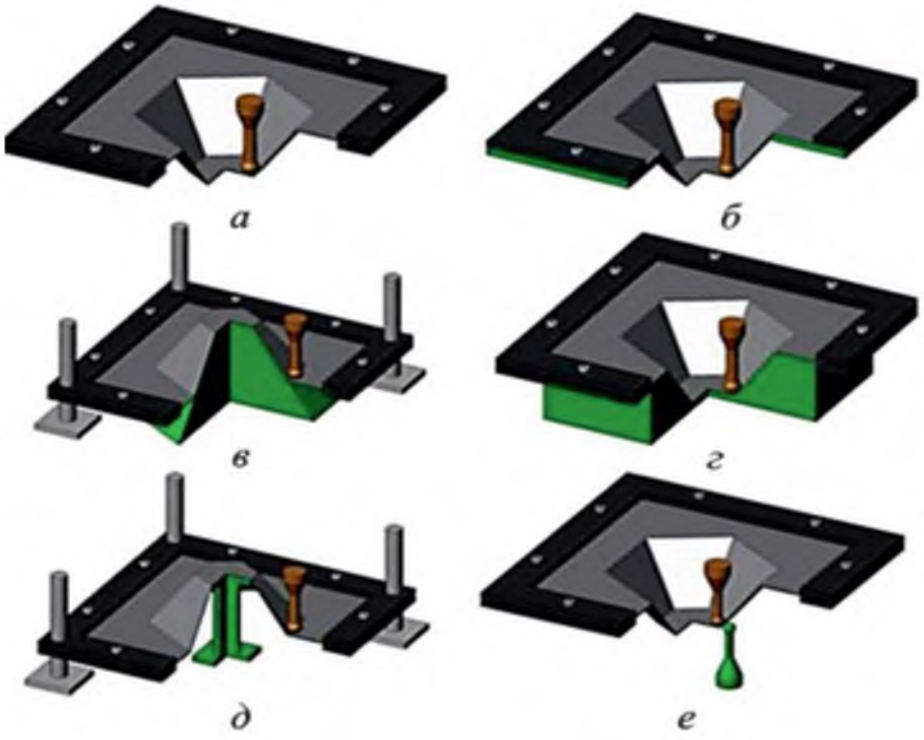


Рис. 2 Схеми інкрементного формування:

а - з одним пуансоном; б - з пуансоном і опорною

плитою під заготівлею; в, г - з опорною матрицею;

д - з нижнім підпором; е - з контр пуансоном

1.5.1. ЧПК верстати

В інкрементній формовці існують декілька різних типів установок, одним з найпоширеніших типів установок для інкрементного штампування є верстати з числовим програмним керуванням (ЧПК).

Вони дозволяють автоматично виконувати складні операції з високою точністю та повторюваністю, що забезпечує якість та ефективність виробництва. Завдяки ЧПК-установкам можна виготовляти різні деталі з різними розмірами та формами, від маленьких до великих, що робить їх універсальними виробничими інструментами.

Наглядним прикладом є установка наведена на рис.3. Лист металу кріпиться (фіксується) до нижньої частини установки (матриці), які повторює зовнішній контур деталі. Зазвичай заготовка кріпиться за допомогою рамки, яку прикручують та затягують.

В автоматизованих схемах це може робити за допомогою гідравлічної установки, яка буде притискати рамку, це прискорить процес виробництва. В цій установці інструмент переміщається по всім трьом осьям (X,Y,Z), за допомогою направляючих гвинтів та електродвигунів.

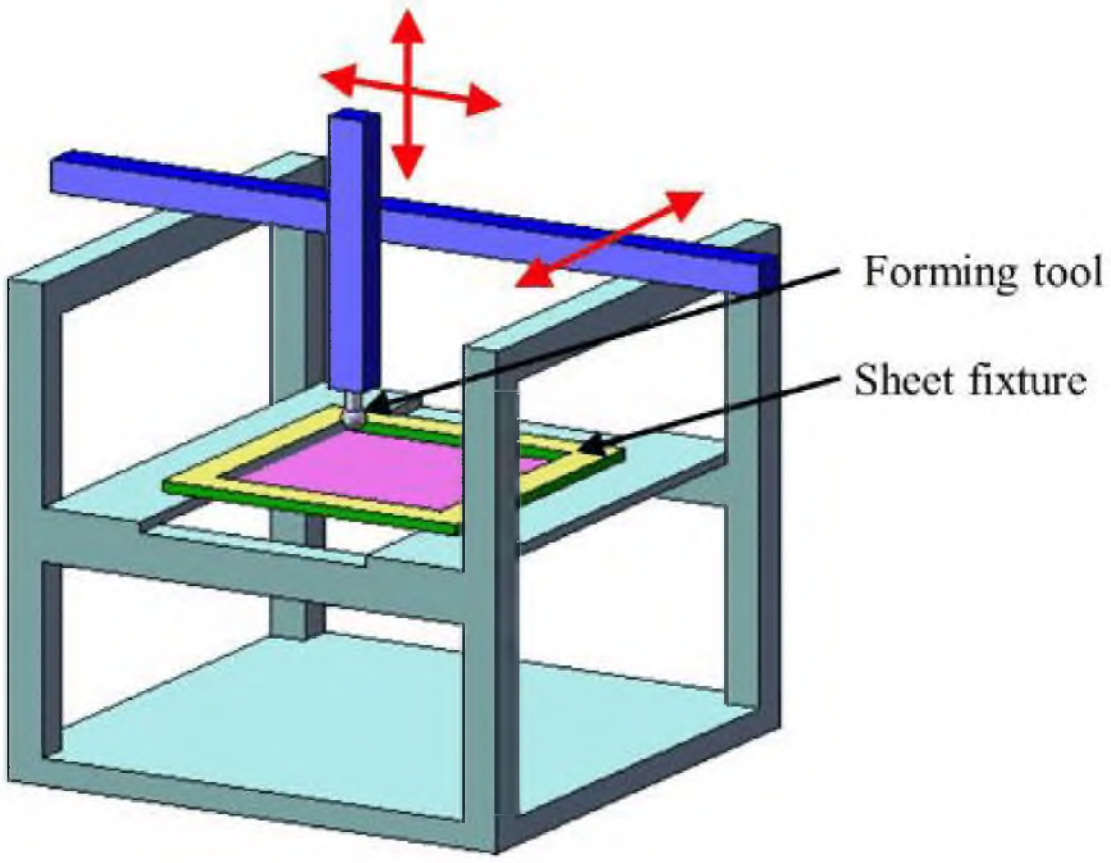


Рис. 3 Установка ЧПУ для інкрементного штампування [16]

Якщо характеризувати цю конструкцію, то можна сказати, що переміщається тільки наш інструмент, лист нашого матеріалу не рухається.

Другий тип установок - це переміщення інструменту та стола одночасно рис.4,таки тип установки фіксує одну вісь, що додає міцності для конструкції установки.

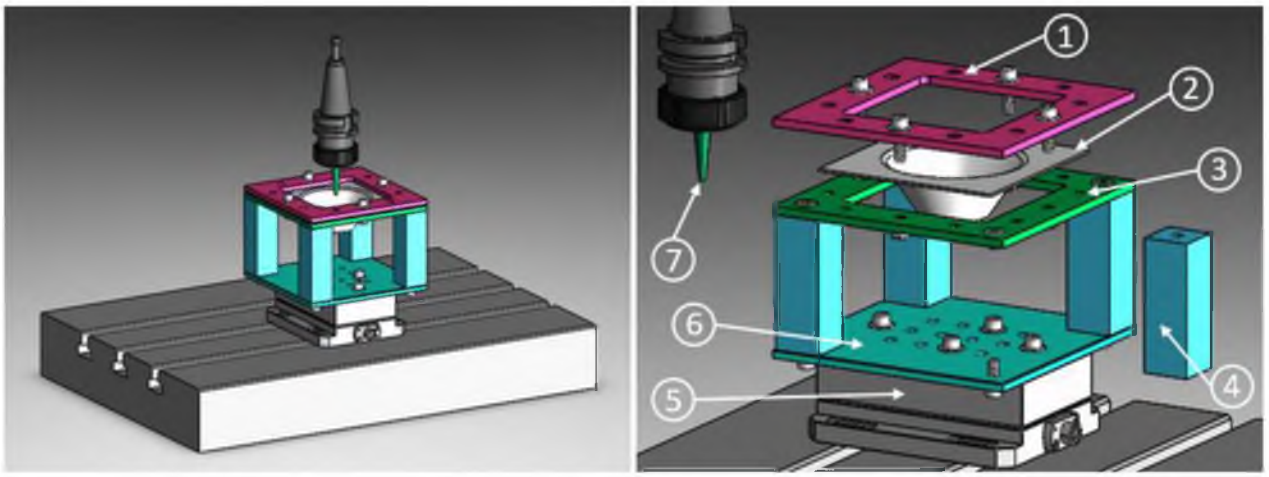


Рис. 4 Верстат ЧПК, налаштований на одноточковий процес поступового формування: (1) Верхня пластина; (2) аркуш чистий; (3) нижня пластина; (4) опора; (5) стіл для переміщення; (6) пластина основа та (7) формувальний інструмент [18].

Вона жорстко закріплена рис. 5, а роль переміщення цієї вісі виконує встановлений стіл з притискачем для заготовки.



Рис. 5 Установка з фіксованою одною віссю (X) [19]

Третій тип установок ЧПК - це установки зі столом який міняє своє положення по осі Z (вертикально), це дозволяє зменшити навантаження на верхню частину, яку можна міцно закріпити. Підвод інструменту здійснюється за допомогою стола з заготовкою рис.6 .

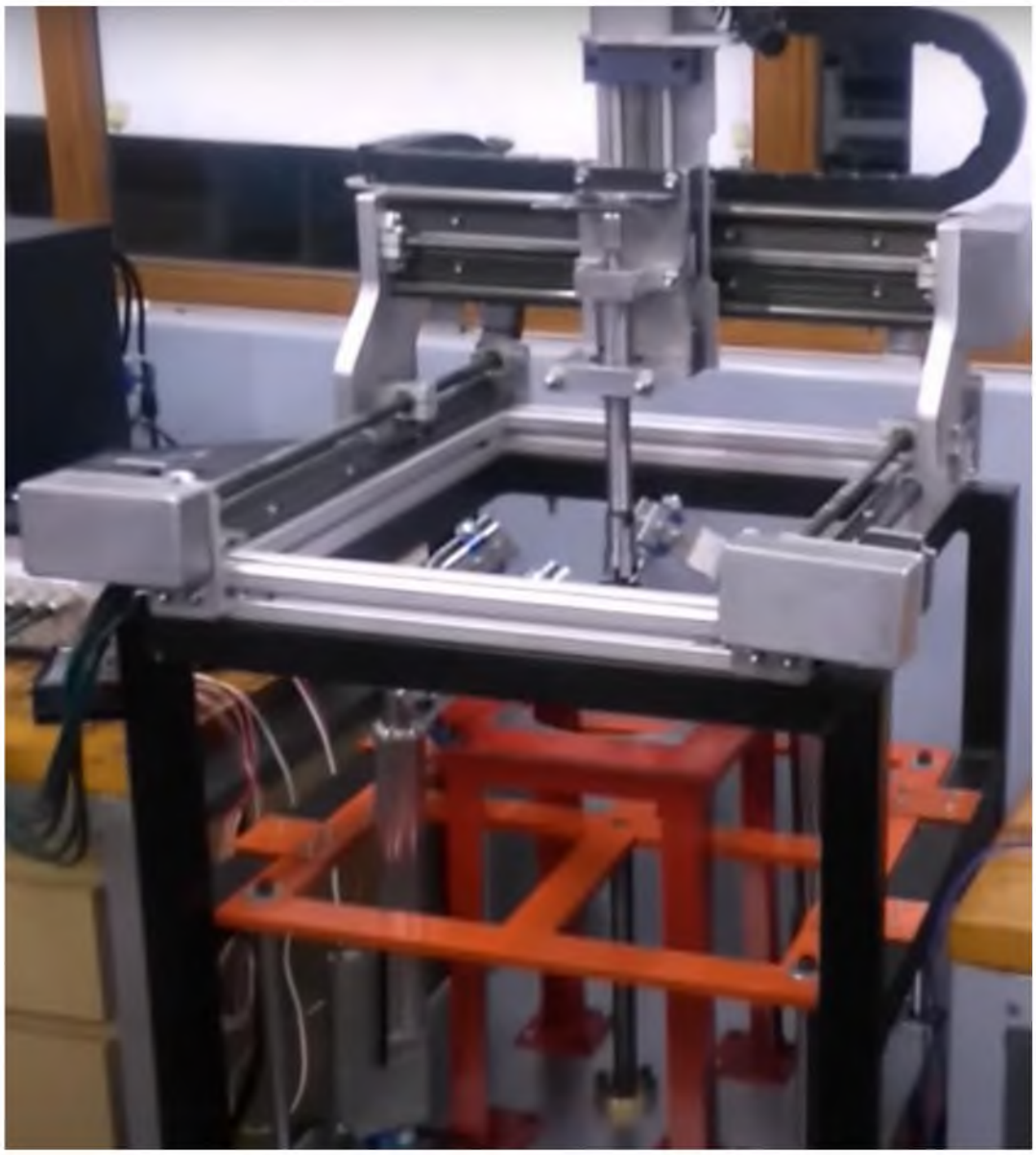


Рис. 6 ЧПК установка з привідним столом [20]

До плюсів ЧПК верстатах можна виділити такі аспекти як:

- висока точність,
- повторюваність,
- автоматизація,
- гнучкість налаштування,
- можливість обробки складних форм.

Але мінуси такої установки також присутні: обмеження розмірів деталей, вразливість до збоїв, складність програмування, і відносно велика ціна.

1.5.2. Робот маніпулятор

Найсучаснішим типом є роботизовані руки – маніпулятори, вони здатні видавати високу потужність та точність. Такі установки використовують в якості тримача інструменту (пуансона). Допоміжним елементом, для роботів маніпуляторів є кріплення (Fixture), на ньому закріплюється лист металу рис. 7. До переваг роботизованих маніпуляторів можна віднести:

- Автоматизацію процесу штампування
- Високу точність та повторюваність операцій штампування
- Можливість використання різних інструментів
- Можливість виробництва різних типів деталей.

Проте, роботизовані маніпулятори також мають свої недоліки, основним є їх початкова вартість та обслуговування

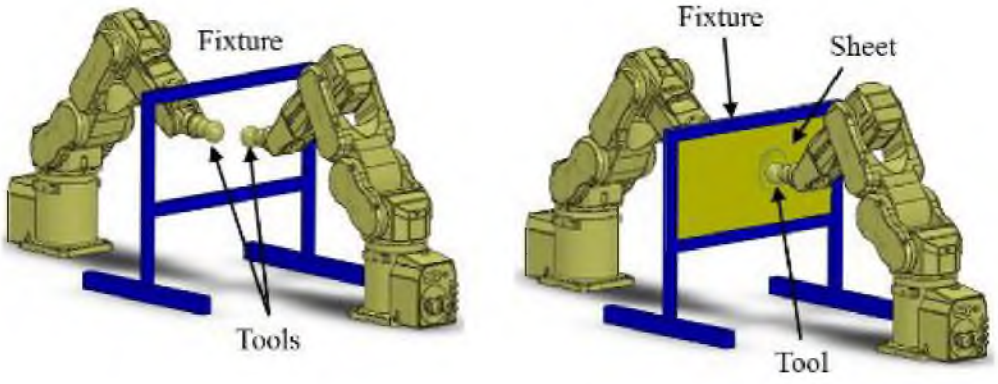


Рис. 7 Схема інкрементного штампування роботом [16]

Підводячи підсумки можна сказати, що ЧПК верстати є більш практичними з того точки зору їх складності та ціни. З огляду на проведений аналіз в якості типу установки, яку будемо проектувати обираємо ЧПК верстат з привідним столом.

1.6. Інструменти для формування

Інструменти для інкрементного формування на ЧПК верстатах повинні мати правильну геометрію, що забезпечує точність та повторюваність процесу. Вони також повинні бути виготовлені з високоякісних матеріалів, що мають високу міцність і твердість, щоб забезпечити довговічність інструментів та запобігти їх зношуванню.

Деформуючий інструмент це суцільний стрижень зі сферичним або напівсферичним індентором. Головка інструменту зазвичай виготовляється з інструментальної сталі, яка підходить для обробки більшості матеріалів. Щоб уникнути зношуванню інструменту, головку інструменту можна покрити твердосплавним сплавом [21].

Вибір діаметру інструменту для інкрементної формовки залежить від кількох факторів, таких як матеріал заготовки, її товщини, розміру та складності деталі, а також типу інкрементної формовки, яка використовується. Загалом, для тонкостінних заготовок рекомендується використовувати інструменти з меншим діаметром, що дозволить досягти більшої точності та зменшити відхилення від заданої геометрії.

Однак, при обробці товстостінних заготовок більший діаметр інструменту може бути більш ефективним, оскільки дозволить досягти більшої швидкості роботи та зменшити час циклу обробки. Крім того, діаметр інструменту повинен бути підібраний з урахуванням глибини проходу, що залежить від типу інкрементної формовки та особливостей конкретної задачі. Зазвичай, чим більший діаметр інструменту, тим глибше можна робити прохід. Тому, вибір діаметру інструменту для інкрементної формовки повинен здійснюватись з урахуванням конкретної задачі та технічних можливостей устаткування.

З марок сталі можна виділити такі як:

- 40ХФА, 38ХМА - Сталі конструкційні леговані є аналогом сталі марки 4140
- 40ХН2МА, 40Х2Н2МА, 38Х2Н2МА, 36Х2Н2МФА38ХМА - Сталі конструкційні леговані є аналогом сталі марки 4340
- 4Х5МФ1С - Сталь інструментальна штампова, є аналогом AISI H13



Рис 8: Інструменти з твердосплавних сплавів з діаметрами 6, 10 та 30 мм [22].

1.7. Підсумок

Підводячи підсумки, можна сказати, що інкрементне формування, є перспективним, його потенціал вивчено не до кінця. Він набув популярності в таких сферах як автомобільна промисловість та виготовлення біомедичних продуктів (елементи протезів, пластини). Беручи до уваги використані літературні джерела, можна сказати, що більшість типів матеріалу підходять для процесу формування, але ефективність обробки буде залежати від характеристик матеріалу, він повинен бути достатньо пластичним. Також іншими параметрами які впливають на перебіг процесу формування являється вибір геометрії деформуючого інструменту, кут нахилу та швидкість формування. Також як зазначалося в літературних джерелах, фактичне

зусилля при формуванні під час експериментів було нижче розрахованого CAD системами, що дозволяє вибрати електродвигун з достатнім запасом потужності. Проектуватися буде саме CNC (ЧПК) верстат, лабораторних розмірів, так як він має свої переваги порівняно з роботизовоною рукою, а саме його розробка, виготовлення та складання буде значно дешевше.

РОЗДІЛ 2

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ІНКРЕМЕНТНОГО ФОРМУВАННЯ В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ ABAQUS

Для того, щоб визначити необхідну потужність, для вибору електродвигунів, потрібно провести скінчено-елементне моделювання характерних деталей, які будуть виготовлятися. В даному випадку дві моделі, деталь «Напівсфера» та «Усічена чотирикутна піраміда», моделювання проведено в середовищі програмного комплексу Abaqus, так як вбудовані можливості програми дозволяють задавати складні траєкторії руху інструмента.

При моделюванні в Abaqus потрібно слідувати наступній послідовності.

Першим етапом є підготовка моделей інструменту та заготовки:

— Вибір схеми деформування
— Задання траєкторії руху інструмента по координатах в програмі Excel

Другий етап це задання параметрів моделювання:

— Реологія матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуансона, щільність);
— Параметри розрахунку (граничні умови, величина кроку, час деформування, амплітуди руху інструменту).
— Генерація сітки скінченних елементів, вибір типу скінченного елементу, кількість кінцевих елементів,

Третій етап це аналіз результатів отриманої деталі:

Визначення деформуючого зусилля на інструменті.
— Аналіз напружено-деформованого стану матеріалу деталі

В якості матеріалу було вибрано матеріал В95.

Параметри моделювання напівсфери:

Параметри моделювання	Значення
Заготовка, лист	150*150*1 мм
Радіус матриці	5 мм
Діаметр сферичного пуансона (абсолютно жорсткий)	10 мм
Коефіцієнт тертя	0,15

Розмір скінченного елементу	2
Величина кроку	30 мм/сек
Модуль Юнга	70 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0,33
Щільність	2,7 г/см^2

2.1. Розрахунок траєкторії руху в MathLab

Для того, щоб задати необхідну траєкторію, використовується програма MathLab, так як вона дозволяє побудувати тривимірну траєкторію (в плоскостях X, Y,Z), використовуючи формули для 3Д фігур, та мову програмування Piton. Наступна послідовність кроків можна використовувати для задання різних траєкторії. Принцип задання не змінюється.

Перший крок для даної моделі: задати період часу (час операції)

```
>>time=linspace(0,500,5001) ;
```

Другий крок: виведення цих даних в таблицю .xlsx

```
>>xlswrite(`time.xlsx`,time)
```

Третій крок: Задання координат по осі Z

```
>>z=0; -.01:-50;
```

Четвертий крок: Задання координат X,Y.

```
>>x=sqrt ( (50*50) – (z.*z) ) .*sin (6.*z);
```

```
>>y=sqrt ( (50*50) – (z.*z) ) .*sin (6.*z);
```

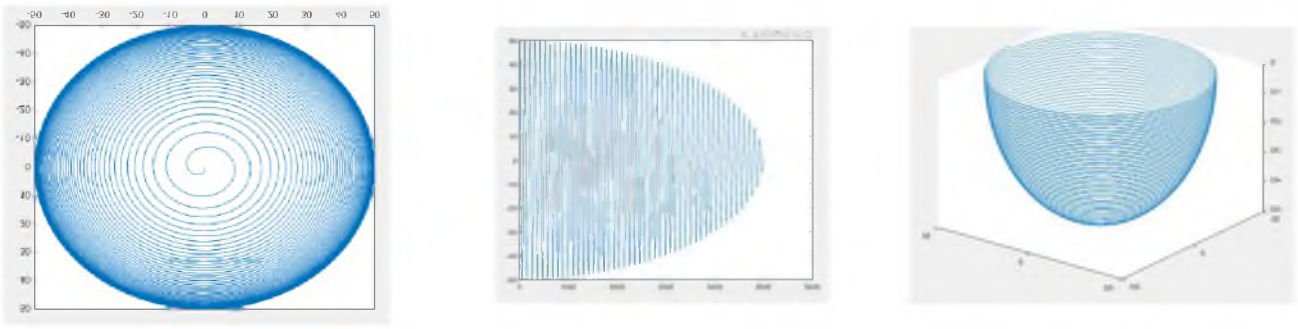
Пятий крок: виведення цих даних в таблицю .xlsx

```
>>xlswrite(`x.xlsx`,x)
```

```
>>xlswrite(`y.xlsx`,y)
```

```
>>xlswrite(`z.xlsx`,z)
```

На рис. 7 можна побачити, що задавши деякі параметри, ми отримали напівсферичну траєкторію для формуючого інструмента.



а) б) в)

Рис. 7 – Траєкторія руху інструменту:
а – вид зверху; б – по координатам X, Y; в – переміщення в координатах XYZ

2.2.Схеми процесу моделювання Напівсфери 1мм

Розрахункова модель наведено на рис. 8

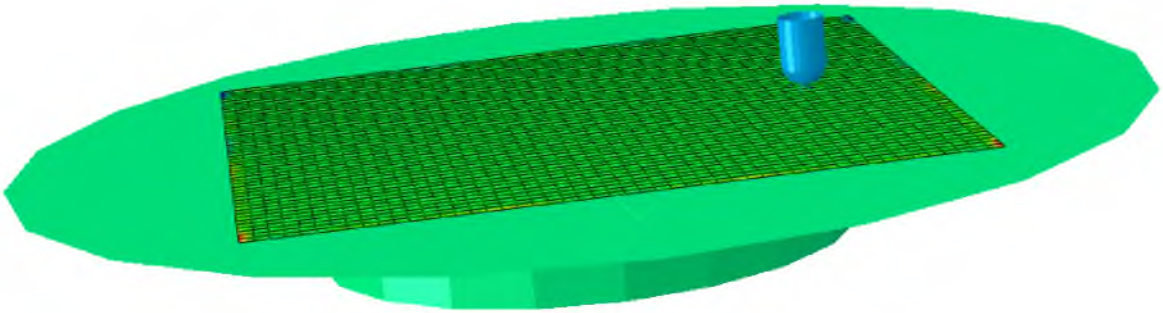


Рис. 8 Розрахункова модель процесу інкрементного формування

Пуансон та матрицю показано на рис.9

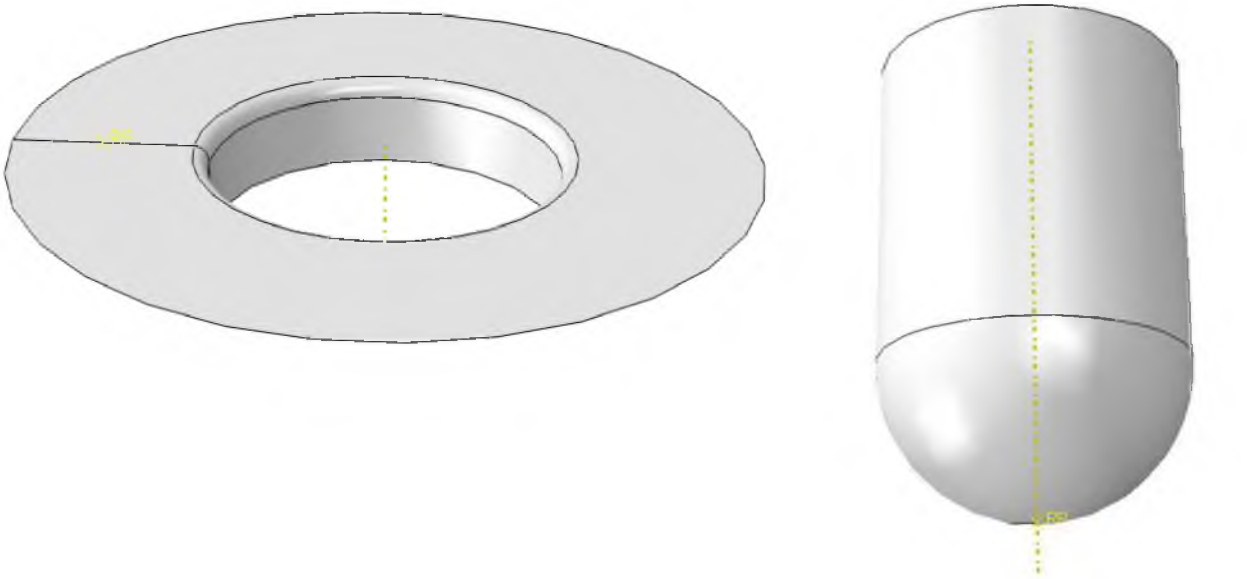
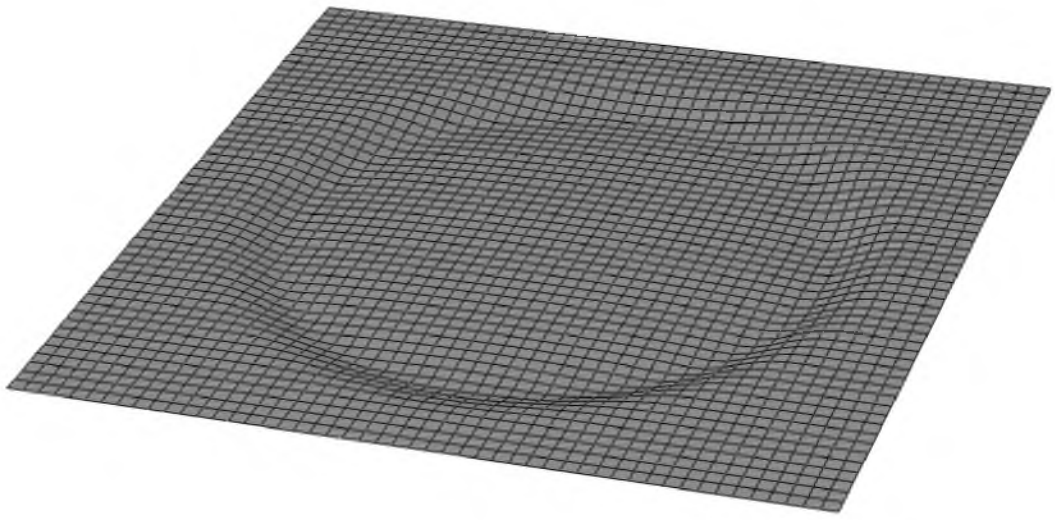
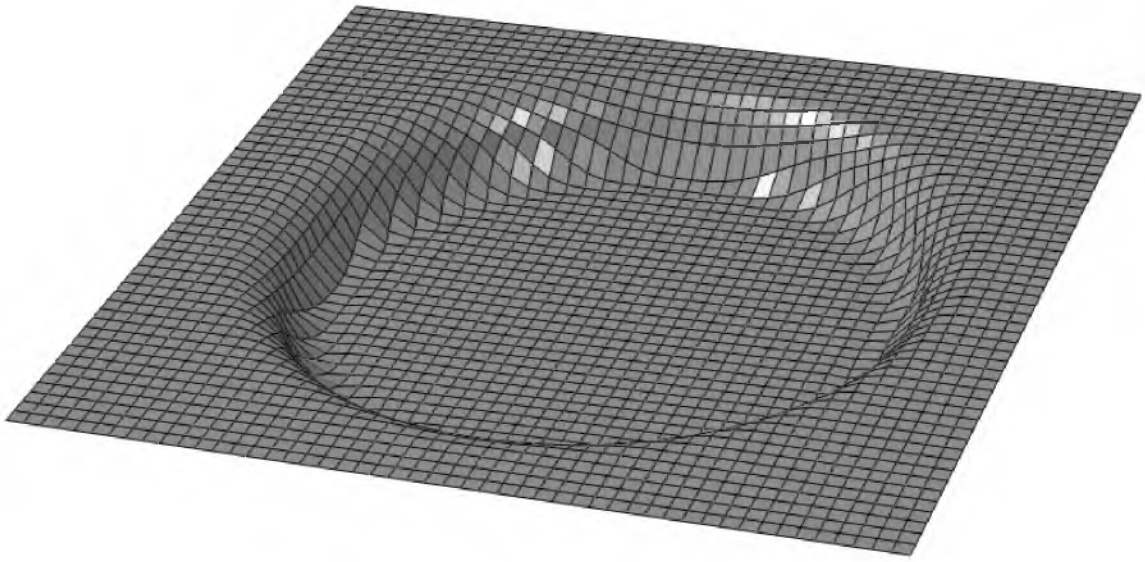


Рис. 9 геометрія інструментів:
а) матриця б) пуансон

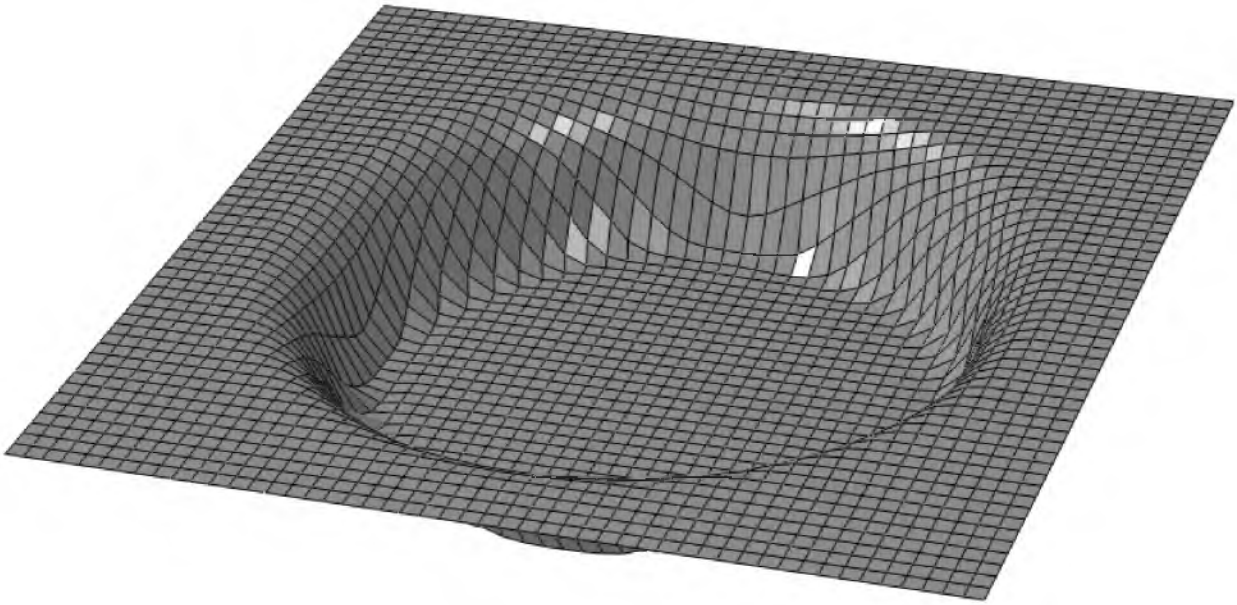
На рис.10 наведено послідовне формування напівсфери. Шість моментів (42, 142, 242, 342, 442, 500 секунді) формувального процесу.



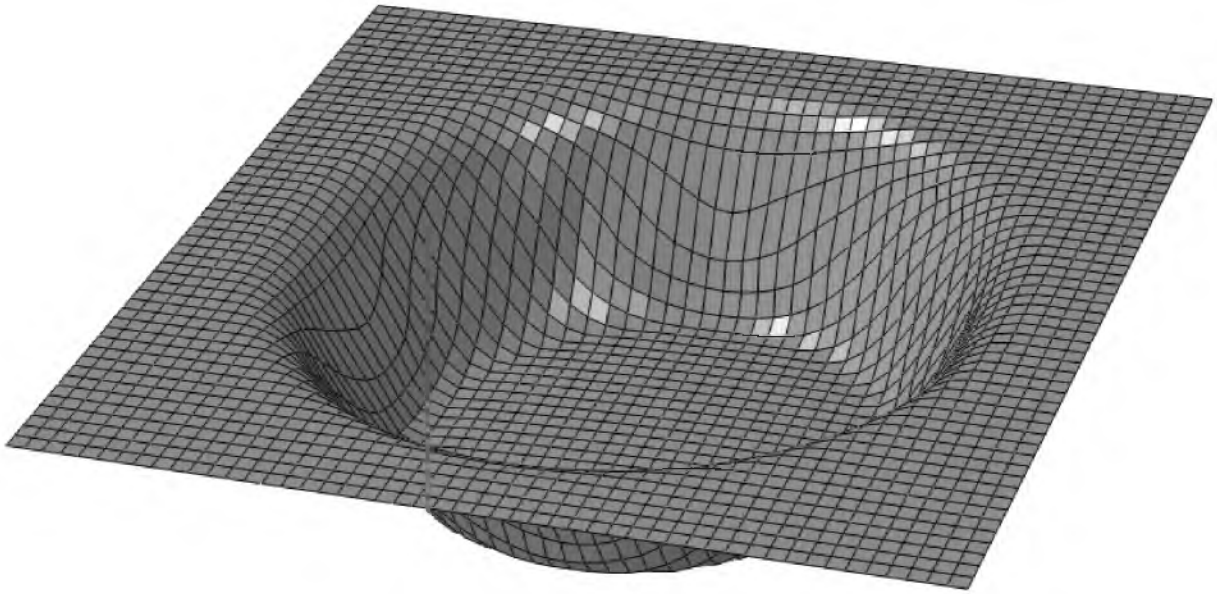
а) етап формування на 42 секунді



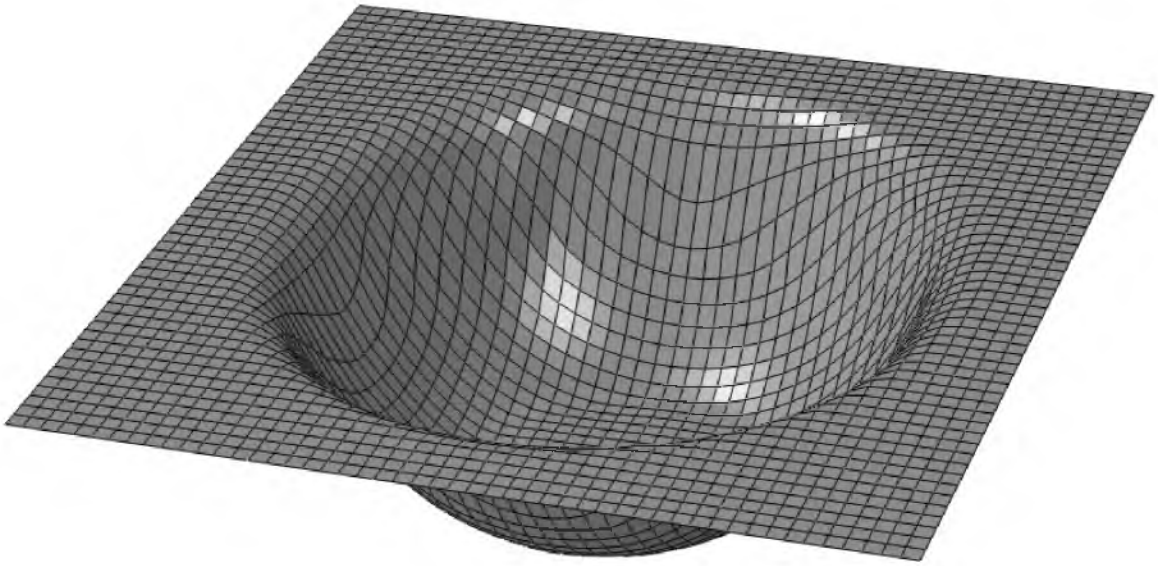
б) етап формування на 142 секунді



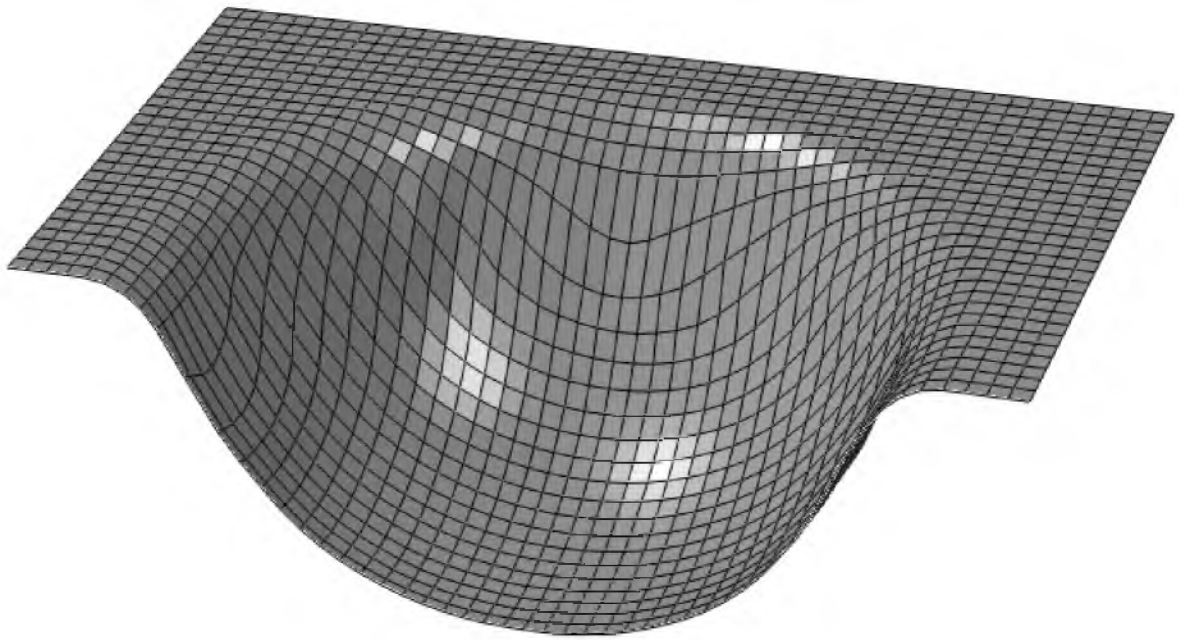
в) етап формування на 242 секунді



г) етап формування на 342 секунді



д) етап формування на 442 секунді (вид на половину листа заготовки)



е) етап формування на 500 секунді (вид на половину листа заготовки)

Рис.10 Формування напівсферичного виробу

Для даної напівсфери було проведено декілька розрахунків, а саме для товщини матеріалу в 1 мм та 2мм. В розрахунку використовувався абсолютно жорсткий інструмент. Основне призначення цих розрахунків – це визначення необхідного зусилля на формуючому інструменті (пуансоні).

Для матеріалу товщиною 1 мм зусилля що діє на формуючому інструменті наведена на рис. 11, рис. 12, рис. 13.

Найбільше значення зусилля по осі X становить 1697 Н рис. 11



Рис. 11 – Зусилля на інструменті по осі X

Зусилля які виникають по осі X, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 547 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 1172 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 1464 Н;

На 342 секунді, зусилля на інструменті становить 1430 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 793 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 199 Н;

Найбільше значення зусилля по осі Z становить 2559 Н рис. 12

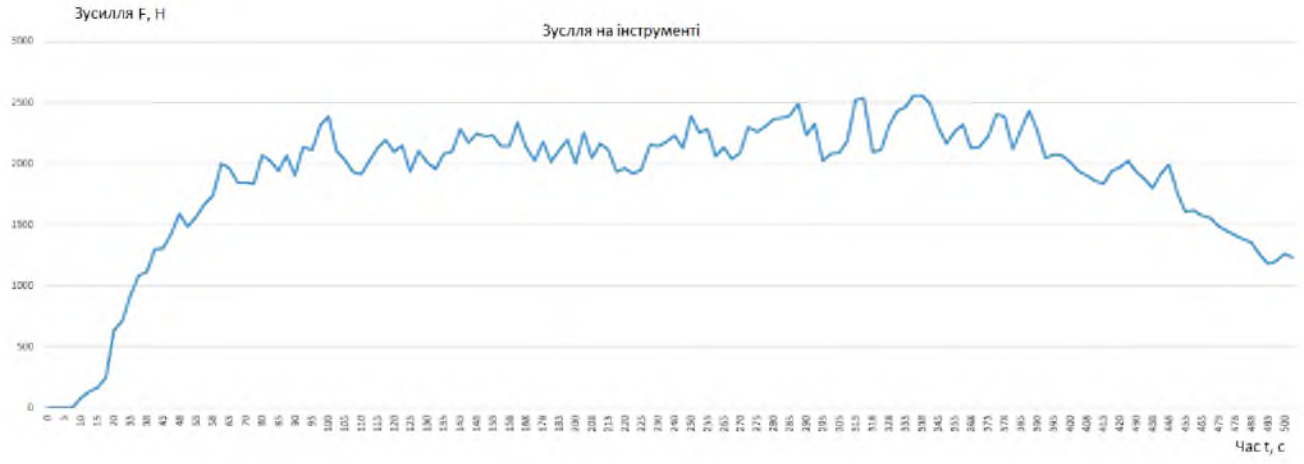


Рис. 12 – Зусилля на інструменті по осі Z

Зусилля які виникають по осі Z, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 1310 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 2284 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 2127 Н;

На 342 секунді, зусилля на інструменті становить 2297 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 1922 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 1231 Н;

					ДП.МД91.01.05.000ПЗ	Арк.
Змн.	Арк.	№ докум.	Підпис	Дата		

Найбільше значення зусилля по осі Y становить 1552 Н рис. 13

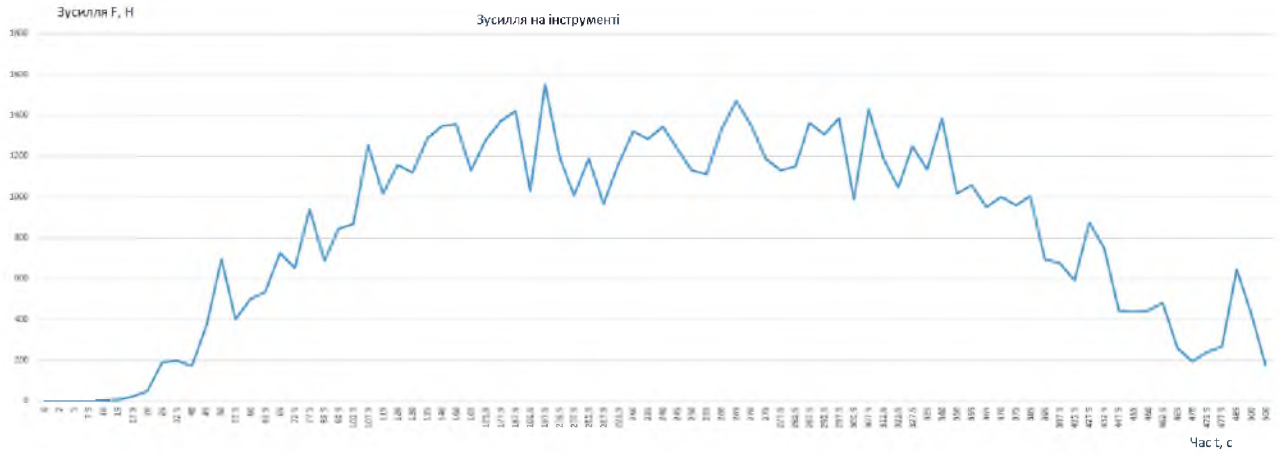


Рис. 12 – Зусилля на інструменті по осі Y

Зусилля які виникають по осі Y, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 372 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 1348 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 1235 Н;

На 342 секунді, зусилля на інструменті становить 1387 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 442 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 174 Н;

Після моделювання можна побачити найбільші зусилля по кожній осі, що діють на наш інструмент. Найбільше значення зусилля по осі Z, воно являє собою 2559 Н, по осі X становить 1697 Н, по осі Y становить 1552 Н. Для більшої ефективності, потрібно збільшити показники зусиль на 30%, так як дана модель є сферична і напруження будуть розподілятися рівномірні, на відмінну від призматичних, де є гострі кути.

2.3.Схеми процесу моделювання Напівсфери 2мм

Для моделювання напівсфери 2 мм використовувались ті ж самі данні і метод, як для 1 мм. Нище наведено аналогічні схеми з зусиллям на інструменті, час обраний той самий як на рис. 10 (42с, 142с, 242с, 342с, 442с, 500с).

Найбільше значення зусилля по осі X становить 4032 Н рис. 14



Рис. 14 – Зусилля на інструменті по осі X

Зусилля які виникають по осі X, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 972 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 3074 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 3302 Н;

На 342 секунді, сила зусилля на інструменті становить 2280 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 2197 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 674 Н;

Найбільше значення зусилля по осі Z становить 7293 Н рис. 15

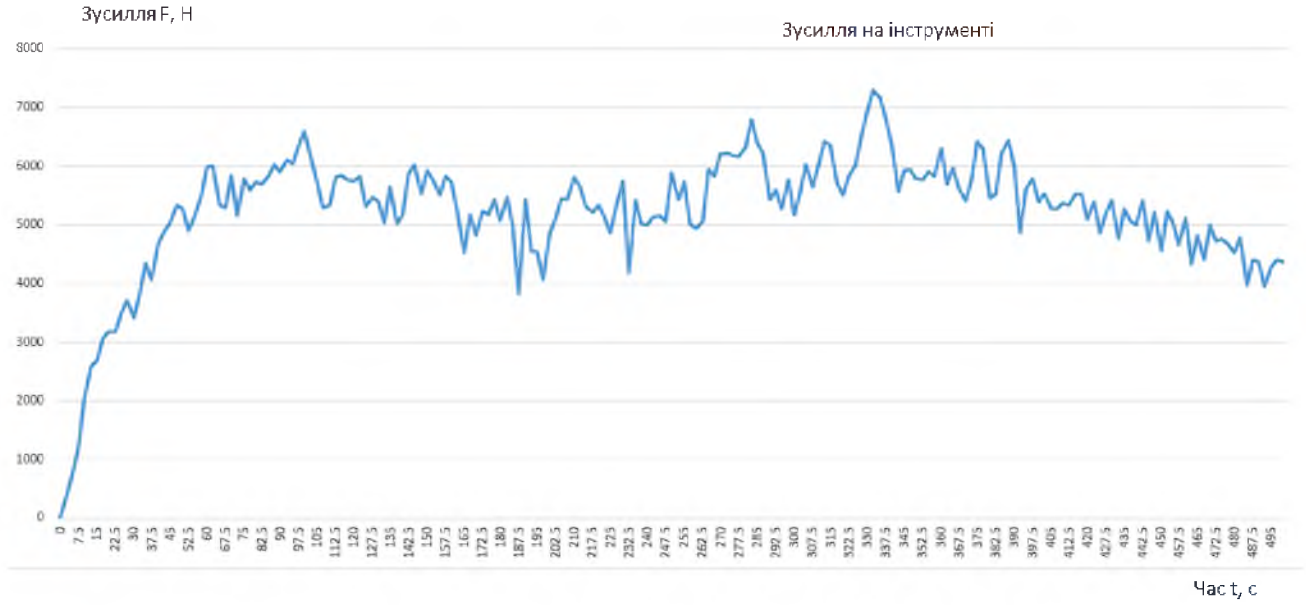


Рис. 15 – Зусилля на інструменті по осі Z

Зусилля які виникають по осі Z, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 4868 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 5873 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 5141 Н;

На 342 секунді, зусилля на інструменті становить 5577 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 5411 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 4363 Н;

Найбільше значення зусилля по осі Y становить 4132 Н рис. 16



Рис. 16 – Зусилля на інструменті по осі Y

Зусилля які виникають по осі Y, під час формування:

На 42 секунді, зусилля на інструменті становить 1351 Н;

На 142 секунді, зусилля на інструменті становить 3569 Н;

На 242 секунді, зусилля на інструменті становить 3381 Н;

На 342 секунді, зусилля на інструменті становить 2977 Н;

На 442 секунді, зусилля на інструменті становить 1927 Н;

На 500 секунді, зусилля на інструменті становить 583 Н;

Для 2 мм напівсфери найбільше зусилля більше в 3.85 рази, в проектуванні, це буде вимагати значно більших зусиль від електродвигунів, тому, краще використовувати меншу швидкість.

2.4.Схеми процесу моделювання коробчастої заготовки 1,5мм

Параметри які були задані при моделюванні:

Параметри моделювання	Значення
Товщина	1,5 мм
Коефіцієнт тертя	0,15
Розмір скінченного елементу	2
Швидкість формуючого інструменту	16 мм/с
Модуль Юнга	70 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0,33
Щільність	2,7 г/см^2

Найбільші зусилля на формуючому інструменті: по осі Z показано на рис. 17, F= 4400 Н; по осі X показано на рис. 18, F= 1200 Н; по осі Y показано на рис. 19, F= 1405 Н;

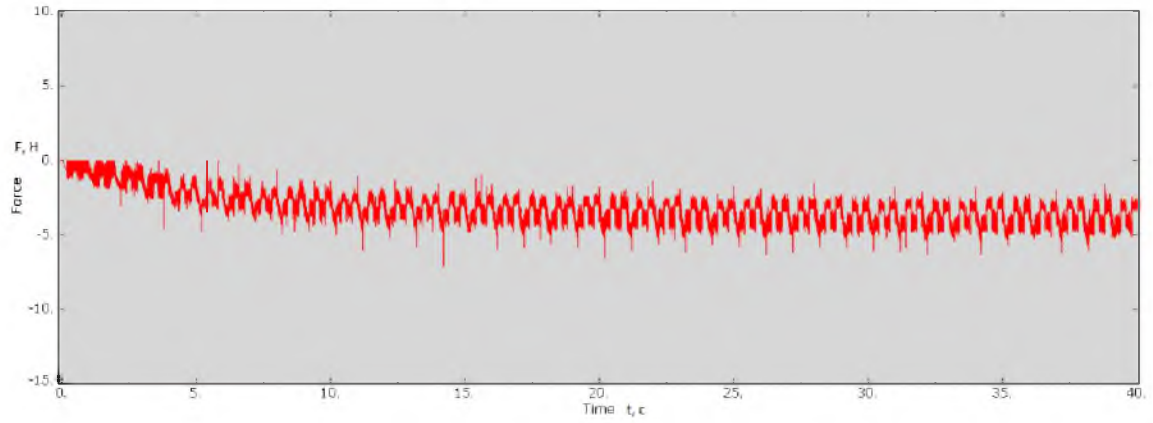


Рис 17. Зусилля по осі Z

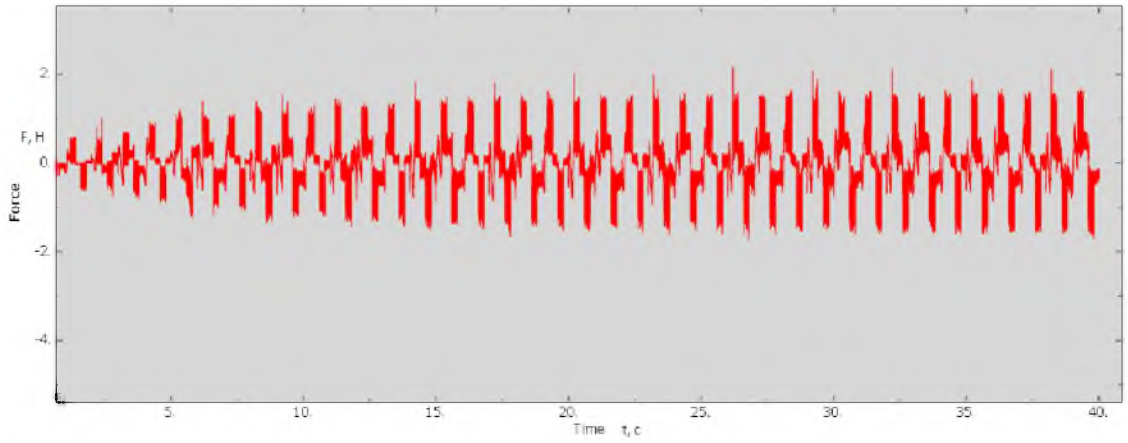


Рис 18. Зусилля по осі X

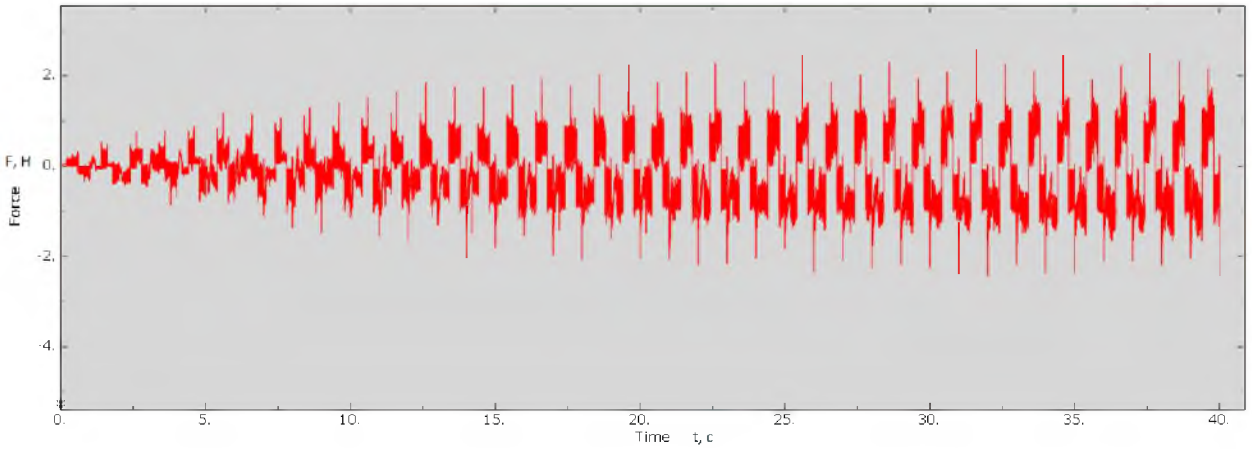


Рис 19. Зусилля по осі Y

Потоншення стінки відбулося в деяких місцях до 1 мм рис.20. З отриманих даних можна побачити, що за виконаної схеми деформування та використання поетапного розширення, максимальна ступінь потоншення становить 67%.

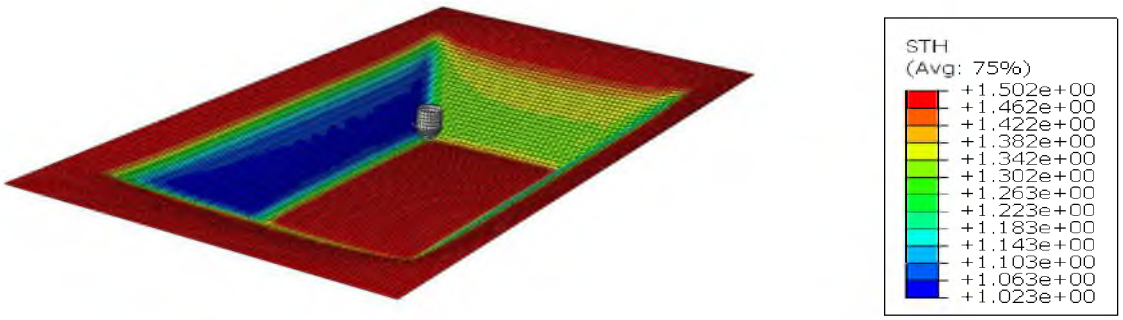


Рис 20. Розподіл товщини стінки по деталі

На рис. 21 показано розподіл інтенсивності напружень по Мізесу в здеформованому коробчастому виробі. Значення Мізесу знаходяться в межах $\sigma_i = 8{,}3 \div 500$ МПа.

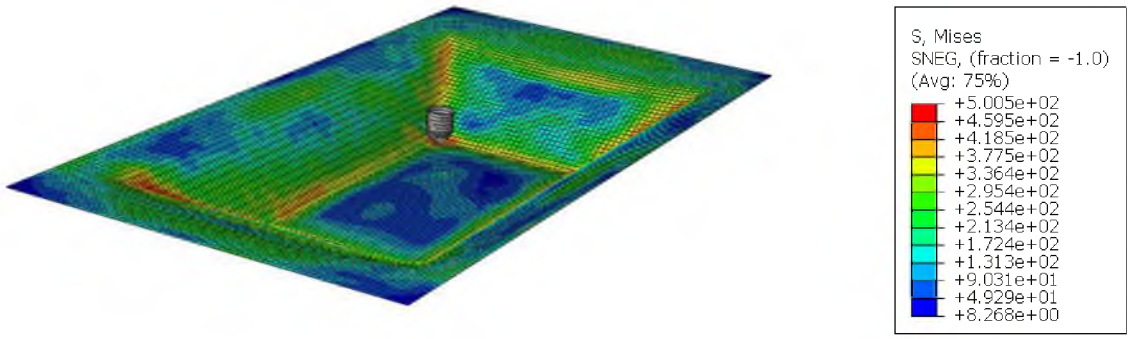


Рис 21. Розподіл інтенсивності напружень по Мізесу

На рис. 22 показано розподіл напружень σ_{11} в здеформованому коробчастому виробі. Значення напружень знаходяться в межах $\sigma_{11} = -575 \div 508$ МПа.

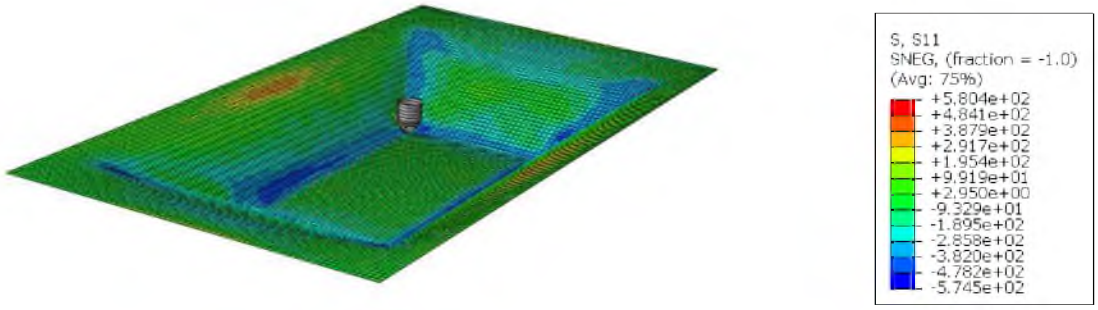


Рис 22. Розподіл напружень σ_{11}

На рис. 23 показано розподіл напружень σ_{22} в здеформованому коробчастому виробі. Значення напружень знаходяться в межах $\sigma_{22} = -453 \div 555$ МПа.

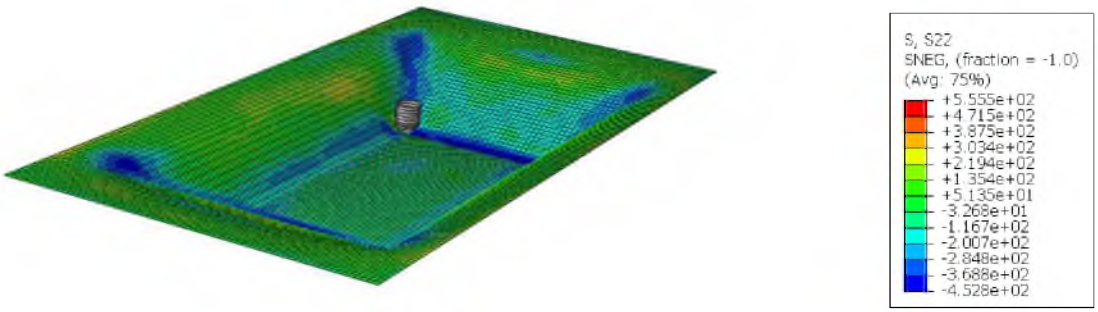


Рис 23. Розподіл напружень σ_{22}

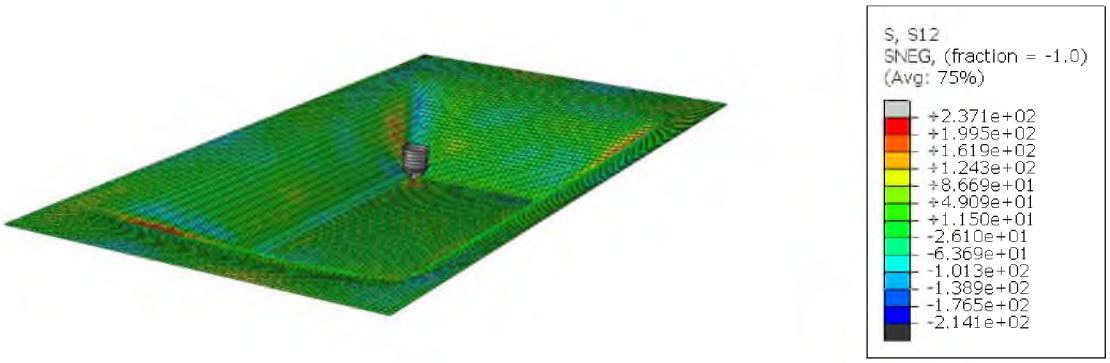


Рис 24. Розподіл напружень σ_{12}

На рис. 24 показано розподіл напружень σ_{12} в здеформованому коробчастому виробі. Значення напружень знаходяться в межах $\sigma_{12} = -214 \div 237$ МПа.

На рис. 25 показано розподіл максимальних пластичних деформацій ε_{max} в здеформованому коробчастому виробі. Значення напружень знаходяться в межах $\varepsilon_{msx} = -0{,}032 \div 0{,}415$.

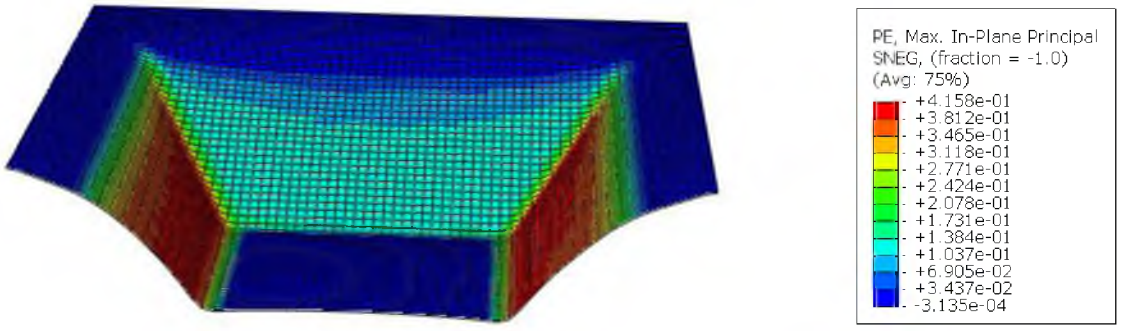


Рис 25. Розподіл максимальних пластичних деформацій ε_{max}

На рис. 26 показано розподіл пластичних деформацій ε_{11} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_{11} = -0{,}02 \div 0{,}148$.

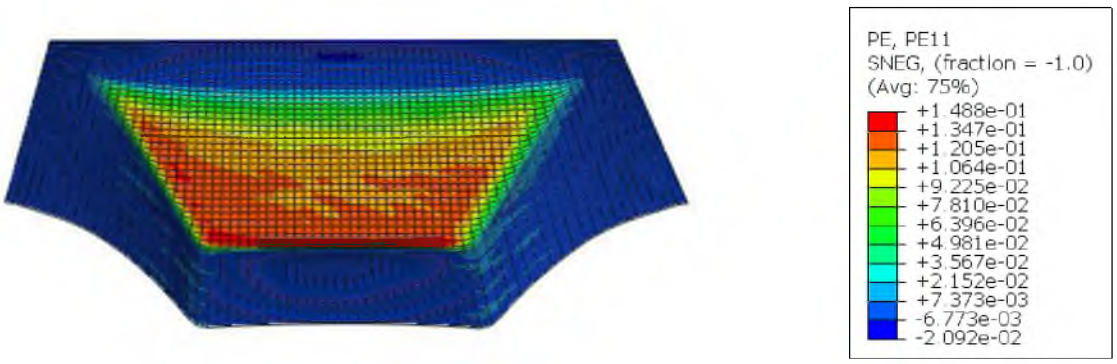


Рис 26. Розподіл пластичних деформацій ε_{11}

На рис. 27 показано розподіл пластичних деформацій ε_{22} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_{22} = -0{,}057 \div 0{,}421$.

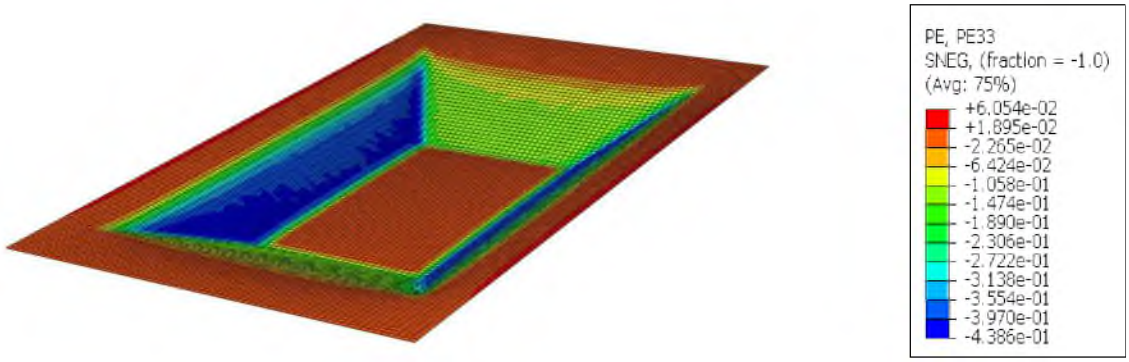


Рис 28. Розподіл пластичних деформацій ε_{33}

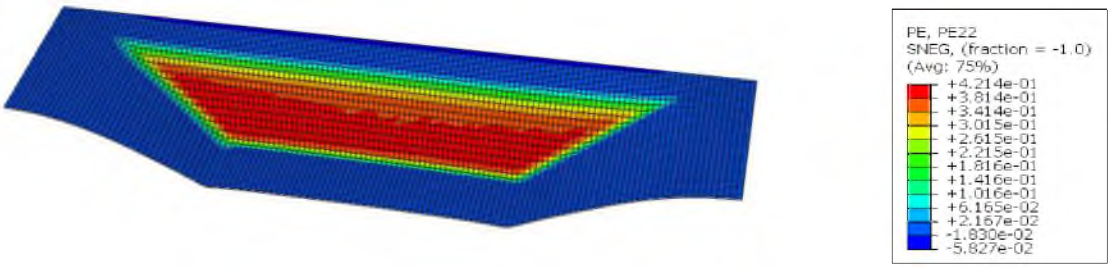


Рис 27. Розподіл пластичних деформацій ε_{22}

На рис. 28 показано розподіл пластичних деформацій ε_{33} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_{33} = -0{,}439 \div 0{,}06$.

На рис. 29 показано розподіл пластичних деформацій ε_{12} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення деформацій знаходяться в межах $\varepsilon_{12} = -0{,}09 \div 0{,}05$.

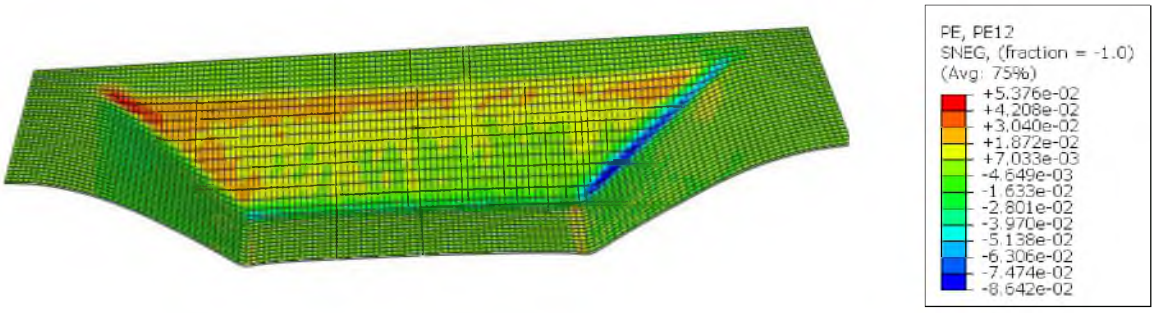


Рис 29. Розподіл пластичних деформацій ε_{12}

РОЗДІЛ 3

Розробка установки для інкрементного формування

3.1. Зусилля для установки

3.1.1. Потужність

Щоб знайти потужність яка необхідна для нашої установки проаналізуємо дані, отримані при моделюванні процесу в програмному забезпеченні Abaqus CAE.

3.1.1.1. Вісь X

З отриманих даних "FORCE" беремо найбільші зусилля для осі X, для заготовки 1 мм.

F_1 = 1697 Н, але беремо на 30% більше, з урахуванням на складність геометрії та необхідність додаткового зусилля.

$$F = F_1 + 30\ \% = 2206{,}1\ \text{Н}\ (2{,}21\ \text{кН})$$

Швидкість руху інструменту v = 30 мм/с (0,03 м/с).

$$P_Д = \frac{F*v}{1000} = 0{,}0662\ \text{кВт}$$

3.1.1.2. Вісь Y

З отриманих даних "FORCE" беремо найбільші зусилля для осі Y, для заготовки 1 мм.

F_1 = 1552 Н, але беремо на 30% більше, з урахуванням на складність геометрії та необхідність додаткового зусилля.

$$F = F_2 + 30\ \% = 2017{,}6\ \text{Н}\ (2{,}02\ \text{кН})$$

Швидкість руху інструменту v = 30 мм/с (0,03 м/с).

$$P_Д = \frac{F*v}{1000} = 0{,}0605\ \text{кВт}$$

3.1.1.3. Вісь Z

З отриманих даних "FORCE" беремо найбільші зусилля для осі Y, для заготовки 1 мм.

F_1 = 1552 Н, але беремо на 30% більше, з урахуванням на складність геометрії та необхідність додаткового зусилля.

$$F = F_3 + 30\ \% = 3326{,}7\text{Н}\ (3{,}33\ \text{кН})$$

Швидкість руху інструменту v = 0,1 мм/с (0,0001 м/с).

$$P_Д = \frac{F*v}{1000} = 0{,}00033\ \text{кВт}$$

3.1.2.Крутний момент

Для знаходження крутного моменту потрібно дізнатися з якою швидкість буде обертатися вал.

В цій установці планується використовувати гвинт з кроком в 5 мм, такий крок дозволить забезпечити достатню точність.

3.1.2.1.Вісь X

За 1 секунду вал (гвинт) буде робити 6 оберти, так як швидкість становить

v = 30 мм/с.

Звідси ми отримуємо:

$$n = 60 \cdot 6 = 360\ \text{об/хв}$$

n – частота обертання, об/хв.

Крутний момент знаходимо по формулі

$$N = \frac{9550 * P_Д}{n} = \frac{9550 * 0{,}0662}{360} = 1{,}76\ \text{Нм}$$

3.1.2.2.Вісь Y

За 1 секунду вал (гвинт) буде робити 6 оберти, так як швидкість становить

v = 30 мм/с.

Звідси ми отримуємо:

$$n = 60 \cdot 6 = 360 \text{ об/хв}$$

n – частота обертання, об/хв.

Крутний момент знаходимо по формулі

$$N = \frac{9550 * P_Д}{n} = \frac{9550 * 0{,}0605}{360} = 1{,}61 \text{ Нм}$$

3.1.2.1.Вісь Z

За 1 секунду вал (гвинт) буде робити 0,02 оберти, так як швидкість становить

v = 0,1 мм/с.

Звідси ми отримуємо:

$$n = 60 \cdot 6 = 1{,}2 \text{ об/хв}$$

n – частота обертання, об/хв.

Крутний момент знаходимо по формулі

$$N = \frac{9550 * P_Д}{n} = \frac{9550 * 0{,}00033}{360} = 2{,}62 \text{ Нм}$$

3.2. Розрахунок підшипників

Розрахунок підшипників був проведений в онлайн калькуляторі, та підтверджений подальшими розрахунками. Для гвинтових валів було обрано підшипник серії 5200, це радіально-упорний дворядний підшипник його

максимальне динамічне навантаження складає 11856 Н(7410*1,6 Н), що повністю забезпечує необхідне значення 8843,27 Н.

Параметри для розрахунку наведено нижче. На рис. 30.

d_a	14.4мм
D_a	25.6мм
r_a	0.6мм
d	10мм
D	30мм
B	14мм

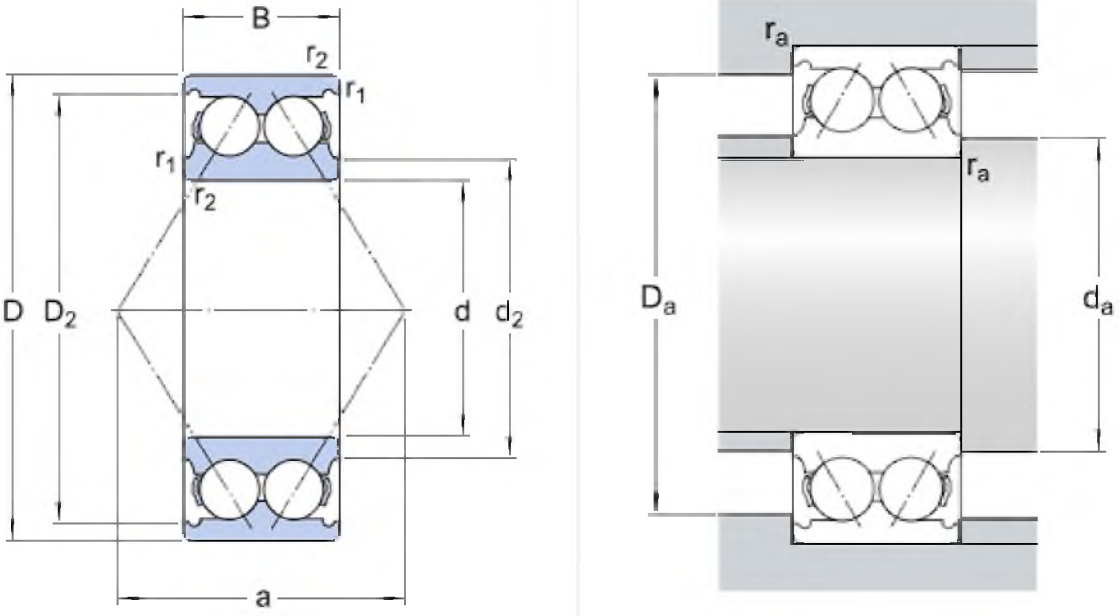


Рис 30. Параметри підшипника серії 5200 2RS C3 MCB

Нижче наведені розрахункові параметри підшипників цієї серії

Номінальна динамічна вантажопідйомність	C	11,85kN
Номінальна статична вантажопідйомність	C_0	4.3 kN
Межа втомної міцності	P_u	0.183 kN
Номінальна частота обертання		26000 r/min
Гранична частота обертання		24000 r/min
Розрахунковий коефіцієнт	k_r	0.06
Розрахунковий коефіцієнт	e	0.8
Розрахунковий коефіцієнт	X	0.63
Розрахунковий коефіцієнт	Y_0	0.66
Розрахунковий коефіцієнт	Y_1	0.78
Розрахунковий коефіцієнт	Y_2	1.24

Перевірочний розрахунок підшипників [24].

Формула для знаходження динамічного навантаження:

$$C_{rp} = R_E \sqrt[3]{573\omega \frac{L_h}{10^6}} = 3355 \sqrt[3]{573 * 1{,}88 \frac{17000}{10^6}} = 8843{,}27\text{H}$$

Еквівалентне динамічне навантаження:

$$R_E = (XVR_{r2} + YR_a) = (\,0{,}63 * 1 * 2200 + 0{,}66 * 2984) = 3355$$

Отримане значення динамічного навантаження підшипника 8844 H<11856 H

Підшипник підходить.

3.3. Вибір деталей для установки

3.3.1. Каркас

3.3.1.1. Профіль 30х60

Перш за все потрібно вибрати матеріал для каркасу (рами), в якості цього елемента обираємо алюмінієвий профіль, так як він є доволі дешевим, та його легко знайти на ринку України. Для даної установки потрібно буде приблизно 2340,5 мм цього профілю. Профіль 30х60 зображено на рис.31.

Сайт з якого замовляється: https://alumet.com.ua/ua/p1551789690-stanochnyj-profil-30h60.html

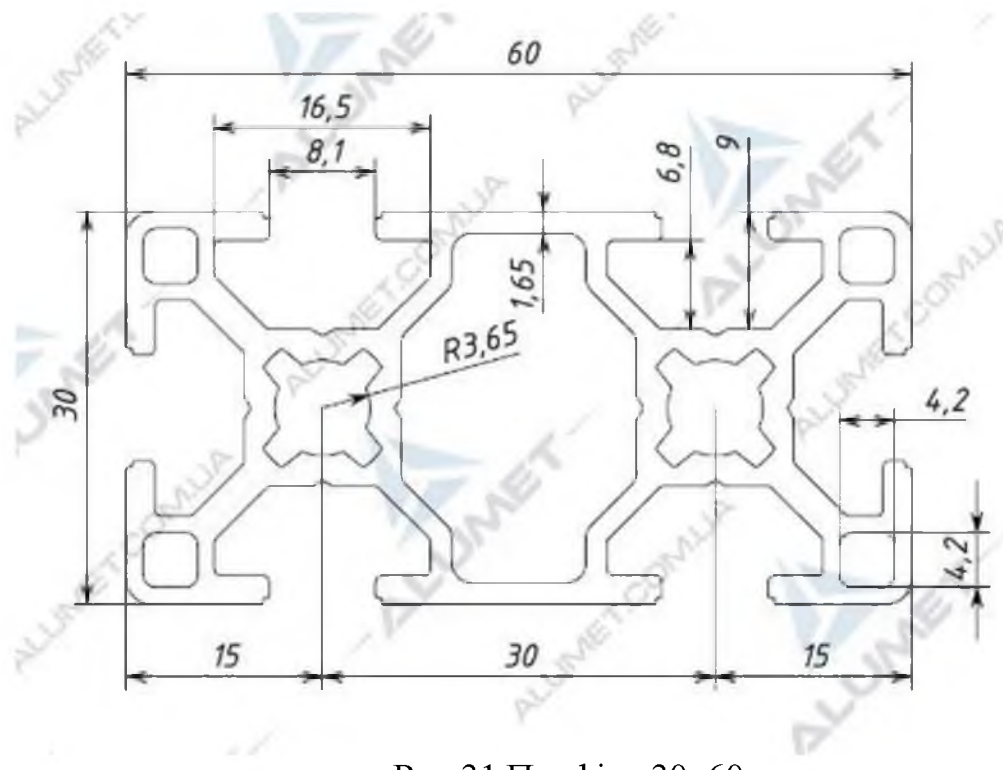


Рис.31 Профіль 30х60

Нижче неведені основні параметри.

- Тип паза: T-track
- Розмір паза: 8 мм
- Діаметр центрального каналу: 7 мм під різьбу М8

- Марка алюмінію: AlMgSi 6060 T6
- Покриття - анодований 21 мкм
- Маса: 1,47 кг/м

3.3.1.2. Профіль 20х40

Алюмінієвий профіль 20х40. Використовуються в центральній частині, призначенні для збільшення жорсткості. Загальна довжина приблизно 2499,2 мм. Профіль 20х40 зображено на рис.32.

Сайт з якого замовляється: https://prom.ua/p1579987516-alyuminievyj-stanochnyj-profil.html?&primelead=Mg

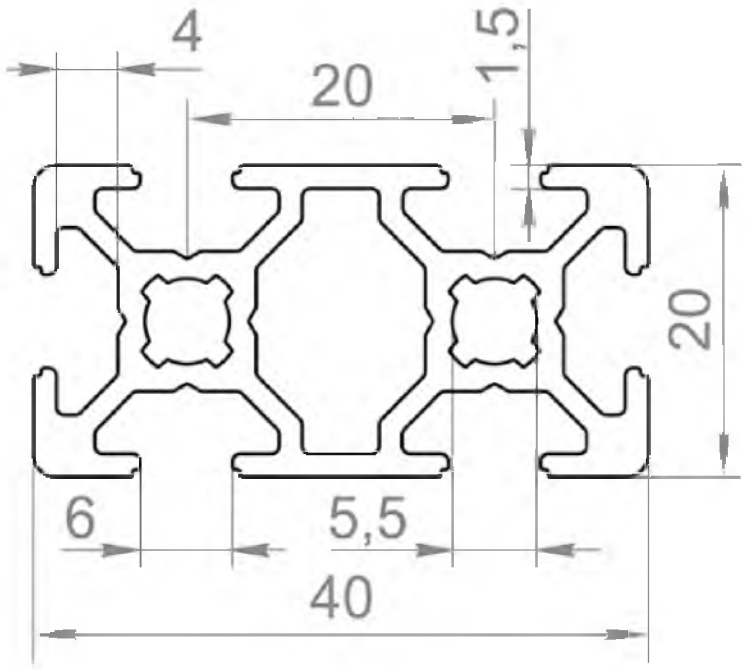


Рис. 32 Профіль 20х40

Нижче неведені основні параметри.

- Тип паза: T-track
- Розмір паза: 8 мм
- Діаметр центрального каналу: 7 мм під різьбу M8
- Марка алюмінію: AlMgSi 6060 T6
- Покриття - анодований 21 мкм

- Маса: 1,47 кг/м

3.3.1.3. Рама (несуча)

Для верхньої частини, потрібно зробити раму, на яку буде встановлюватись верхня частина. Для основи можна вибрати любу сталь (алюміній), потрібно, щоб в кінцевому варіанті, нижня рама була важкою, це дасть більшої стабільності для загальної конструкції. Ця рама буде робитися за допомогою зварювння Приклад рами на рис. 33.



Рис. 33 Рама

3.3.1.4. Стіл для матриці та заготовки

Стіл для заготовки, на ньому буде кріпитися нижня матриця та зверху встановлюватись заготовка. Після чого скріплюватись за допомогою болтів, затискаючи заготовку і матрицю. Цей елемент також є кастмним, його можна зробити за допомогою зварювання. Стіл для матриці та заготовки зображено на рис. 34.

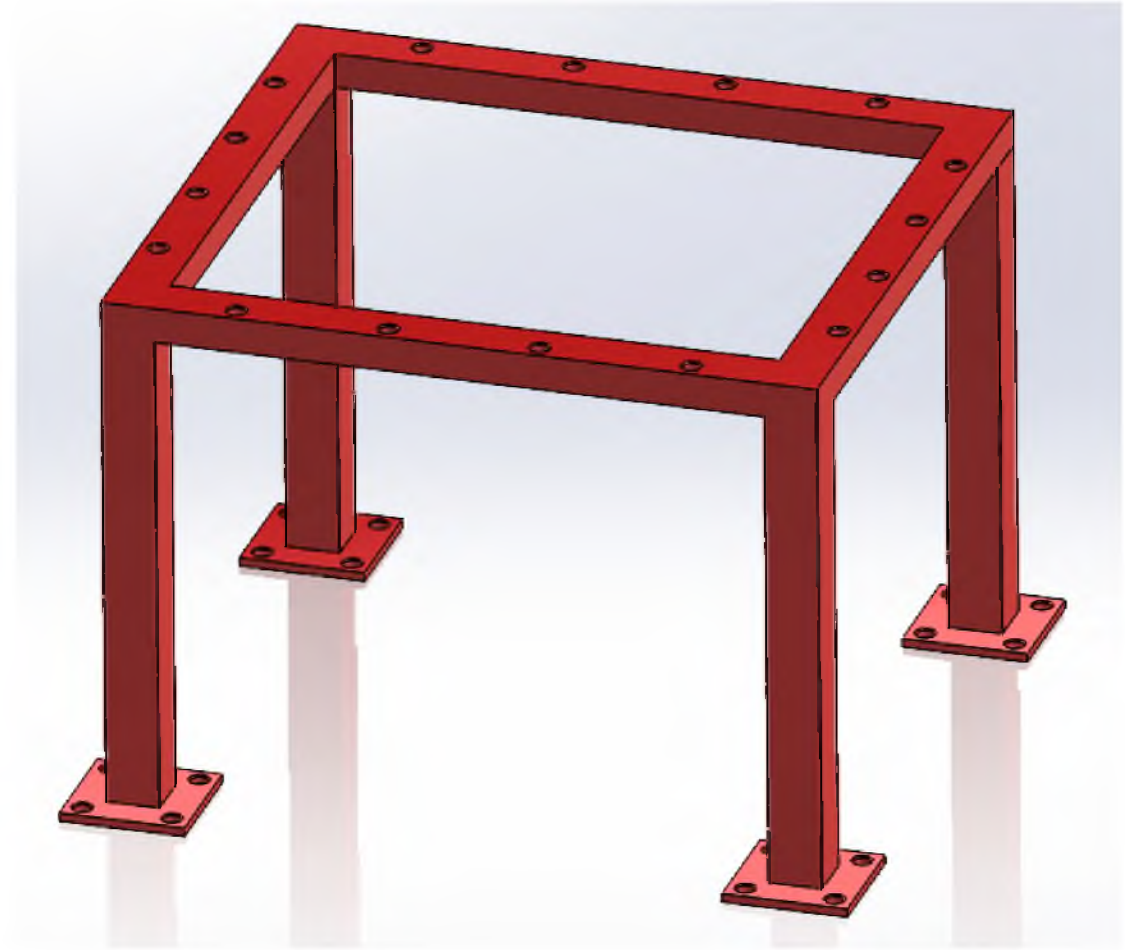


Рис. 34 Стіл для матриці та заготовки

3.3.2. Плити

В подальшому будуть використовуватись заводські деталі та елементи для установки. Рекомендовано зробити більшу частину отворів після купівлі та виміру їх. Так як в вільному доступі немає деяких розмірів (для отворів). Це дозволить забезпечити необхідну точність та зменшити витрати при виготовлені деталей.

3.3.2.1. Плита 1

Перша плита буде кріпитися на нижню раму (рис.33), на цю плиту буде встановлено стіл. Розміри плити 534.8*534.8*10 мм. Плита 1 зображена на рис.35.

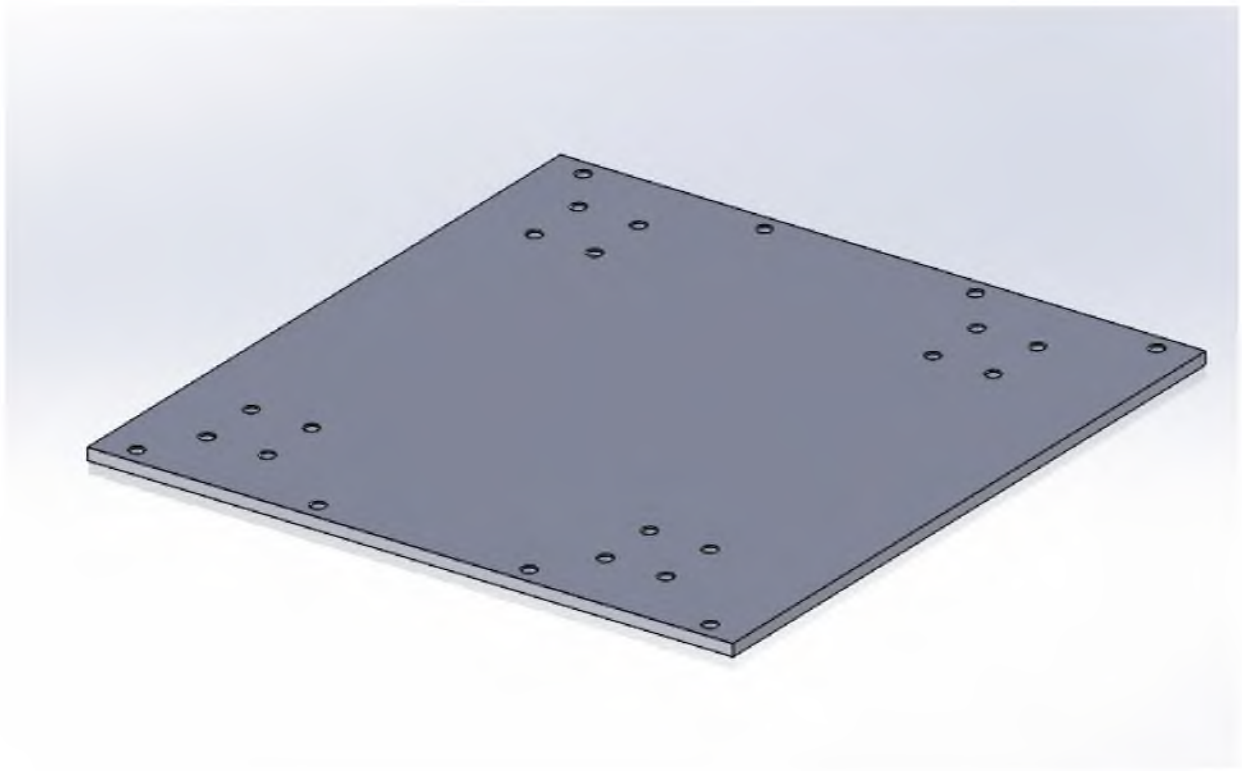


Рис. 35 Плита 1

3.3.2.2. Плита 2

Плита для кріплення електродвигуна по осі Z, зображено на рис. 36.

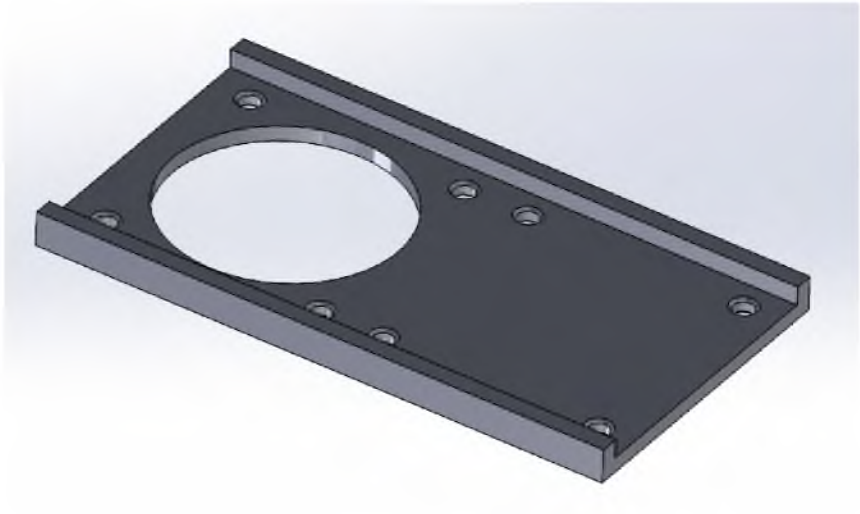


Рис. 36 Плита 2

3.3.2.3. Плита 3

Плита 3 потрібна для забезпечення контакту між опорним підшипником і плитою 4. Зображено на рис. 37

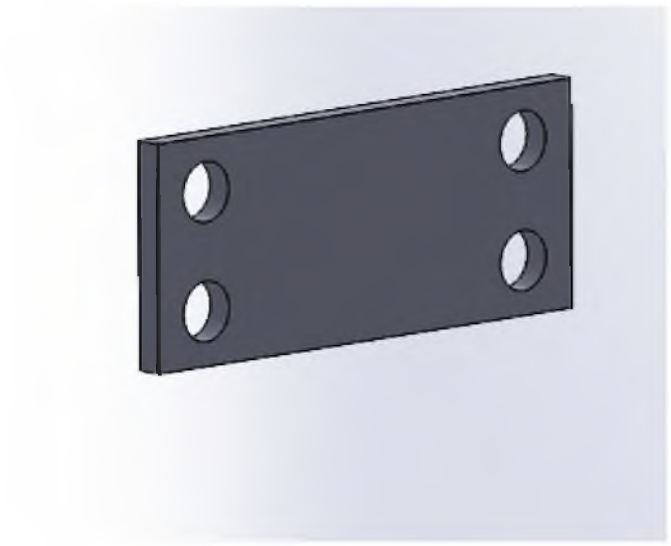


Рис. 37 Плита 3

3.3.2.4. Плита 4

Плита 4 є несучою частиною для осі Y, зображана на рис. 38

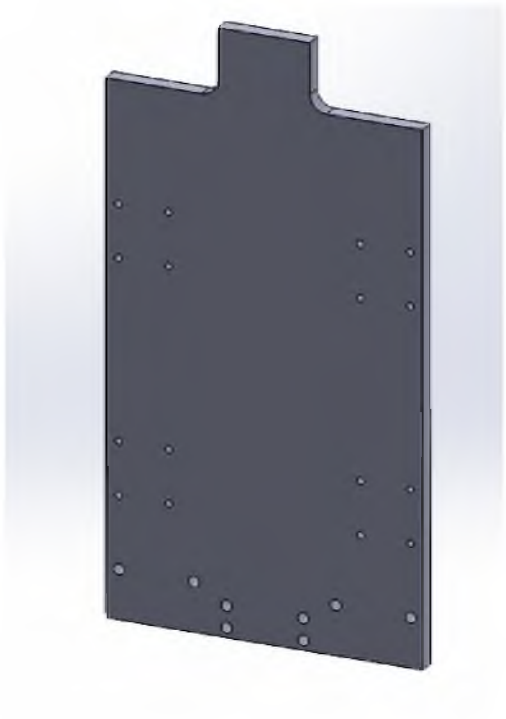


Рис. 38 Плита 4

3.3.2.5. Плита 5

Плита 5, слугує в якості тримача інструмента. В подальшою буде модернізуватися для встановлення електродвигуна для обертання деформуючого інструменту, рис. 39.

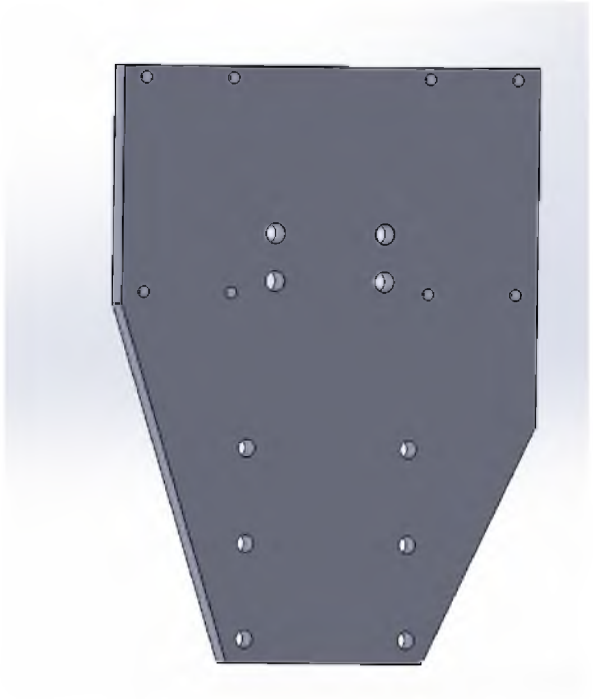


Рис. 39 Плита 5

3.3.2.6. Плита 6

Плита 6 слугує кріпленням для електродвигунів по осі X. Зображено на рис.40.

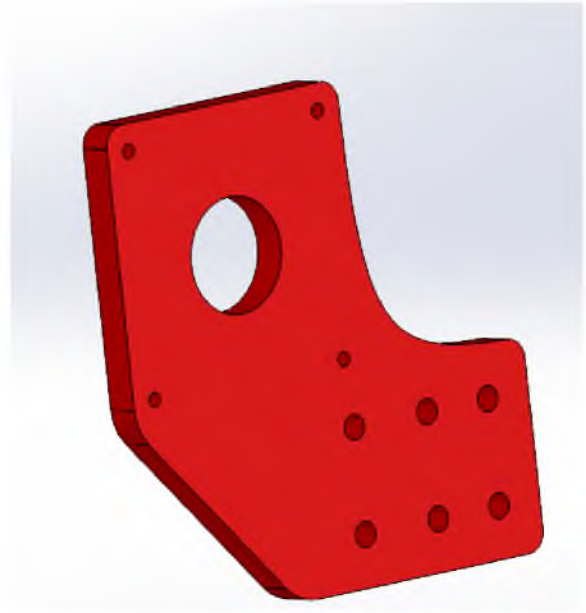


Рис.40 Плита 6

3.3.2.7. Плита 7

Плита 7 являє собою кіннечну опору по осі X, не неї кріпиться підшипник з тримачем. Зображено на рис.41.

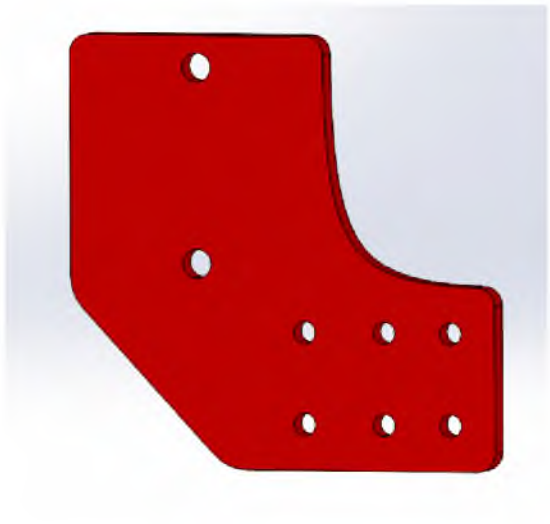


Рис.41 Плита 7

3.3.2.8. Плита 8

Плита 8 являє собою колону на яку кріпляться всі елементи для осі Y та Z, рис 42

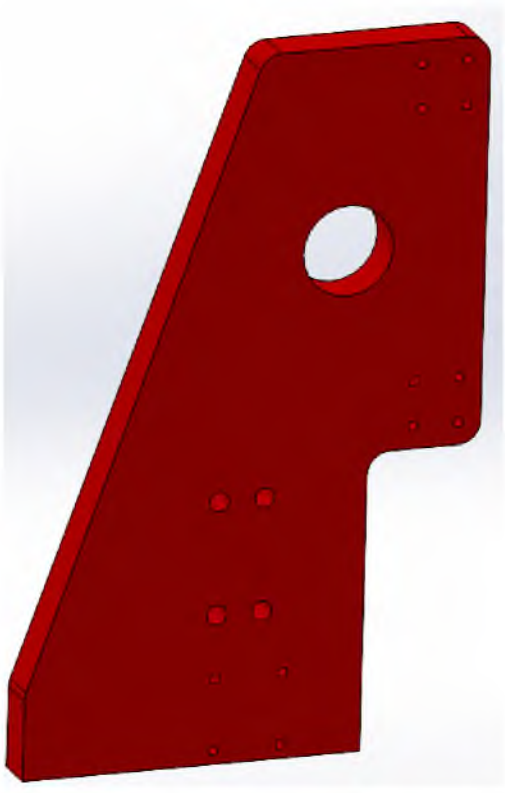


Рис. 42 Плита 8

3.3.2.9. Плита 9

Плита 9 здійснює аналогічні функції плити 8, рис. 43.

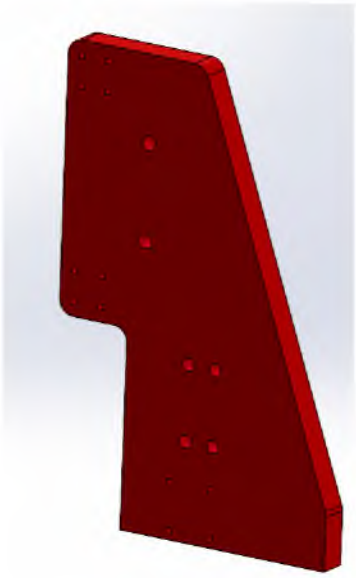


Рис. 43 Плита 9

3.3.2.10. Плита 10

Пдлита 10 являє собою оправку для закріплення матриці на столі рис. 44.

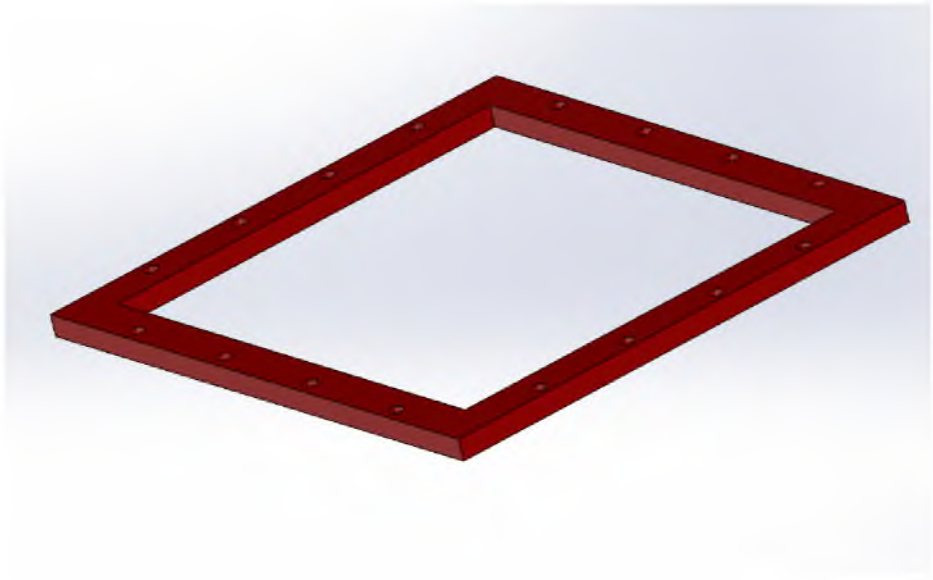


Рис. 44 Плита 10

3.3.3. Стандартні деталі

3.3.3.1. Куток

Куток посилений, він потрібен для пластини, щоб була можливість закріпити електродвигун та надати більшої жорсткості . Він кріпить Пластину 2 до Пластини 4, ставиться з задньої сторони. Як надійний варіант, потрібно замовити кастомний товщиною більше 6 мм рис. 45.

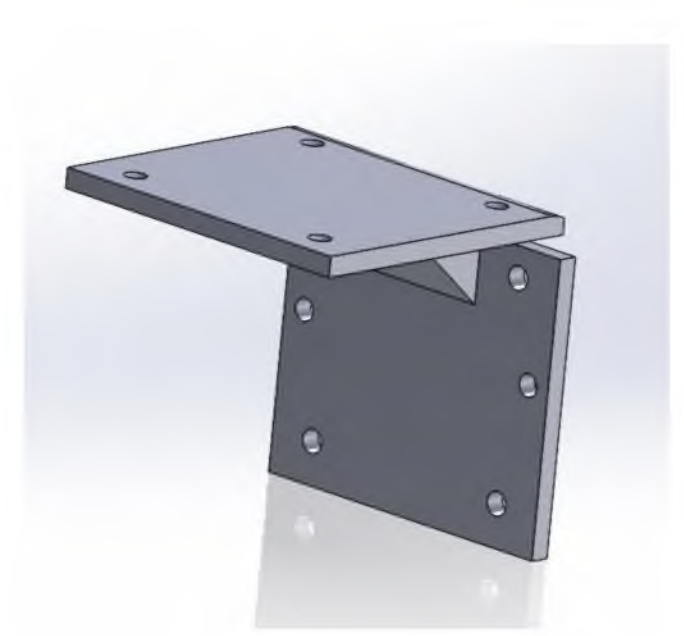


Рис. 45 Куток

3.3.3.2. Напрямні опори

3.3.3.2.1.Циліндрична напрямна на опорі

Наступною складовою є направляючі, для даної установки було обрано опорні циліндричні направляючі, так як вони порівняно з іншими видами дають більшу жорсткість для установки, єдиним недоліком є те, що може бути присутній люфт, але його можна зменшити, підтягнувши гайки. Для даної установки потрібно 4 таких направляючих по 600мм. Зображено на рис. 46.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/precizionnyy-napravlyayushchiy-val-na-opore-sa16-d16mm-g6/

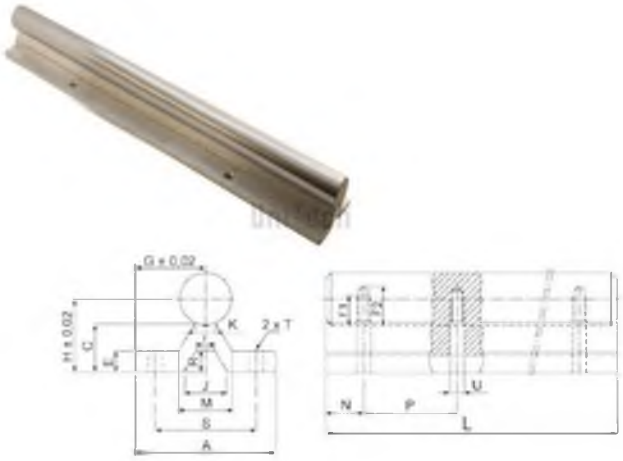


Рис. 46 Циліндрична напрямна на опорі

3.3.3.2.2.Циліндрична напрямна

Наступним елементом є напрямні циліндричні довжиною 300 мм, та діаметром 20 мм. Вони кріпляться для Z осі, вокористання їх для осі Z є більш підходящим варіантом ніж напрямні з опорою, рис. 47. Сайт для замовлення https://unitech.com.ua/ua/precizionnyy-napravlyayushchiy-val-sf20-d20mm-h6/

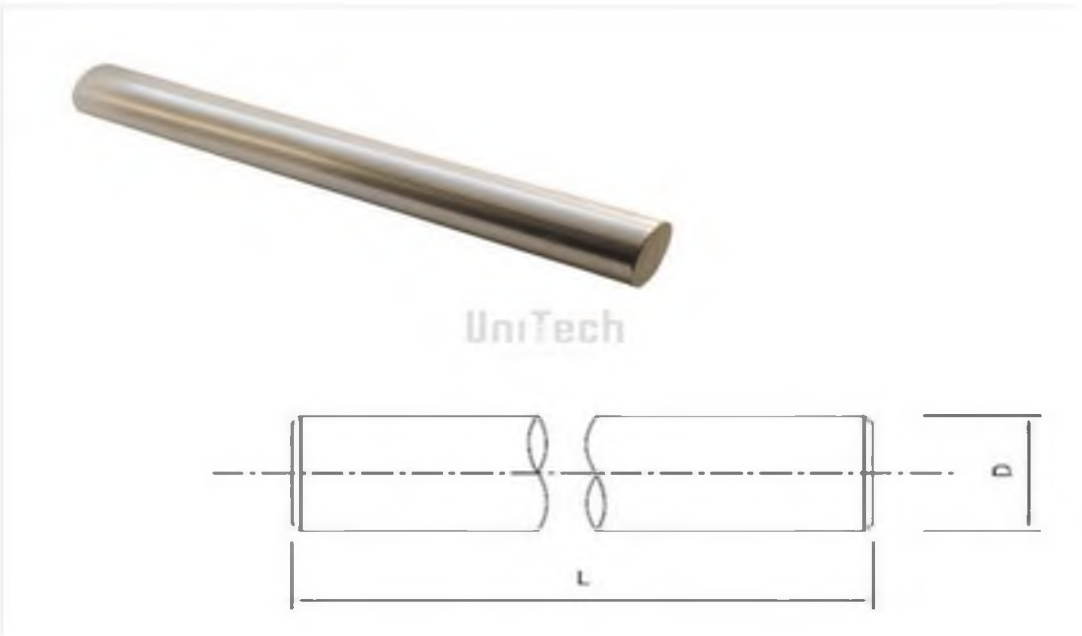


Рис. 47 Циліндрична напрямна

3.3.3.3. Блоки підшипникові та напрямні опори

3.3.3.3.1. Блоки підшипникові 16 мм

Блоки підшипникові переміщуються по опорам, цей блок переміщається по лінійному валу з опорою, рис. 48. Для замовлення потрібно 4 штук.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/lineynyy-podshipnikovyy-blok-sme-16-uu-d16mm-bxc32x30/



Рис. 48 Блок підшипниковий 16 мм

3.3.3.3.2. Лінійні підшипникові блоки 20 мм

Лінійні підшипникові блоки, вони призначені для звичайного валу напрямної, їх великий плюс в тому, що вони довгі, що забезпечує більшу стабільність, рис.49. Для замовлення потрібно 2 штуки.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/lineynyy-podshipnikovyy-blok-kba-20l-uud20mm-bxc40x90mm/



Рис. 49 Лінійний підшипниковий блок 20 мм

3.3.3.3.3. Лінійні підшипникові блоки 16 мм

Лінійні підшипникові блоки, для вісі X рис.50.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/lineynyy-podshipnikovyy-blok-sme-16l-uu-d16mm-bxc32x60/



Рис. 50 Лінійний підшипниковий блок 16 мм

3.3.3.3.4. Опора валу 30 мм

Опора валу в даному випадку використовується для кріплення підшипника, рис. 51.

Сайт де замовляється: https://unitech.com.ua/ua/opora-vala-shf-30-d30mm-l80mm/

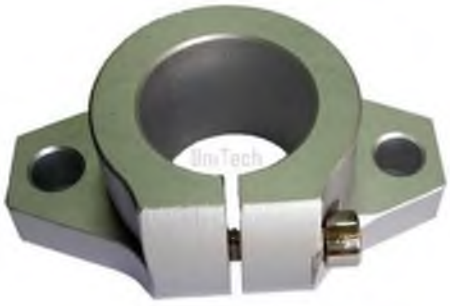


Рис. 51 Опора валу 30 мм

3.3.3.3.5. Тримач гайки

Тримач гайки потрібен для кріплення гайки з плитою 8, 9, рис. 52.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/derzhatel-gayki-mgd16-stal-sfudfu16x5-sfudfu16x10-sfs16x16/



Рис. 52 Тримач гайки

3.3.3.3.6. Опора валу 20 мм

Опора використовується для циліндричних напрямних, рис.53.

Сайт де замовляється: https://unitech.com.ua/ua/opora-vala-sk-20-d20mm-h31mm/



Рис.53 Опора валу 20 мм

3.3.3.3.7. КГП підшипникова опора

КГП підшипникова опора використовується для кріплення гвинтового валу по осі Z рис 54.

Сайт для замовлення: https://unitech.com.ua/ua/shvp-podshipnikovaya-opora-bk12-vint141516-nsk-tbi-motion/



Рис 54. КГП підшипникова опора

3.3.3.4. Кульково-гвинтова пара

Для установки використовується три КГП (кульково-гвинтова пара) діаметром 16 мм, довжиною 600 мм з кроком 5мм, та один КГП довжиною 300 мм з кроком 5 мм, рис.55.

Посилання: https://cnc.prom.ua/ua/p1120564382-shvp-1605-tokarnoj.html

Посилання: https://unitech.com.ua/ua/shvp-16x05-gayka-sfu-pravaya-c5-c7-peremes/



Рис. 55 Кульково-гвинтова пара

3.3.3.5. Муфта

Гнучка без люфтова алюмінієва муфта для з'єднання валів КГШ з двигунами діаметром 10 мм і 14 мм, рис.56.

Сайт де замовляється: https://cnc.prom.ua/ua/p1732719449-mufta-soedinitelnaya-razreznaya.html



Рис.56. Муфта

3.3.3.6. Електродвигуни

Для даної установки пропонується використовувати двигуни NEMA серії 34, без редуктору. При виборі електродвигунів потрібно звернути увагу на параметр крутного моменту повинні бути не нижче 6. Нм, так як при швидкому ході в них падає крутний момент, оптимальна швидкість обертання

для них є діапазон до 200 об/ хв, при швидкості в 360 об/ хв, крутний момент падає до 3-3.5 Нм, рис.57.

Кроковий двигун 86BYG250C-14 (NEMA 34, 6.0 Нм, 5.0 А, 1.8°)

Для даної установки обрані 3 електродвигуни NEMA 34 6 Нм: https://cnc.prom.ua/ua/p1314925769-dvigatel-shagovyj-86byg250c.html



Рис. 57 електродвигун NEMA 34

3.3.4. Електроніка

3.3.4.1. Драйвер

Драйвер для крокового двигуна DM856, при виборі драйвера потрібно орієнтуватись на параметри електродвигуна, в даному випадку потрібно, щоб драйвер забезпечував 5 А.

Leadshine DM856 - високопродуктивний мікрокроковий драйвер на основі технології цифрового DIP-регулювання від всесвітньо відомого бренду Leadshine, який застосовується для керування двофазними 4, 6, 8 дротовими кроковими двигунами з фланцем: NEMA 34 (86 мм), рис. 58.

Для електродвигуна 86BYG250C-14 (NEMA 34, 6.0 Нм, 5.0 А, 1.8°), використовується такий драйвер, по одному на кожен електродвигун: https://cnc.prom.ua/ua/p1399583198-drajver-tsifrovoj-leadshine.html.

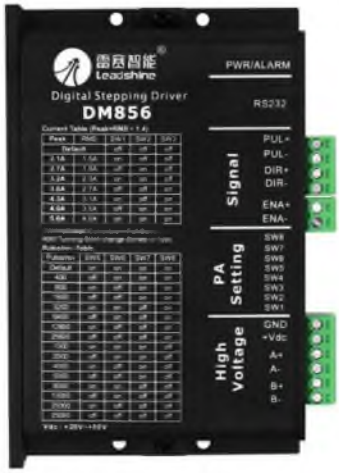


Рис. 58 Драйвер

3.3.4.2. Контролер

Для керування процесом потрібна інтерфейсна плата на 4 осі. При виборі цього елемента є багато різних варіантів, які схожі за характеристиками, для керування було обрано контролер Китайський на 4 порт, рис.59.

Сайт де замовляється: https://cnc.prom.ua/ua/p1707938659-interfejsnaya-plata-osi.html

Запасний варіант (більш дешевий): https://cnc.prom.ua/ua/p577154433-interfejsnaya-plata-lpt.html



Рис. 59 Інтерфейсна плата

До цієї плати рис. 59 повинен під'єднуватись комп'ютер за допомогою USB(тип вхідного роз'єму) дроту. З цього комп'ютера і буде здійснюватись керування, в даний проект не входить вибір комп'ютера, але він повинен мати вхід під інтерфейсну плату для з'єднання.

3.3.4.3. Блок живлення

Блок живлення S-250-36, 36V 6,9 A 250W, імпульсний. Високо економічний блок живлення в захисному кожусі 36V 6,9 A 250W застосовується з метою енергозабезпечення електроприладів з постійною напругою 36 вольта. У корпус блоку вбудований вентилятор, шляхом якого здійснюється охолодження. Особливості: захист від замикання, перевантаження, перенапруги, рис.60.

Сайт де замовляється: https://cnc.prom.ua/ua/p556579870-impulsnyj-blok-pitaniya.html



Рис.60 Блок живлення

3.3.4.4.Датчики контролю

Для установок ЧПК одним з важливих аспектів є орієнтованість програми, штучного інтелекту в просторі, так як вони не мають очей та інших органів для орієнтування. Тому в допомогу для цього приходить датчик, для ЧПК одним з основних є датчик контролю положення для установки потрібно буде 3 таких датчика для орієнтації по кожній осі, як варіант це індуктивний датчик, або оптичний, рис 61. В дану модель не входять ці датчики, їх

купівля та встановка буде відбуватися окремо, але місця для кріплення передбачене.

Сайт де замовляється: https://cnc.prom.ua/ua/p1016548994-opticheskij-datchik-qmbonw.html

Сайт де замовляється: https://cnc.prom.ua/ua/p1577905841-induktivnyj-datchik-huron.html



Рис. 61 Датчик контролю

3.3.5. Керування

Для управління та задання ходу і інших параметрів використовується програмне забезпечення MACH 3. MACH 3 надає зручний інтерфейс, що дозволяє створювати та виконувати операції з числового програмування. Він підтримує G-код, мову програмування, що використовується для керування ЧПУ-верстатами, і дозволяє імпортувати файли G-коду, що створені CAD/CAM-програмним забезпеченням, або вручну створювати свої власні програми.

3.3.6. 3D Моделювання

Для того, щоб краще зрозуміти як складаються вузли, підібрати необхідні елемент та дізнатися працює увесь механізм, було створено 3D модель установки ЧПК верстата для інкрементної формовки. Нижче будуть наведені елементи моделювання, рис. 62, 63, 64.

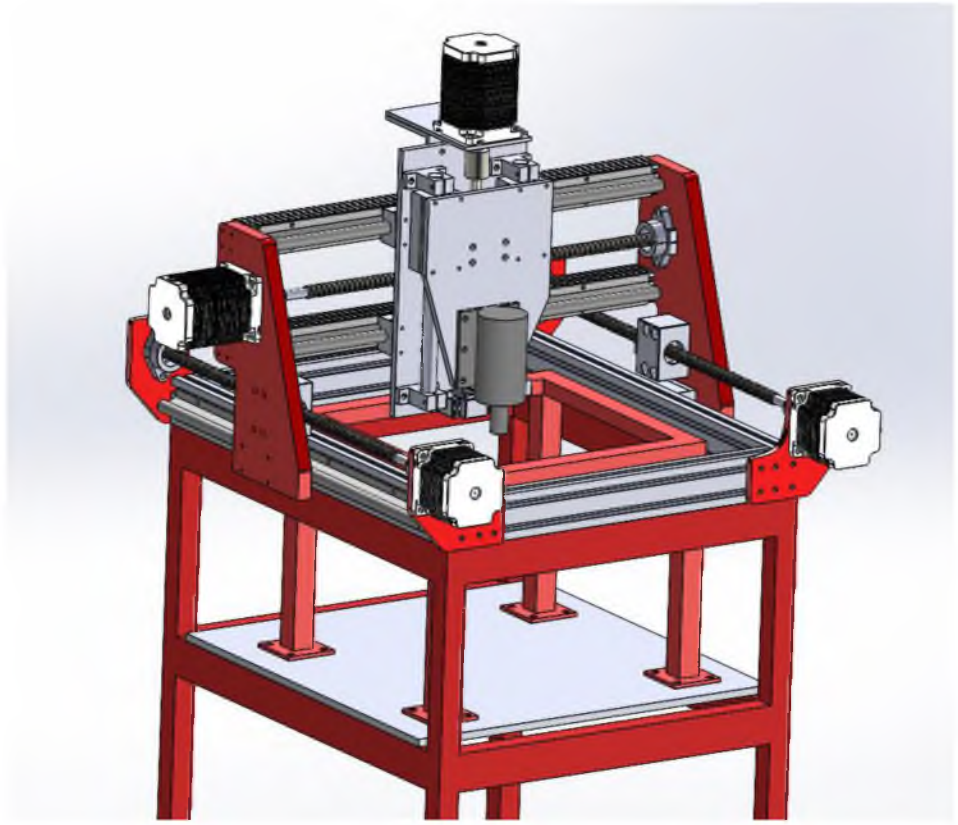


Рис. 62 Установка ЧПК(1)

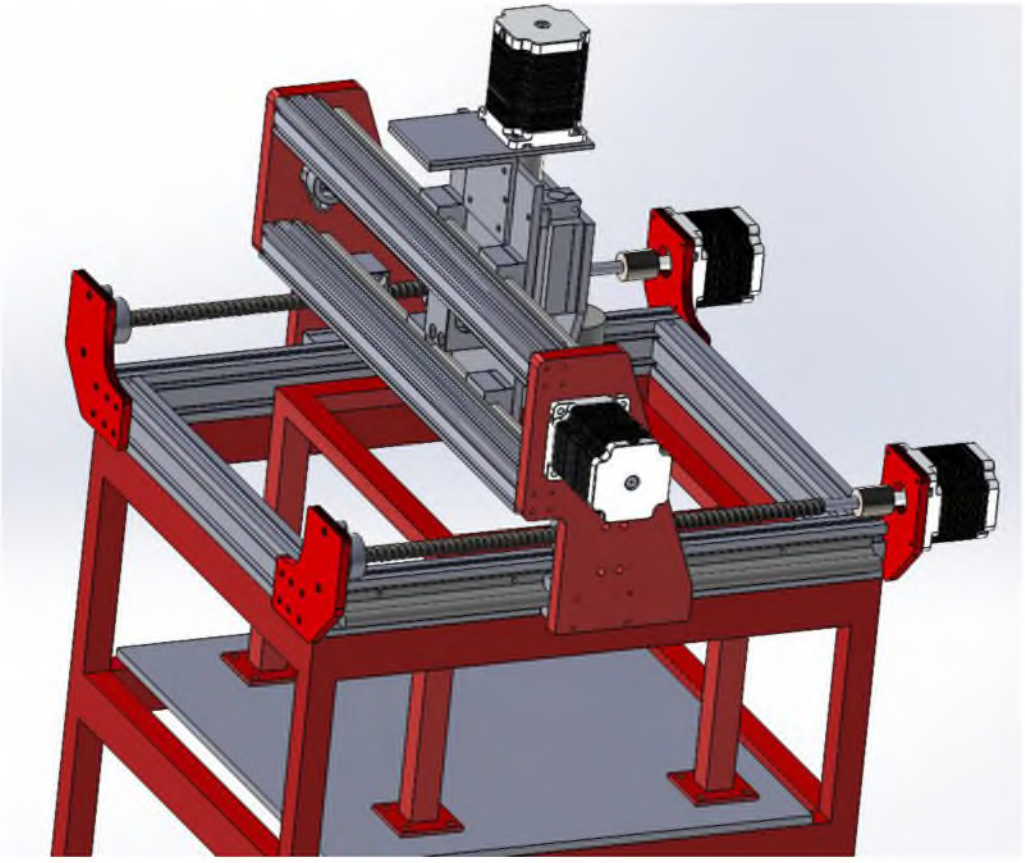


Рис. 63 Установка ЧПК(2)

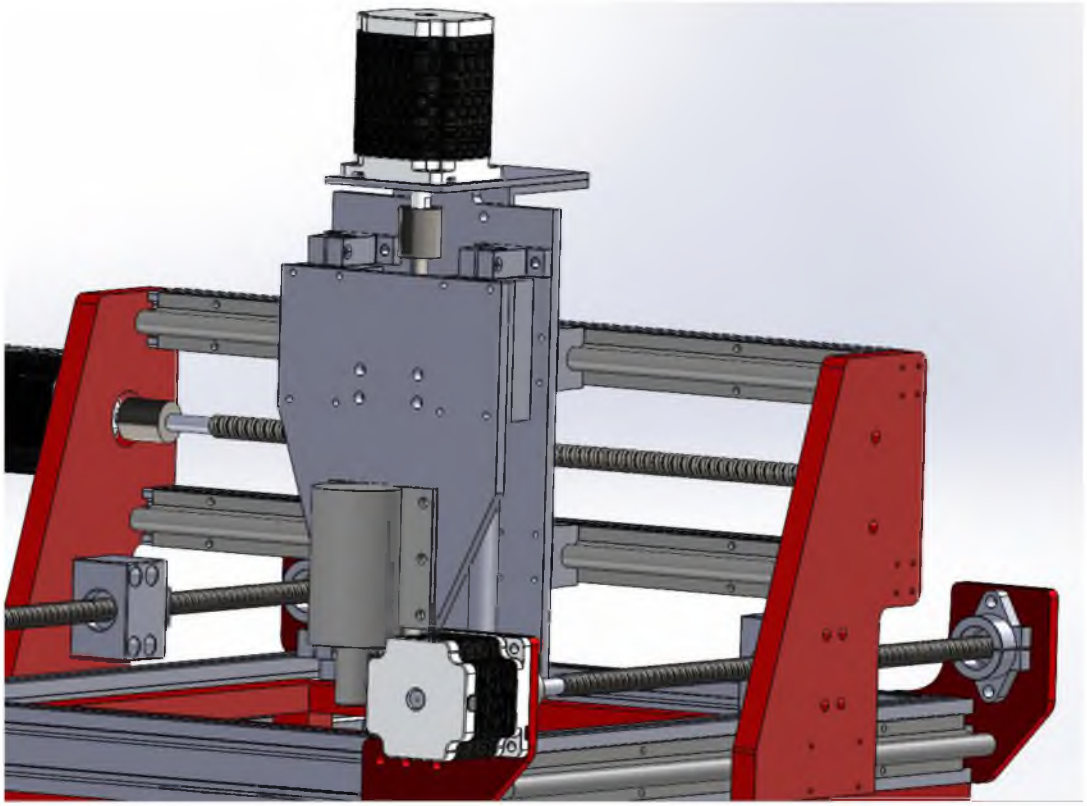


Рис. 64 Установка ЧПК(3)

3.3.7. Конструкція установки ЧПК

На раму (28) встановлюється плита (29) за допомогою болтів. На плиту (29) кріпиться стіл для матриці та заготовки (30), до стола (30) кріпиться плита 10 (50). Наступним етапом складається рама з профілів 30х60 (3,4). Профіль (3) знаходиться між профілями (4), закріплення яких відбувається за допомогою плит (5,6) та спеціальних болтів які будуть вставлятись в пази профіля, плити (5) з одного кінця профіля, плити (6) з іншого. Після цього верхня рама закріпляється болтами та гайками до нижньої. До встановлення профіля (5) на нього бажано одразу встановити напрямні (13) на які потрібно завести напрямне кріплення (31). В опора валу (9) вставляється підшипник (10) та опора валу (9) кріпиться за допомогою болтів до плити (6), після чого в підшипник (10) заводиться вал-гвинт (7,8) завчасно підготовлений, на який заведена підшипникова гайка (11) та кріпильний блок (12). Встановлюється муфта (14) на вал-гвинт (7,8), та з другої сторони встановлюється двигун NEMA 34 (15), який кріпиться болтами до плити (6).

Наступним етапом плити (1,17) кріпляться до кріпильного блока (12) за допомогою болтів, та до напрямного кріплення (31), по ходу зкріпляючись за допомогою профіля 20х40 (2) на який також завчасно встановлюються напрямні (13) з напрямними блоками (16). На плиту (17) встановлюється опора валу (9) в яку встановлюється підшипник (10), після встановлення всіх елементів потрібно затягнути всі болти та гайки, зробивши наші плити (1,17) паралельними та перпендикулярними до підлоги, та встановлення муфти (14) з гвинтовим-валом (7,8) та двигуном Nema 34 (18).

Наступним етапом на плиту (20) встановлюється опора валу (21) в які завчасно вставляються вали (22) з напрямними блоками (23). Встановлюється опорний підшипник (25) під який встановлюється плита (27), і цей пакет закріплюється за допомогою гвинтів. На вал-гвинт (19) закручується підшипникова гайка (11) та кріпильний блок (12), після чого цей вал-гвинт (21) встановлюється в опорний підшипник (25). На плиту (20) встановлюється куток (2) на який зверху кріпиться плита (3) та з'єднується вал-гвинт (21) за допомогою муфти (14) з двигуном Nema 34 (18). Важливо до початку цього етапу встановити плиту (26) з інструментом (24) на напрямні блоки(23), Показано на рис.61.

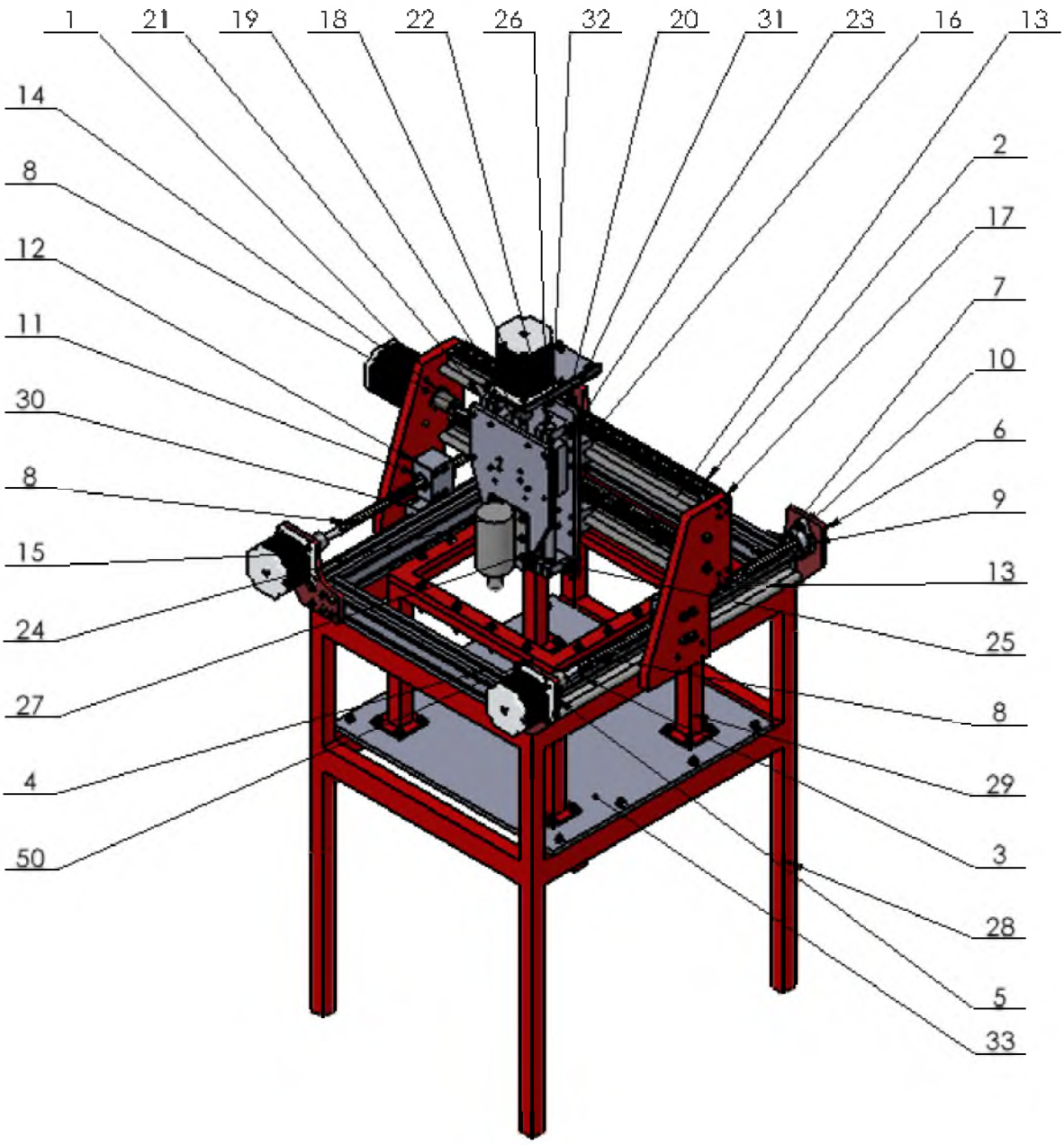


Рис. 61 Установка ЧПК (компоненти)

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В цій роботі було проаналізовано одні з головних аспектів при виборі елементів для проектування установки інкрементного формування. Перший крок для проектування установки, це моделювання. Було змодельовано два процеси формоутворення для півсверичної заготовки товщиною 1 та 2 мм. Окрім півсферичних заготовок було проведено моделювання та дослідження коробчастої заготовки товщиною 1.5 мм. Всі ці процеси були змодельовані при швидкостях руху формуючого інструменту 15-30 мм/с. в результаті чого, можна сказати, що для таких установок ЧПК цей показник є критично важливим, так як це напряму буде впливати не необхідну потужність для електродвигунів і жорсткість верстату. Було проведено аналіз матеріалів які підходять для формовки цим способомю З аналізу можна зробити висновок що цей метод підходить для м'яких металів, таких як алюміній товщиною 0.5-10 мм в залежності від типу установки для формування. Було досліджено які використовують види установок для процесу інкрементної формовки. Основні види це ЧПК верстати та механізовані маніпулятори (руки роботи). Було проведено аналіз параметрів формуючого інструмента, для більшої точності краще використовувати малий діаметр, так як за рахунок нього можна робити більш точні вироби та з меньшим напруженням на інструменті. Була спроектована та змодельована установка для інкрементоної формовки. Основна складність проектування таких установок складається в тому, що в більшій своїй частині використовуються установки такого формату для 3D друку, фрезерування, та інші операції, які не потребуються такої жорсткості конструкції і великою потужності як при інкрементній формовці. Найбільш проблемним є підбір різних блоків, створення окремих плит під певні частини, які не можна купити в магазинах та створення єдиної 3D моделі, так як немає алгоритмів та інструкцій до цього. Важливим моментом є те, що потрібно купувати частин установки по окремості, так як при 3D моделюванні всі розміри бралися з інтернету, сайтів, і можуть бути помилкові навіть на 1 мм,

що буде критичним при їх кріплені. В подальшому ця установка є гарним варіантом для модернізації та покращення, тому що має розбірну конструкцію.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Liu F, Li Y, Yuan H, et al. Comprehensive modeling of forming forces in three directions for incremental sheet forming process based on the contact area. Journal of Manufacturing Processes 2022; 84: 986-1000.

2. Kim H, Park T, Esmaeilpour R, Pourboghrat F. Numerical Study of Incremental Sheet Forming Processes. Journal of Physics Conference Series. 2018;1063(1):012017.

3. Kumar J, Gulati V, Kumar P, et al. Parametric effects on formability of AA2024-O aluminum alloy sheets in single point incremental forming. Journal of Materials Research and Technology 2019; (8): 1461–1469.

4. Wang H, Wu T, Wang J, Li J. Experimental study on the incremental forming limit of the aluminum alloy AA2024 sheet. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology 2020; 108(15): 1-9.

5. Kumar G, Maji K. Formability of AA7075 Sheet in Single Point Incremental Forming. International Journal of Manufacturing, Materials, and Mechanical Engineering (IJMMME) 2021; 11(2): 40-54. IGI Global.

7. Dodiya H, Patel D, Pandey A, et al. Experimental investigation of surface roughness for AA 3003-0 aluminium alloy using single point incremental forming. Materials Today: Proceedings 2021; 46(2): 6582-6586.

8. Subhodeep Das, Jeevanantham A.K, Pandivelan Chinnaiyan, Angshuman Baruah. Optimisation and formability study of AA5052 through incremental sheet forming. International Journal of Computer Aided Engineering and Technology 2017; Vol 9: pp.124.

9. Chinnaiyan, P. and Jeevanantham, A.K., 2015. Formability evaluation of AA 6061 alloy sheets on single point incremental forming using CNC vertical milling machine. Journal of Materials and Environmental Science, 6(5), pp.1343-1353.

10. Devarajan N, Sivaswamy G, Bhattacharya R, et al. Complex incremental sheet forming using back die support on aluminium 2024, 5083 and 7075 alloys. Procedia Eng 2014; 81: 2298–2304. https://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.324

11. Ao D, Gao J, Chu X, Lin S. Formability and deformation mechanism of Ti-6Al-4V sheet under electropulsing assisted incremental forming. International Journal of Solids and Structures 2020; 202(1): 1-12.

14. Centeno G, Martínez-Donaire AJ, Bagudanch I, et al. Revisiting Formability and Failure of AISI304 Sheets in SPIF: Experimental Approach and Numerical Validation. Metals - Open Access Metallurgy Journal 2017; 7(12): 531.

15. "Formability and microstructure evolution in single point incremental forming of copper sheets" (L. Fratini, S. Bruschi, G. Dini, та L. Tomesani), опублікована в журналі "Journal of Materials Processing Technology" у 2014 році.

16. Geometry-dependent parameterization of local support in robot-based incremental sheet forming. Dennis Möllensiep, Lars Thyssen, Bernd Kuhlenkötter. January 201

17. Emmens, W.C. and Van Den Boogaard, A.H., 2009. An overview of stabilizing deformation mechanisms in incremental sheet forming. Journal of Materials Processing Technology. **209(8)**: pp. 3688-3695.

18. Advances in the Processing of UHMWPE-TiO2 to Manufacture Medical Prostheses via SPIF (Rodrigo Ortiz-Hernández, Nicolás Antonio Ulloa-Castillo, José M. Diabb-Zavala, Estrada-De La Vega) December 2019

19.https://www.youtube.com/watch?v=jQRwOyeBF8s&ab_channel=LearnwithCrazyEngineers

20. https://www.youtube.com/watch?v=o7W7Fm5CTpA&t=6s

21. 33. Iseki, H., 2001. Flexible and Incremental Bulging of Sheet Metal Using a High-Speed Water Jet. JSME International Journal, Series C. **44(2)**: pp. 486-493.

22. Meier, H., Dewald, O., and Zhang, J., 2005. A new robot-based sheet metal forming process. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 465-470.

23. P.A.F. Martins, N. Bay, M. Skjoedt, M.B. Silva. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals. Volume 57, Issue 1, 2008, Pages 247-252

24. А. Е. Шейнблит, Курсовое проектирование деталей машин, 1991. Ст.138