НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»
Механіко-машинобудівний інститут

кафедра Технології виробництва літальних апаратів

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
в.о. завідувача кафедри
_____ А.Д. Лавріненков
«___»_____2022 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

зі спеціальності 131 Прикладна механіка_____

на тему: Процес отримання напівсферичного виробу інкрементним формуванням _____

Виконав:
студент ІІ курсу, групи ___АТ-11мп___
_____Сирота Владислав Васильович_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: к.т.н., доцент_Лавріненков Антон Дмитрович _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання) (прізвище, ініціали)

Рецензент: _____ _____
(посада, науковий ступінь, вчене звання) (прізвище, ініціали)

Засвідчую, що у цій магістерській дисертації немає запозичень з праць інших авторів без відповідних посилань.
Студент _____

Київ – 2022 року

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Інститут Механіко-машинобудівний
кафедра Технології виробництва літальних апаратів
Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-науковою програмою
Спеціальність (спеціалізація) – Прикладна механіка пластичності матеріалів

ЗАТВЕРДЖУЮ
в.о. завідувача кафедри
_____ Лавріненков А.Д
«___»_____2022 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

Сирота Владислав Васильович
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Процес отримання напівсферичного виробу інкрементним формуванням
,

науковий керівник дисертації Лавріненков Антон Дмитрович, к.т.н., доц.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання),

затверджені наказом по університету від «___»_____ 20__ р. №_____

2. Термін подання студентом дисертації _____

3. Об'єкт дослідження: процес інкрементного штампування_____

4. Вихідні дані _____
_____
_____

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Провести огляд літературних джерел, постановка задачі в програмному комплексі DEFORM та Abaqus, порівняння отриманих результатів досліджень двох процесів та надання

рекомендацій що до них __

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: записка 100 сторінок та презентація 20-25 слайдів

_

7. Орієнтовний перелік публікацій _____

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання _____

Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Аналіз способів виготовлення деталей методом інкрементного штампування	01.09.2021-30.10.2021	
2.	Розрахунок процесу отримання деталі «напівсфера» методом витягування	01.11.2021-31.11.2021	
3.	Проектування штампового оснащення	01.12.2021-31.12.2021	
4.	Моделювання процесу витягування	01.01.2022-31.05.2022	
5.	Порівняння отриманих результатів досліджень двох процесів та надання рекомендацій що до них	01.06.2022-31.08.2022	
6.	Оформлення дисертаційної роботи магістра	01.09.2022-30.11.2022	
7.	Захист магістерської дисертації	20.12.2022	

Студент _____

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник дисертації _____

(ініціали, прізвище)

* Якщо визначені консультанти. Консультантом не може бути зазначено наукового керівника магістерської дисертації.

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 99 сторінок, в тексті зазначено 62 малюнки. В даній атестаційній роботі використано 127 найменувань бібліографічних посилань.

Метою роботи є дослідження та моделювання процесу інкремннтного штампування напівсферичної деталі за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ), дослідження енергосилових параметрів процесу та напружено-деформованого стану матеріалу, а також проведення моделювання інкрементного штампування напівсферичної деталі в Abaqus.

В дисертаційній роботі проведено аналіз сучасного стану досліджень по технології виготовлення деталей інкрементним формуванням, наведено їх переваги та недоліки, на основі чого сформульовані задачі досліджень.

За допомогою методу скінченних елементів проведено моделювання штампування напівсферичної деталі класичним способом витягування в програмі DEFORM. Визначено силові режими деформування. Встановлений напружено-деформований стан викову в кінці деформування. Показано розподіл температур по об’єму здеформованих деталей та розподіл критерію руйнування. За допомогою методу скінченних елементів проведено моделювання отримання напівсферичної деталі методом інкрементного штампування в програмі Abaqus. Розроблене штампове оснащення для отримання напівсферичної деталі.

Ключові слова: інкрементне штампування, напівсфера, метод скінченних елементів, силові режими, напружено-деформований стан, витягування.

ABSTRACT

The master's thesis consists of 99 pages, 62 figures are indicated in the text. This attestation work uses 127 names of bibliographic references.

The purpose of the work is research and modeling of the process of incremental stamping of a hemispherical part using the finite element method (FEM), research of energy parameters of the process and the stress-strain state of the material, as well as modeling of incremental stamping of a hemispherical part in Abaqus.

In the dissertation, an analysis of the current state of research on the technology of manufacturing parts by incremental forming is carried out, their advantages and disadvantages are given, on the basis of which research tasks are formulated.

With the help of the finite element method, the simulation of the stamping of a hemispherical part by the classical method of extraction in the DEFORM program was carried out. Force modes of deformation are determined. The stress-strained state of the forging at the end of the deformation is established. The distribution of temperatures over the volume of deformed parts and the distribution of the failure criterion are shown. With the help of the finite element method, the simulation of obtaining a hemispherical part by the method of incremental stamping was carried out in the Abaqus program. Developed stamping equipment for obtaining a hemispherical part.

Key words: incremental stamping, hemisphere, finite element method, force modes, stress-strain state, stretching.

Зміст

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

I
S
НПУ – числове програмне управління
Процес інкрементного формування
S
Асиметричне інкрементне формування
КММ - координатно-вимірювальна машина
МСЕ – метод скінченних елементів
Оптимізація
НДС – напружено-деформований стан
САПР (CAD/CAM) – система автоматизованого проектування
$P_д$ – зусилля деформування
$V_д$ – швидкість деформування
μ – коефіцієнт тертя
σ_i – інтенсивність напружень
ε_i – інтенсивність деформацій
T – температура
$\sigma_в$ – межа міцності матеріалу
$\sigma_т$ – межа текучості матеріалу

ВСТУП

Актуальність теми. Звичайні процеси формування листового металу, такі як глибоке витяжка, згинання та штампування, є важливими для сучасної обробної промисловості. Ці процеси вимагають значних капітальних вкладень та тривалого часу підготовки штампів . Ці процеси формування листового металу можуть виробляти велику кількість деталей швидким, ефективним і економічно вигідним способом для масового виробництва, а витрати на штампи та пуансони можна амортизувати на багатьох частинах. Тривалий за часом процес заміни пуансонів і матриць у масовому виробництві обов'язково обмежений. Однак у випадках, коли потрібні малі та середні партії виробів складної форми, наприклад, деталі літаків, розробка та виготовлення штампов і штампов на замовлення може бути надзвичайно дорогим.

Тому тема дисертаційної роботи, яка направлена на дослідження й комп'ютерне моделювання технологічних процесів отримання деталей інкрементним формуванням, а також оптимізацію та дослідження процесу, є актуальною.

Мета дисертаційної роботи. Дослідження та моделювання процесу інкрементного штампування напівсферичної деталі за допомогою методу скінчених елементів (МСЕ), дослідження енергосилових параметрів процесу та напружено-деформованого стану матеріалу.

Задачі дослідження:

- провести аналіз сучасного стану досліджень по технології інкрементного штампування; схеми процесу; особливості устаткування; робочий інструмент; змащення зони контакту; які недоліки процесу в порівнянні із звичайним/класичним; які матеріали можна обробляти; в чому складність процесу, чи відбувається пружня деформація отриманої деталі; моделювання процесу методом скінченних елементів.
- розрахунок процесу отримання деталі класичним способом;

- розробити штампове оснащення для отримання напівсферичної деталі витягуванням.
- провести скінчено-елементне моделювання штампування напівсферичної деталі витягуванням та дослідити різні можливі схеми штампування;
- порівняти результати дослідження;
- розробити рекомендації щодо модернізації процесу.

Об’єкт дослідження. Інкрементне листове штампування

Предмет дослідження. Параметри інкрементного листового штампування

Методи дослідження. Дослідження процесів інкрементного штампування штампування та встановлення їх параметрів проведені з використанням метода скінченних елементів (МСЕ) та програмних комплексів DEFORM та Abaqus.

Практичне значення отриманих результатів:

- розроблено модель напівсферичної деталі із ALUMINUM-7075 (аналог алюмінієвого сплаву В95);
- проведено дослідження та скінчено-елементне моделювання в програмному комплексі DEFORM штампування напівсферичної деталі витягуванням та схемами штампування;
- проведено дослідження та скінчено-елементне моделювання в програмному комплексі Abaqus;
- розроблено штампове оснащення для отримання напівсферичної деталі витягуванням.

РОЗДІЛ 1
СУЧАСНИЙ СТАН ДОСЛІДЖЕНЬ ПО ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ІНКРЕМЕНТНИМ ШТАМПУВАННЯМ

1.1. Інкрементне штампування та його види

1.1.1. Передумови

Хоча існує багато типів виробничих процесів, загальною метою яких є виробництво напівфабрикатів, таких як листи, плити та прутки, або специфічних кінцевих деталей із відмінною обробкоб поверхні та низькою вартістю. При обробці металу тиском металева заготовка або листова заготовка пластично деформується за допомогою штампів або інструментів, часто без подальшого значного видалення металу. Оглянутий метод має можливість виготовляти деталі з чудовими механічноми властивостями, чудовою обробкою поверхні та точністю розмірів, з мінімальними матеріальними відходами. Тому він займає дуже важливе місце серед виробничими процесами.

1.2. Процеси формування листового металу з поетапним підходом

Процеси інкрементного формування листів (ISF) — це загальний термін, який використовується для визначення багатьох процесів, включаючи прядіння, витяжку, розтягування, прокатку, дробове формування, лазерне формування та асиметричне інкрементальне формування листів. Ці процеси мають спільну рису, коли в будь-який момент часу відбувається невелика локалізована деформація (невелика порівняно з розміром заготовки). Процес зазвичай призводить до того, що вся заготовка деформується пластично, або шляхом переміщення заготовки над або через формувальні інструменти, або, що частіше, переміщення інструментів над заготовкою. Інкрементальний характер, який є результатом пластичного деформування лише невеликого об’єму заготовки, зменшує необхідну потужність і формувальні навантаження, що дозволяє зменшити раму машини. Процеси формування

листового металу, що включають поетапний підхід можна класифікувати за застосовуваною технологією та складністю кінцевої продукції на дві категорії; традиційні методи (такі як обертання металу, глибока витяжка, розтягування і прокатка) і сучасні розробки (такі як лазерне формування та асиметричне інкрементне формування листів AISF). Традиційні процеси зазвичай обмежуються простими або симетричними продуктами і не здатні створювати складні геометрії. У сучасних техніках часто використовуються програми CAD/CAM, і, таким чином, можна виробляти асиметричні вироби зі складнішою геометрією. Прядіння металу з іншими традиційними методами вважається основою для розвитку новітнього сучасного листового формування. У результаті важливо чітко розуміти механізм деформації при пряденні металу, щоб зрозуміти ці сучасні методи. Однак встановлення важливості параметрів процесу прядіння та покращення якості продукції все ще є важливою сферою досліджень і залишається складним завданням. Нижче наведено огляд двох інкрементальних технологій формування листів, один із класичних методів — прядіння, а інший — з останніх розроблених методів, тобто AISF(асиметричне поступове формування листа).

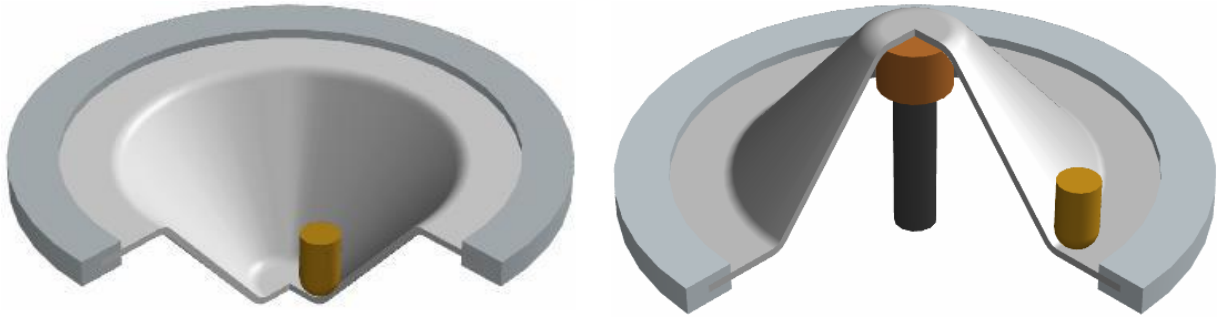
1.3. Асиметричне додаткове формування листів (AISF)

Асиметричне інкрементне формування листа AISF зазвичай відноситься до процесу формування без штампів, який можна використовувати для формування складних форм за допомогою простих інструментів. Процесу приділяється все більше уваги через його високу гнучкість і низьку вартість. Основними відмінностями між AISF та іншими процесами ISF є менший характер процесу, свобода переміщення формувального інструменту в трьох вимірах під керуванням ЧПУ та його здатність створювати як симетричні, так і асиметричні форми. У AISF простий інструмент переміщується по поверхні листа і створює високо локалізовану пластичну деформацію. Таким чином, різноманітні складні тривимірні форми можна сформувати за допомогою переміщення інструменту по правильно розробленим і контрольованим

траєкторіям без використання спеціальної матриці.

1.3.1 Конфігурації AISF

Асиметричне інкрементне формування листа має дві основні відомі конфігурації, як визначено Jeswiet та ін. [3]. Перший – це інкрементне формування однієї точки. Її називають двоточковим інкрементальним формуванням. У SPIF (одноточкове інрементне штампування), також відомому як поетапне формування без штампів, лист затискається з країв, а потім формується за допомогою інструмента з однією точкою, як показано на малюнку 1.1 (а). TPIF (двоточкове інкрементне штампування) отримав свою назву через те, що заготовка з листового металу пресується в двох точках одночасно. Перша точка вдавлюється в аркуш, викликаючи пластичну деформацію, обстежуючи контур форми, яка буде створена. Друга точка працює як статична опорна стійка, яка створює протидіючу силу вгору на заготовку з листового металу, як показано на малюнку 1.1 (б). TPIF був у ряді форм, включаючи використання часткової матриці (позитивної чи негативної), а також використання центрального стовпа [1]. TPIF вимагає спеціальних інструментів, які можна розглядати як недолік.

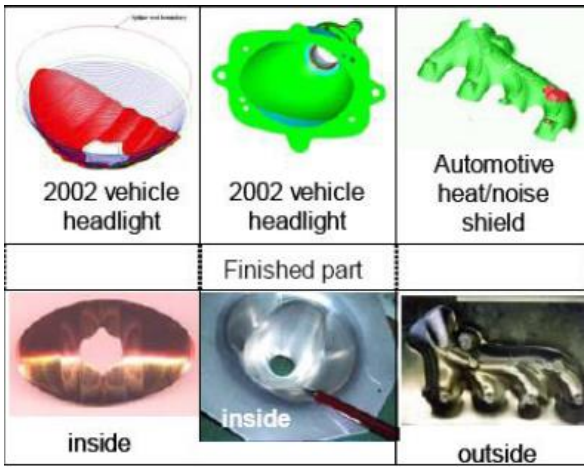


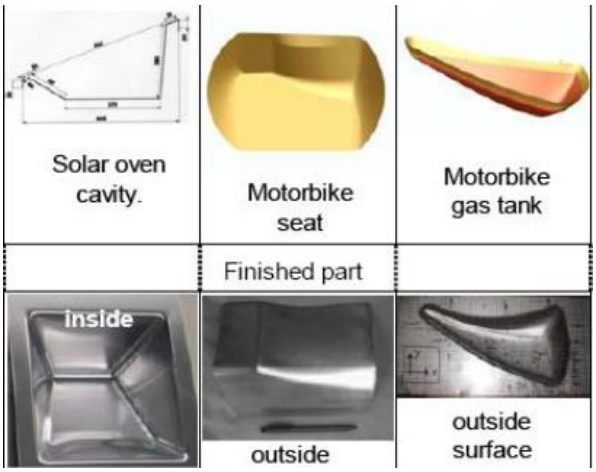
а б

Рис 1.1: (а) SPIF і (б) TPIF.

1.3.2 Переваги та застосування

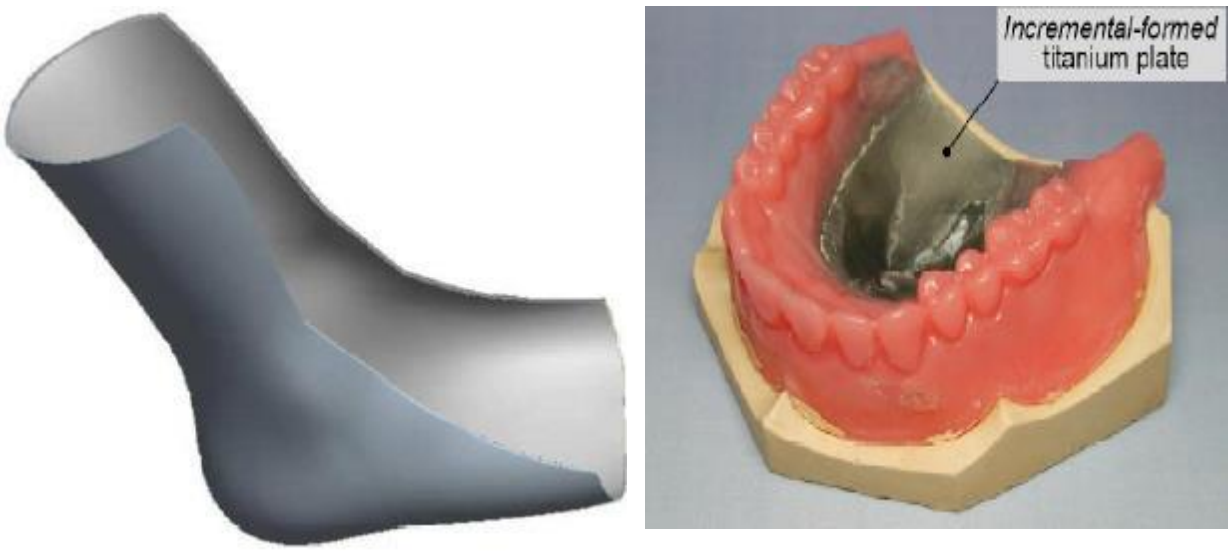
Найважливішими перевагами AISF є можливість швидкого створення прототипів промислового формування листового металу перед масовим виробництвом, висока гнучкість, однорідна деформація, сильна орієнтація на клієнта та низькі витрати. Процес має багато промислових застосувань, які включають швидкі прототипи для автомобільної промисловості та легкі компоненти з відбиваючими поверхнями, такі як фари транспортних засобів та автомобільні тепло/шумозахисні екрани [5,6] (див. Рис 1.2а), а також для неавтомобільних застосувань, таких як як сонячні печі, сидіння для мотоциклів і бензобаки для мотоциклів [7] (див. Рис 1.2б). Крім того, цей процес має потенціал для застосування в медицині. Його можна використовувати для виготовлення індивідуальних опор щиколотки [8] та зубних пластин [9], як показано на малюнку 1.3.





а б

Рис 1.2: Швидкий прототип для (а) автомобільної промисловості [5,6] і (б) неавтомобілебудівної промисловості [7].



а б

Рис 1.3: Медичне застосування (а) опора гомілкостопу [8] і (б) зубна пластина [9].

AISF також можна використовувати для виробництва недорогих поверхонь матриць і форм .Smith та ін [9] запропонували новий гібридний процес, який поєднує обробку тонких деталей і SPIF. Новий процес дозволив створити різноманітну геометрію (наприклад, тонку стінку з кількома вигинами та тонку підлогу з куполом пісочного годинника), які було б дуже важко отримати за допомогою будь-яких інших процесів. Крім того, SPIF показав свою здатність успішно формувати листи, виготовлені зварюванням тертям з перемішуванням (FSW)(Aluminum Welding Solution) [10].

Переваги інкрементального формування:

• використання CAD-моделі деталі для
отримання необхідних розмірів без застосування
штамповий інструмент;
• підвищення ступеня формозміни та
зменшення деформуючих сил за рахунок локалізації осередку пластичної деформації;
• можливість використання для формування
фрезерних ЧПУ;

• розміри деталі обмежені лише розміром столу обладнання;

• не потрібне складне штампове оснащення.

Недоліки:

• низька продуктивність на відміну від
традиційних процесів;

• застосовується лише у дрібносерійному виробництві;

• складні алгоритми руху інструменту,
які дозволяють забезпечити високий рівень
формозміни та точність одержуваної деталі
з урахуванням пружних деформацій.

1.3.3 Обладнання для AISF

Є три основні елементи, необхідні для AISF, включаючи тримач заготовок, формуючий інструмент і машину для приводу інструменту, на додаток до заготовки з листового металу. Для фіксації листа з країв в AISF використовується затискач. Зазвичай це робиться за допомогою металевої пластини над і під заготовкою. Формувальним інструментом для AISF є суцільний стрижень зі сферичним або напівсферичним кінцем. Інструмент рухається по траєкторії інструменту ЧПУ і застосовує локальний тиск і створює локальну деформацію. Форма інструменту забезпечує плавний контакт [1], де наконечник інструмента може котитися по поверхні листа без шкоди для обробки поверхні. Хвостовик інструменту зроблений дуже просто, щоб без проблем сформувати різноманітні кути. У деяких дослідженнях для деформації чистого аркуша успішно використовувалися інші типи інструментів, такі як дробове оброблення [11] та водяний струмінь [12]. Для дуже великих кутів стіни, напр. 90˚ слід використовувати невеликий хвостовик інструменту, щоб уникнути контакту між хвостовиком інструмента та деформованим листом. Головка інструменту зазвичай виготовляється з інструментальної сталі, яка підходить для більшості застосувань. Щоб уникнути зносу інструменту, головку інструменту можна покрити

твердосплавним сплавом [33] (див.Рис 1.4). Найпоширеніший діаметр інструменту становить від 6 до 30 мм.

Рис 1.4: Інструменти з твердосплавних сплавів з діаметрами 6, 10 та 30 мм [13].

Ключову роль в успішному виконанні процесу відіграють машини, які використовуються для формування листів. Багато робочих параметрів, таких як товщина листа, максимальне зусилля формування, швидкість інструменту, конструкція та реалізація траєкторії інструменту та кількість осей, досить залежать від машини, яка використовується в процесі. Багато досліджень використовували тривісний фрезерний верстат з ЧПУ для дослідження AISF через комп'ютеризоване програмування шляху інструменту.

Процеси AISF в порівнянні з процесами різання металу обмежили використання фрезерних верстатів з ЧПУ. Ще одна проблема фрезерних верстатів з ЧПУ полягає в тому, що вони не можливі для всіх конфігурацій TPIF. Таким чином, ряд спеціально створених машин AISF були розроблені та повідомлені для подолання цих проблем.

1.3.4 Процедура впровадження та схеми процесу

Процедура впровадження процесів AISF зазвичай починається з комп'ютерного проектування креслення CAD необхідного продукту. Для індивідуальних продуктів, як і в медичних додатках, креслення CAD можна створити за допомогою 3D лазерного сканера [5] (шляхом просвічування лазерного променя на поверхню та збирання хмари відбитих точок, таким чином генеруючи креслення CAD), як продемонстровано Ambrogio та ін. [8].

Наступним кроком є перетворення креслення CAD в шлях інструменту ЧПУ або комп'ютерне виробництво

CAM. Існує ряд комерційних програм CAD-CAM, таких як AutoDesk і Edgcam. Також можна використовувати програмне забезпечення для кодування, наприклад Matlab [1]. Наступним кроком є вибір змінних процесу. На якісні характеристики продукції впливають змінні процесу, тому їх слід вибирати ретельно. Змінні включають діаметр інструменту, подачу, швидкість обертання та мастило.

Процес AISF показаний на рис 1.5.

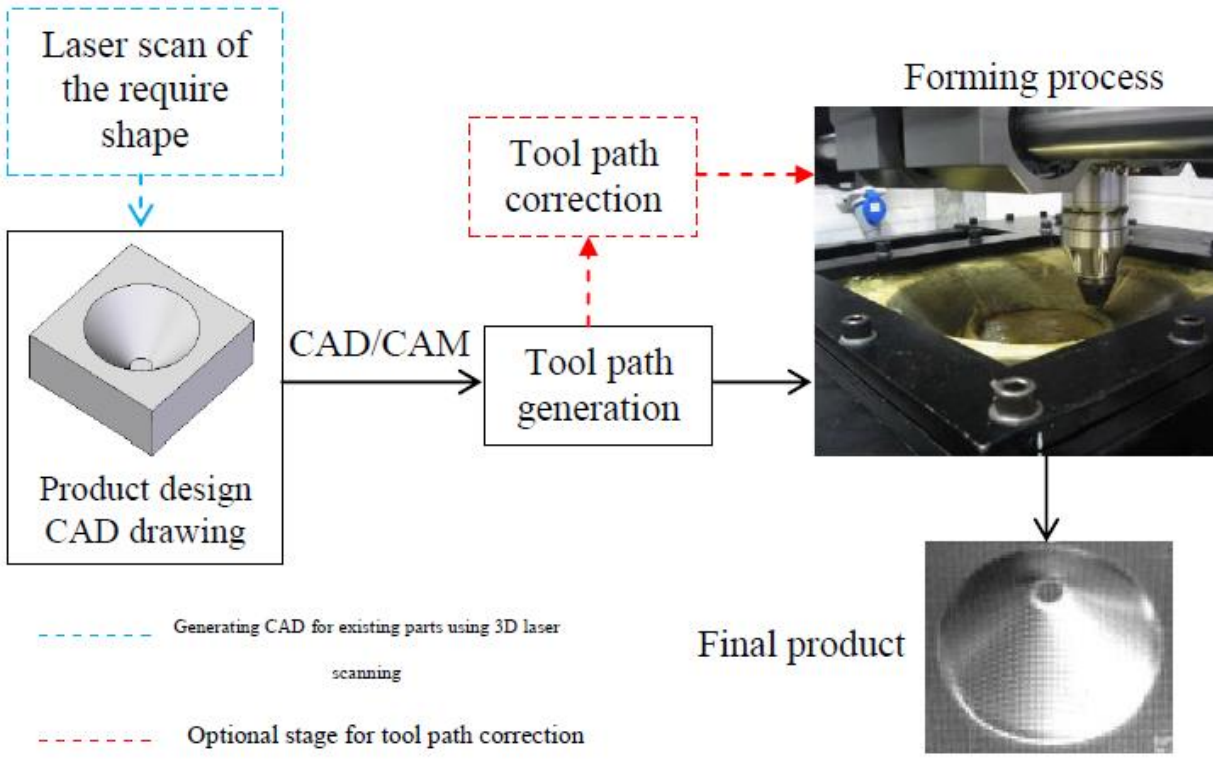


Рис 1.5: Процедура впровадження процесу AISF [1].

У деяких випадках траєкторія інструменту потребує певної корекції перед формуванням необхідного продукту за допомогою додаткового кроку. Причинами корекції траєкторії інструменту можуть бути досягнення кращої точності [14-18], запобігання виходу з ладу [65, 19-23] або поліпшення якісних характеристик виготовлених деталей [24-28].

Схеми деформування.

Інкрементальне формування - новий процес обробки листового матеріалу, в якому заготовка локально деформується пуансоном зі сферичним торцем шляхом переміщення одного чи кількох інструментів уздовж заданого напрямку (Рис. 1.6). Кінцеві частини заготовки при цьому жорстко фіксуються між нижньою плитою та притискачем. Крім переміщення вздовж заданого шляхи зниження впливу сил контактного тертя пуансон обертається навколо своєї осі. Технологія дозволяє обробляти конструкційні, корозійностійкі, високоміцні та оцинковані сталі, кольорові метали, титан та інші матеріали. Основна відмінність від традиційних технологій полягає в тому, що не потрібно виготовлення дорогого формозмінювального інструменту та використання потужного пресового обладнання, тобто. формозміна виконується не за рахунок заповнення порожнини шляхом суміщення нижньої та верхньої гравюр штампу, а за рахунок реалізації переміщень інструменту по заданому контуру за заздалегідь розрахованим траєкторій.

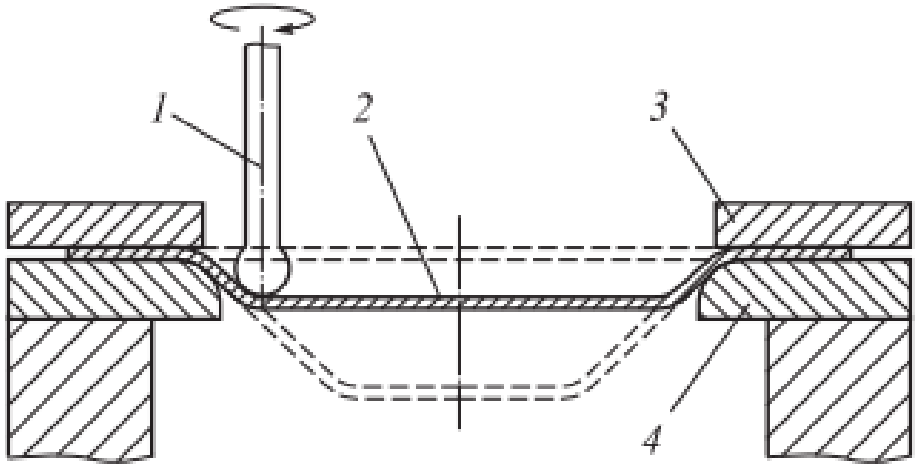


Рис 1.6 Принципова схема інкрементного штампування
1 - пуансон, 2 – заготовка, 3 – притискач, 4 – нижня плита

Подібний підхід до деформування реалізується в ротаційній витяжці та інших

процесах, у яких також використовується метод локалізації осередку пластичної деформації, що дозволяє ефективно інтенсифікувати процеси [1–3] за рахунок чого виключається утворення концентрацій напруг і мікротріщин і збільшується ступінь формозміни, але відрізняється тим, що деформування в інкрементальному формуванні здійснюється тільки за рахунок переміщення інструменту при повної фіксації заготовки. Таким чином можна отримувати не тільки вісесиметричні вироби, а вироби практично будь-якої форми, у тому числі з наявністю внутрішніх кутів та широкому діапазоні розмірів. Також за рахунок контролю та управління зміною товщиною матеріалу по перерізу заготівлі, що досягається використанням різних траєкторій руху інструменту, раціонально застосовувати технологію інкрементального формуваннядля отримання сферичних заготовок, що виготовляються переважно методом реверсивної формування. Хорошою аналогією даного процесу є технологія 3D-принтера, в якій використовується метод пошарового створення фізичного об'єкта з цифрової 3D моделі. Ця технологія знайшла широке застосування в виробництві як економічно доцільна альтернатива традиційним методам отримання виробів із пластмас. Для підвищення точності одержуваних виробів та розширення технологічних можливостей використовують різні схеми формозміни.

Типові схеми процесу інкрементального формування представлені на рис. 1.7. Формування за схемою, наведеною на рис. 1.7 а, виконується одним пуансоном без додаткових підпорів. За рахунок дії згинальних моментів точність отриманої заготовки невисока та її застосування нераціонально при значних ступенях формозміни. Ці недоліки усунуті при використанні різних видів підпорів (рис. 1.7, б-д), що забезпечують жорстку конструкцію та виключають дія згинального моменту, але вимагають додаткового оснащення. Схема представлена на рис. 1.7, е, має переваги всіх перерахованих схем завдяки наявності контрпуансону, який переміщується спільно з основним пуансоном. Таким чином знижується вплив згинального моменту і з'являється

можливість отримання більш складних форм вироби, у тому числі з внутрішніми кутами. Однак для цього потрібне спеціалізоване обладнання.[125]

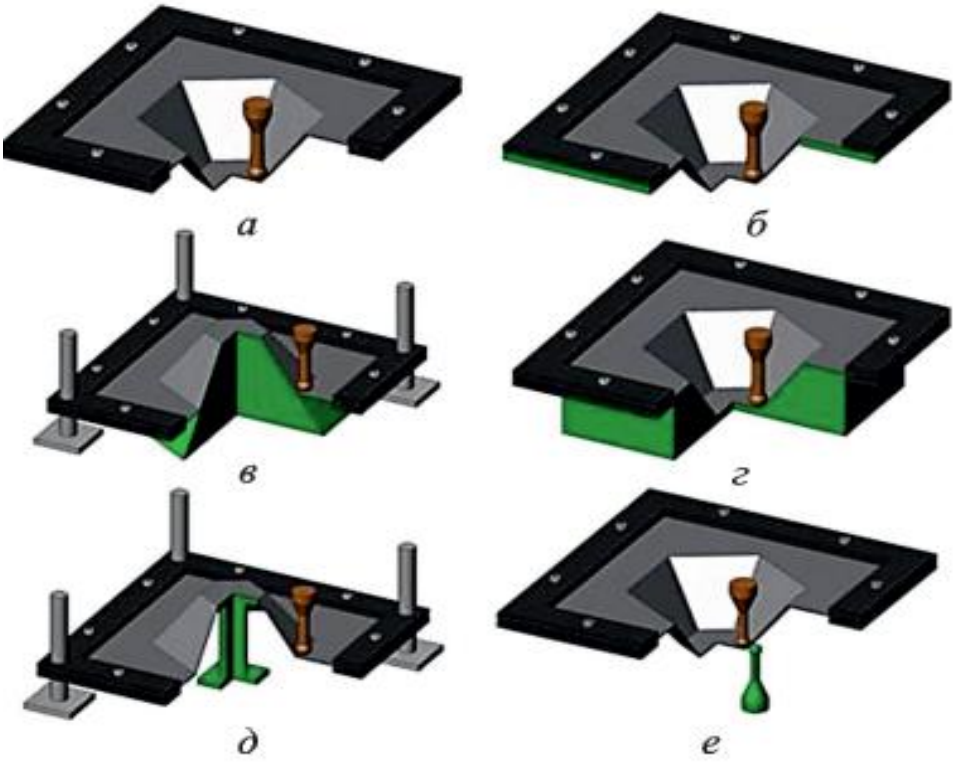


Рис 1.7 Схеми інкрементального формування:

а - з одним пуансоном; б - з пуансоном і опорною плитою під заготівлею; в, г - з опорною матрицею; д - з нижнім підпором; е - з контрпуансоном

1.3.5 Загальні матеріали

Невелика пластична зона та інкрементальний характер процесу сприяють підвищенню формуючості, полегшуючи деформацію матеріалів з низькою формованістю. Тому процеси AISF можна використовувати для формування широкого спектру матеріалів, включаючи метали та полімери. Однак пластичні матеріали, такі як алюміній і м’яка сталь, є більш поширеними в практиці AISF [61]. Хоча є кілька прикладів його використання в складніших матеріалах. Процеси AISF були успішно застосовані для формування латуні[97], мідь [97, 136], титан [103, 136-138], золото [136],

срібло [136] і платина [136]. Ландерт [139] показав застосовність AISF до композиційних матеріалів для деформації композиту з металевою матрицею [59]. Деякі неметалічні матеріали були розглянуті, наприклад, Le et al [140], які досліджували застосовність SPIF для деформації термопластичного матеріалу. Нещодавно Franzen et al [141] та Martins et al [142] у 2009 році провели раннє дослідження SPIF полівінілхлориду та полімерів відповідно. Зазвичай товщина листа, що використовується в практиці AISF, становить менше 3 мм і не менше 0,4 мм, як повідомляють Allwood та інші [143]. Однак Танака та інші [144] розробили спеціально створену формуючу систему для формування мікроплівок (10-100 мкм). Деформація була успішно досягнута з використанням алюмінієвого листа товщиною 5 мм, як повідомляє Jyllilä [145]. Однак це досить товста і не є загальноприйнятою товщиною листа для практики AISF.

1.3.5 Підходи до розслідування в AISF

Для вимірювання характеристик процесу та оцінки механіки процесів AISF використовувалися експериментальні, аналітичні та чисельні методи. Цей розділ демонструє різні методи дослідження, які використовуються в AISF. Результати, отримані від використання цих методів, будуть показані далі в цьому розділі.

1.3.5.1 Експериментальні підходи

Експериментальні методи використовувалися в процесах AISF для вимірювання таких характеристик процесу, як геометрія, деформація, зусилля інструменту, товщина та обробка поверхні. Розміри та геометрію деталей, виготовлених AISF, вимірювали трьома основними методами. CMM (Координатно-вимірювальна машина), 3D-сканування та стереобачення є поширеними експериментальними методиками, які висвітлюються в літературі. Системи CMM використовуються для вимірювання геометрії листа після розтискання шляхом проведення поточкових вимірювань, як використовуються Meierta ін. та Hirt et al [15]. Якщо розміри та геометрію

необхідно виміряти перед розтисканням, можна використовувати 3D-сканування або стереобачення. Однак одним з обмежень цієї техніки є затискачі листів та інші перешкоди, які в деяких випадках обмежують сканування всієї поверхні [1]. Як зазначено вище, 3D-сканування працює шляхом просвічування лазерного променя на поверхню та збирання хмари відбитих точок, як це використовується Ambrogio et al [16] та Duflou et al [18]. У підході стереобачення дані CAD генеруються шляхом отримання зображень з різних положень і вирівнювання їх разом. Процес не потребує поверхневого сканування, що може бути перевагою підходу до 3D-сканування [1]. Цей метод був використаний Hirt та ін. [15] та Watzeels та ін. [31].

Тензодатчики та сітки, нанесені на поверхню, є найбільш поширеними підходами, що використовуються для вимірювання деформації при одноточковому та двоточковому поетапному формуванні [1]. Тензодатчики є найпростішою технікою, коли тензодатчики встановлюються на поверхні листа в ряді місць, де вимірюється деформація [32]. Хоча складність прикріплення та вимірювання деформації в окремих точках лише демонструє обмеження цієї техніки. Альтернативним методом вимірювання деформації є використання сіток. У цьому Підходячи, на нижній поверхні аркуша (тій, яка не стикається з формуючим інструментом) друкується сітка кіл відомих розмірів. Розмір цих кіл потім вимірюється після формування та використовується для розрахунку поверхневої деформації. Сітка може бути легко нанесена кількома методами, включаючи відбиток, як використовується Filice та ін [19], друк, як використовується Jeswiet та інші [23], фотографічна техніка, яку використовують Kitazawa [32] та Iseki [33], електро -хімічне травлення, використовуване Шімом і Парком [34], або нанесення сітки на поверхню вручну, як використовується Кімом і Парком [35]. Сформовані кола зазвичай мають еліптичну форму, для якої вимірюються два діаметри та використовуються для розрахунку великих і малих поверхневих деформацій.

Існує ряд експериментальних методів, що використовуються для вимірювання

сил формування в AISF, включаючи використання силового динамометра, тензометра та тензодатчика. Duflou та ін [36, 37] використовували динамометр для вимірювання сили на листотримачі. Bologa та співавтори [38] застосували тензометричний підхід для вимірювання зусилля на хвостовику інструменту. Jeswiet та ін [39] вимірюють силу за допомогою датчика навантаження, подібного до Duflou. Останній метод використовується в спеціально створеній машині, розробленій Allwood [13].

У літературі не знайдено автоматизованого підходу до вимірювання товщини листа. Це пояснюється тим, що лише одну поверхню можна виміряти одночасно за допомогою CMM або 3D-сканування. Однак для вимірювання товщини листа потрібна інформація як з верхньої, так і з нижньої поверхонь. Бамбах та інші [28] вимірювали товщину листа простим підходом за допомогою мікрометра. Крім того, CMM можна використовувати, якщо є доступ до обох сторін, як продемонстровано Ambrogio [27, 40]. Нещодавно Dejardin [41] розробили онлайн-систему вимірювання товщини на основі ультразвукової технології, інтегрованої в формувальний інструмент. Шорсткість поверхні частин AISF також можна виміряти, як продемонстрували Хаган та інші [42].

1.3.5.2 Аналітичні підходи

Аналітичні методи зазвичай не використовуються в аналізі AISF. Кілька прикладів засновані на методі мембранного аналізу; Martins et al у 2008 році [53] представили різні режими деформації, які зазвичай зустрічаються в SPIF. Silva та інші [44, 45] побудували аналітичну модель, засновану на тому ж підході, щоб вирішити вплив параметрів процесу та пояснити підвищену формуемість SPIF. Структура моделі Марціняка-Кучинського (MK), вперше запропонована в 1967 році [46], є широко використовуваним аналітичним інструментом для прогнозування межі формуемості листа через появу локалізованої шийки. Модель передбачає недосконаліть (канавка б) у абсолютно однорідному листі (матриця а), а початкова орієнтація канавки,

визначена Ф0, змінюється під час деформації через деформацію матриці, як показано на малюнку 1.6. На матрицю a накладається монотонна деформація в термінах постійного градієнта швидкості La. За допомогою припущень про нестисливість можна визначити компоненти рівноваги сил і геометричної сумісності градієнта швидкості канавки Lb. Зазвичай вони розвиваються під час деформації, тому застосовується інкрементна процедура. Для кожної початкової орієнтації канавки Ф0 в матриці існує деяка велика деформація в площині, при якій деформація локалізується всередині канавки (називається деформацією шийки ε_{11}). Гранична деформація формування визначається як мінімум з усіх деформацій шиї [118, 119].

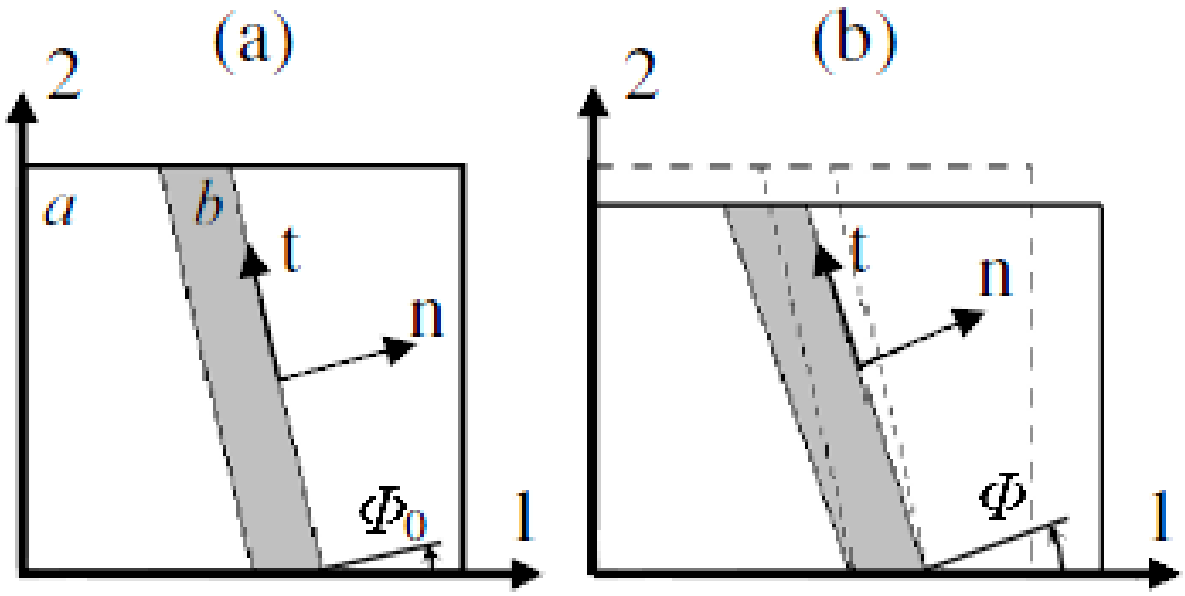


Рис 1.6: Модель МК (а) недеформований стан і (б) деформований стан. Осі 1-2 представляють основний і малий напрямки в площині. Осі n-t закріплені за пазом b. 3-осі, тобто товщина листа, перпендикулярна до площини ескізу [119].

Нещодавно Allwood [47] та Eyckens et al [48, 49] запропонували розширення моделі МК, щоб чітко врахувати зсув наскрізної товщини, який зазвичай не враховується в аналізі МК. Розширена модель МК показала, що напруга зсуву по товщині сприяє формуваності та затримує початок локалізованого шийки, як показано на малюнку 1.7. Межі формування, показані на малюнку 1.7,

отримані з процесу формування лопатки, де відбувається зсув наскрізної товщини.

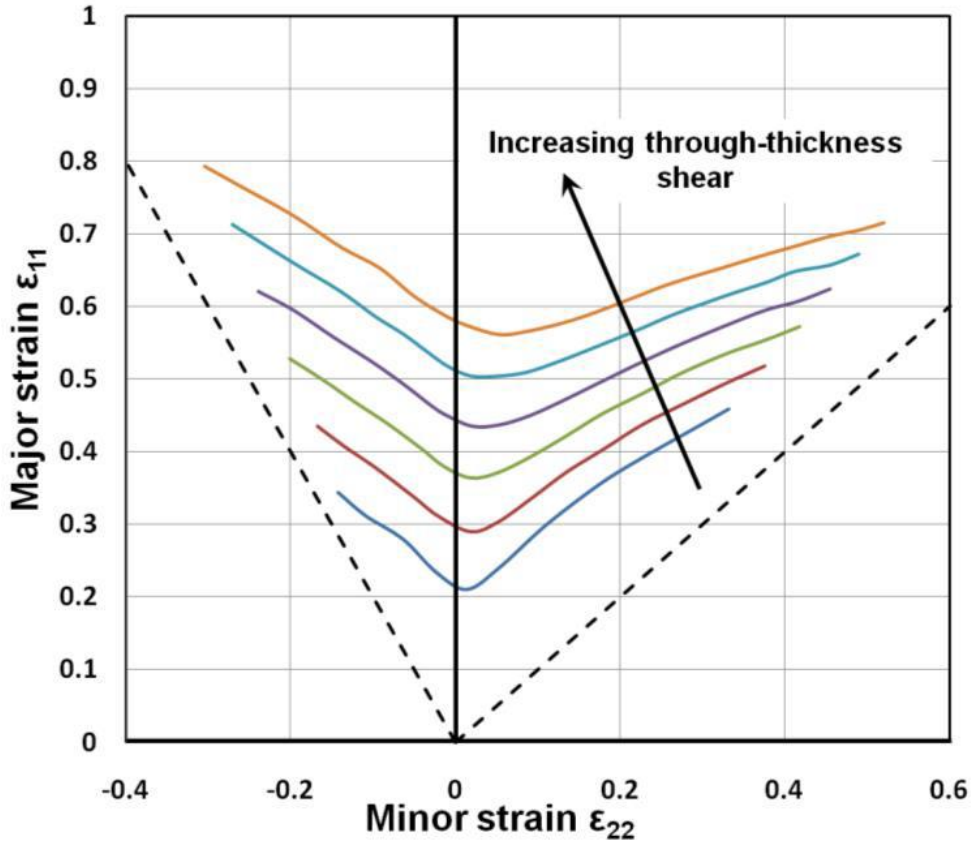


Рис 1.7: Вплив зсуву по товщині на межу формування, як передбачено за допомогою розширеної моделі MK Allwood [47].

1.3.5.3 Чисельні підходи

Чисельні методи, наприклад моделювання FE (скінченних елементів), дозволяють детально вивчати поведінку складної деформації, як у AISF, і оскільки експериментальні спостереження явищ наскрізної товщини надзвичайно складні, моделювання процесів AISF стає важливим інструментом. Чисельне моделювання AISF використовувалося для багатьох цілей. Чисельне моделювання AISF зосереджено на прогнозуванні сили формування, напружень і деформацій під час процесу деформації. Крім того, він був використаний для розуміння механізму деформації процесу та оцінки взаємозв'язку між параметрами процесу та характеристиками якості. виготовлених деталей. Однак моделювання процесу AISF є витратним з точки зору обчислень. Приростний характер процесу вимагає дуже тонкої сітки та

тривалого часу моделювання. Тому в літературі багато досліджень були зосереджені на скороченні часу моделювання в AISF без шкоди для точності. При моделюванні AISF використовувалися явні та неявні коди. [50]. У явному коді рішення на новому часовому кроці залежить від інформації, отриманої на попередньому часовому етапі. Тому слід використовувати дуже невелике збільшення часу. У неявному коді рішення на новому кроці часу залежить від інформації на цьому етапі. Тому розв'язок отримують шляхом одночасного розв'язування набору рівнянь. Bambach та ін [21, 28], Ambrogio та інші [27, 40, 51], Hirt та інші [50], Qin та інші [53], He та інші [54] та Decultot та інші [55] використовували явні код для моделювання частин, утворених AISF (таких як простий конус і усічена піраміда), і вони виявили, що явні моделі, що використовують масштабування маси або швидкості, є менш дорогими в обчислювальному відношенні порівняно з неявним вирішувачем [1]. Однак явний метод є кращим при використанні простого шляху інструмента (за умови, що приріст часу досить малий). Збільшення масового масштабування або масштабування швидкості інструменту може призвести до чисельних проблем. Тому кінетичну та внутрішню енергію слід перевірити, як повідомляють Ambrogio та інші [16]. Бамбах та інші [56] провели порівняльне дослідження неявних і явних методів для оцінки їх впливу на прогнозовану геометрію усіченого конуса, зробленого SPIF. Використовується одна неявна і дві явні моделі FE, M1 і M2. Explicit-M1 було змодельовано з використанням більш високого масштабування маси, ніж explicit-M2. Максимальна відстань d(max) та середня відстань d(av) між експериментальним профілем та профілем FE використовували як міру якості прогнозованої геометрії. Результати показали, що неявний метод дає більш точні результати порівняно з явним методом, хоча він вимагає відносно великої кількості приростів. Масштабування великої маси, що використовується в explicitM1, зменшить час моделювання, однак, це збільшить відхилення від експериментальних даних, як показано в Табл 1.1.

Метод	**Крок часу**	**d(max) мм**	**ЦП час, год**
Неявний	4.0E-3	0,59	7,32
Явний M1	1.0E-4	1,19	0,58
Явний M2	1.0E-5	1,13	3,1
Табл 1.1: Ефективність неявного та явного аналізу FE [127]			

Метод Часовий крок d(max), мм d(av), мм час ЦП, год

Неявні 4,0E-3 1,09 0,59 7,32

Явний-M1 1,0E-4 1,82 1,19 0,58

Явний-M2 1.0E-5 1.67 1.13 3.1

Явний вирішувач показав погану стабільність і точність прогнозування, коли він використовується для прогнозування товщини листа в SPIF, як повідомляють Ambrogio et al [27] та Не та інші [54]. Вони порівняли явний і неявний вирішувач у SPIF і повідомили, що помилка передбачення в явному вирішувачі вища, ніж у явному. Погана точність прогнозування стає більш значною, коли використовується складний шлях інструменту, як повідомляють Bambach та інші [57].

Час моделювання неявного аналізу можна скоротити, використовуючи стратегію уточнення і вирівнювання (RD) або комбінований метод Ньютона-Рафсона та конденсованого лінеаризованого еластичного (CNRCLE), як використовується Хадушом і Бугаардом [58, 59]. У FE моделюванні AISF використовуються як оболонка, так і тверді елементи. Роберт та інші [30] представили визначення еластично-пластичного матеріалу, реалізованого через підпрограму користувача VUMAT з елементами оболонки, щоб мінімізувати час моделювання FE за допомогою Abaqus/Explicit. Метою було реалізувати теорію пластичності приростної деформації. Вони дійшли висновку, що такий підхід може підвищити ефективність процесу моделювання та скоротити час обчислень. Ласунон і Найт [60] провели чисельне дослідження AISF, тобто SPIF і TPIF. У своєму дослідженні скінченноелементні моделі використовували елементи оболонки для

моделювання та вивчення впливу змінних процесів на сформовані профілі та зміни товщини для обох процесів.

З огляду на літературу можна зробити висновок що, багато спроб за допомогою чисельного моделювання зрозуміти поведінку деформації в AISF. Однак скінченно-елементне моделювання є дороговартісним з точки зору обчислень. Явний вирішувач і елементи оболонки часто використовуються для подолання цієї проблеми. Однак вони продемонстрували низьку точність прогнозування кінцевої геометрії, зокрема, коли використовується складний шлях інструменту. Тому для моделювання процесів AISF більше підходять комплексні скінченноелементні моделі, що використовують тверді елементи та неявні. Ці моделі повинні забезпечувати краще розуміння процесу за розумний час без шкоди для точності.

1.3.6 Результати аналізу AISF

У попередньому розділі узагальнено різні підходи (експериментальний, чисельний та аналітичний), що використовуються для дослідження асиметричних інкрементних процесів формування листів.

У цьому розділі буде наведено детальну інформацію про результати, отримані від використання цих підходів. В основному це буде зосереджено на використаних матеріалах, обробці поверхні, зусиллях інструменту, механіці деформації, межі формування та геометричній точності.

1.3.6.1 Загальні матеріали

Невелика пластична зона та інкрементальний характер процесу сприяють підвищенню формуючості, полегшуючи деформацію матеріалів з низькою формованістю. Тому процеси AISF можна використовувати для формування широкого спектру матеріалів, включаючи метали та полімери. Однак пластичні матеріали, такі як алюміній і м’яка сталь, є більш поширеними в практиці AISF [3]. Хоча є кілька прикладів його використання в складніших матеріалах. Процеси AISF були успішно застосовані для формування латуні

[29], мідь [29, 62], титан [32, 62-64], золото [62], срібло [62] і платина [62]. Ландерт [65] показав застосовність AISF до композиційних матеріалів для деформації композиту з металевою матрицею [1]. Деякі неметалічні матеріали були розглянуті, наприклад, Le та інші [66], які досліджували застосовність SPIF для деформації термопластичного матеріалу. Нещодавно Franzen et al [67] та Martins та інші [68] у 2009 році провели раннє дослідження SPIF полівінілхлориду та полімерів відповідно. Зазвичай товщина листа, що використовується в практиці AISF, становить менше 3 мм і не менше 0,4 мм, як повідомляють Allwood та інші [69]. Однак Танака та інші [70] розробили спеціально створену формуючу систему для формування мікроплівок (10-100 мкм). Деформація була успішно досягнута з використанням алюмінієвого листа товщиною 5 мм, як повідомляє Jyllilä [71]. Однак це досить товста і не є загальноприйнятою товщиною листа для практики AISF.

1.3.6.2 Обробка поверхні

Обробку поверхні деталей, виготовлених AISF, можна охарактеризувати як смугасту поверхню, тобто великомасштабну хвилястість [42]. Це не проблема і залежить від застосування, для якого виготовлена деталь. Якщо обробка поверхні є дуже важливою характеристикою в кінцевій частині, то AISF не буде належним рішенням, і інші підходи, такі як глибока витяжка, забезпечать кращі результати. Було зроблено багато спроб підвищити чистоту поверхні деталей, виготовлених AISF [1]. До них належать; використання скарифікованого шару дешевого матеріалу між інструментом і верхньою поверхнею листа; нанесення тонкого шару покриття, щоб приховати візерунки інструменту на поверхні аркуша. В інших випадках обробка поверхні, отримана від AISF, може розглядатися як перевага, наприклад, світлий відтінок, виготовлений в Кембриджському університеті, де шорсткість поверхні має додаткову цінність. Шорсткість поверхні, отриману AISF для цього застосування, неможливо було б отримати за допомогою пресування (див. Рис 1.8) [1].

Рис 1.8: Приклад деталі, виготовленої AISF у Кембриджському університеті, де шорстка поверхня має додаткову цінність [1].

Leach [14] та Junk [72] виявили, що знижуючий розмір має значний вплив на шорсткість поверхні. Це узгоджується з результатами, опублікованими Хаганом і Джесвітом [42], які виявили, що збільшення розміру кроку вниз призводить до збільшення шорсткості поверхні. Було виявлено, що змащення покращує обробку поверхні, як повідомляють Кім і Парк [35]. Junk та інші [72] повідомили про значний зв'язок між діаметром інструменту та шорсткістю поверхні в TPIF. Нещодавно Wang та інші у 2010 році [73] розробили установку інструменту з подвійною головкою, яка показала допустиме поліпшення шорсткості поверхні усіченої піраміди, виготовленої SPIF.

1.3.6.3 Зусилля інструменту

Сила інструменту в AISF є важливою темою, яку вивчали багато досліджень. Експериментальні підходи були використані для вимірювання тенденції сил інструменту протягом усього процесу за допомогою простих геометрій [36-39]. Чисельне моделювання було використано, щоб зрозуміти, як формується сила в AISF і як на неї впливають робочі змінні [74-78].

Література AISF показує, що зазвичай досліджуються три перпендикулярні компоненти сили, тобто осьова складова сили, і дві радіальні компоненти сили (один у напрямку руху інструменту, а другий — перпендикулярно до руху

інструменту). Duflou та інші у 2005 р. [36,37] виміряв сили для піраміди з квадратом і зрізаного конуса і виявив, що сила в SPIF збільшується з кожним кроком вниз, перш ніж досягне максимального стабільного значення. Про подібне спостереження також повідомили Jeswiet et al [39] для TPIF. Осьова сила є найбільшою складовою сили порівняно з двома іншими компонентами сили [1]. Осьова сила приблизно вдвічі перевищує компонент сили перпендикулярного інструменту, що спостерігається Bologa та інші [38] та Jeswiet та інші[39].

Duflou та співавтори [36,67] досліджували вплив робочих змінних на формуючі сили в SPIF. Результати показали, що розмір пониження, радіус інструменту та кут стінки мають лінійні та квадратичні співвідношення з силою формування. Повідомлялося, що радіус інструменту та кут стінки мають значний вплив на формуючу силу порівняно з розміром знищення. Це означає, що хоча збільшення розміру кроку вниз не вплине на формуючу силу, воно матиме згубний вплив на обробку поверхні [1].

Bologa та співавтори у 2005 році [38] провели подібне дослідження, щоб побачити вплив параметрів процесу на три сили формування в SPIF. Метою було розробити рівняння, яке зв’язує зусилля інструменту з розміром кроку вниз, радіусом інструменту та товщиною листа. Було зроблено висновок, що при збільшенні будь-якого з цих параметрів збільшення трьох компонентів сили, проте товщина листа має найбільший вплив. Duflou та інші у 2007 році [76] провели дуже подібне дослідження і повідомили про дуже схожі результати. Durante та інші у 2009 році [78] дослідили сили в SPIF і виявили, що зменшення піків формування сили спостерігається, коли інструмент обертається. Нещодавно Katajarinne та інші у 2010 р. [79] повідомили, що використання відповідного мастила та покриття інструменту призводить до зменшення сил формування.

1.3.6.4 Механіка деформації

Складний характер деформації є результатом багатьох факторів, таких як місце контакту, що постійно змінюється, велика пластична деформація та складна кінематика інструменту [II]. Чисельні методи, наприклад FE-моделювання, дозволяють детально вивчити цю поведінку, а експериментальні спостереження явищ наскрізної товщини надзвичайно складні. Експериментальні підходи та методи FE використовувалися для вимірювання або прогнозування деформацій і переміщень з метою оцінки механіки деформації. Хоча попередні дослідження надали дуже важливу інформацію щодо механіки деформації SPIF, деякі результати є суперечливими та обмеженими в деталях.

Попередні дослідження з використанням експериментальних та модельних підходів виявили одновісні поверхневі деформації під час процесу деформації як SPIF, так і TPIF. Це означає, що розтягнення та стоншування є поширеними видами деформації. Ісекі в 1993 році [80] був першим, хто спостерігав і повідомив про цей механізм деформації. Пізніше подібні спостереження були передбачені за допомогою чисельного моделювання Шимом і Парком у 2001 р. [34], Бамбахом та ін. у 2003 р. [21] та Хіртом та ін. у 2003 р. [81] (див. Рис 1.9). Парк і Кім [82] передбачили подібний результат для деталей, виготовлених за допомогою SPIF і TPIF. Про майже односпрямовану деформацію також повідомляли Фратіні та інші у 2004 р. [29] для зрізаного конуса, виготовленого з використанням AISF з різних металів, і Джесвіт і Янг у 2005 р. [83] для різних форм, утворених SPIF.

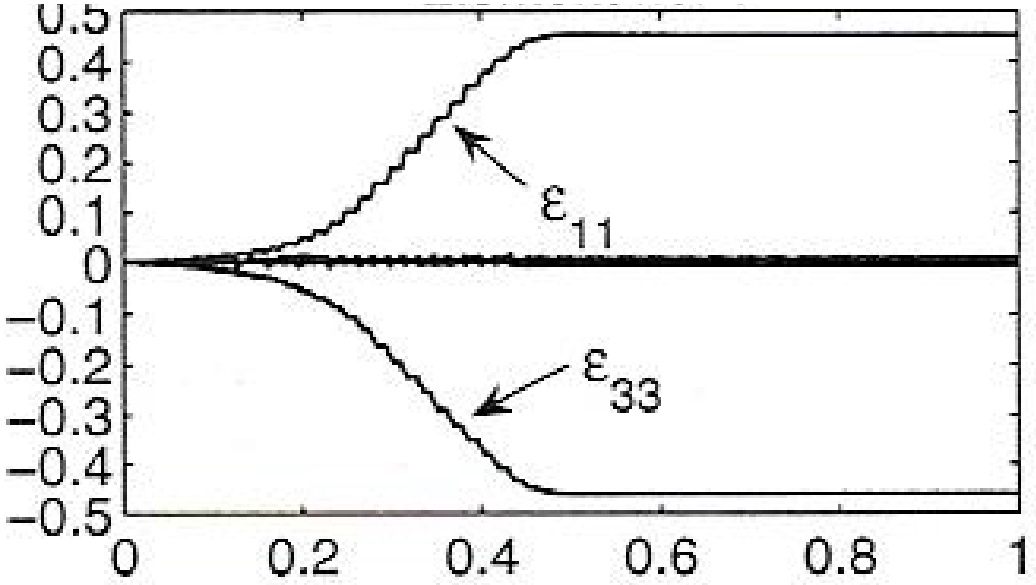


Рис 1.9: Історія деформацій для елемента, деформованого SPIF, як передбачено за допомогою моделювання FE Bambach та інших [21]: ε11 і ε33 представляють розтягнення та стоншення аркуша відповідно

Більшість попередніх досліджень дійшли висновку, що розтягування та стоншування є найбільш поширеними режимами деформації в SPIF та TPIF. Однак інші дослідження показали, що двовісне поверхневе деформування також може бути досягнуто. Шим і Парк [34] виявили двовісну деформацію поверхні в деяких областях деформованих частин. Про подібні спостереження також повідомили Filice та ін. [19]. Двоосьова поверхнева деформація стає більш значною при використанні траєкторії інструмента з малою кривизною [1]. Ідея двовісної поверхневої деформації має значний вплив на межу формування і може пояснити вищу формуемість, пов’язану з процесами AISF, як буде показано в наступному розділі.

Виходячи з наведеного вище результату, можна зробити висновок, що одновісна поверхнева деформація (розтягування поверхні листа та витончення товщини листа) є основним режимом деформації в AISF. Це випливає з наступного рівняння ($tf = t0 \sin \alpha$), де (t0) — початкова товщина листа; (tf) - кінцева товщина листа; (α) – кут стінки. В основному це закон синуса, який спочатку використовувався для прогнозування товщини листа під час зсувного прядіння. Було проведено багато досліджень, щоб перевірити

застосовність цього рівняння для прогнозування кінцевої товщини листа в процесах AISF. Дуже гарне прогнозування кінцевої товщини листа з різними кутами стінки, утвореними TPIF, було першим повідомлено

Мацубара у 1994 році [84]. Jeswiet у 2004 році [26] провів комплексне дослідження SPIF, щоб дослідити точність знакового закону. Дослідження проводилося на деталях з різними кутами, що показало хороший прогноз товщини стінки. Аналогічні результати повідомили Ambrogio та ін. у 2005 р. [27] для конусів, утворених SPIF.

У літературі механізм деформації AISF пов'язують з механізмом, отриманим при зсувному прядінні, розробленим Авіцуром на якому базується виведення закону синуса. Механізм деформації зсувного прядіння вважається чистим зсувом, який вважалося однаковим у SPIF та TPIF. Цей режим деформації був використаний для пояснення механізму деформації в AISF Кімом і Янгом у 2000 році. [25] при експериментальному дослідженні формуемості SPIF, у дослідженнях SPIF Young and Jeswiet у 2004 р. [26], у дослідженнях формування інкрементальних листів Shankar et al у 2005 р. [85] та в експериментальних та чисельних дослідженнях на SPIF та TPIF Hirt et al [63, 86]. Allwood у 2007 році [47] спостерігали та повідомляли про суперечливі результати та показали шляхом експериментального вимірювання, що значна деформація зсуву виникає в площині, нормальній до поверхні листа та паралельній напрямку руху інструменту; також Джексон і Олвуд у 2009 році [87] виміряли високі деформації зсуву в площині, паралельній переміщенню інструменту, і нижчі плями зсуву в площині, перпендикулярній переміщенню інструменту для SPIF, як показано на рис 1.10. Бамбах та інші [21] передбачили, використовуючи 3D модель FE, що, хоча розтягування та витончення є значними, усі компоненти зсуву є незначними, як показано вище на рис 1.9. Ці результати не суперечать результатам, повідомленим Allwood та ін. [47], оскільки кожен автор використовував різні шляхи інструментів. Траекторію інструменту реалізувати за Бамбах та інші [21] змінюють свій

напрямок кожного нового контуру, тоді як траєкторія інструменту, яку використовують Allwood та інші, є односпрямованою [47], як повідомляє Джексон [1].

Огляд літератури, представлений вище, надає хорошу інформацію про деформаційну поведінку AISF. Однак механізм деформації в SPIF і TPIF не зрозумілий. Результати, опубліковані в літературі, суперечать тому, де деформацію в AISF іноді описували як чистий зсув, а інші показали, що існує зсув по товщині. Тому потрібні точні моделі КЕ з великою кількістю елементів по товщині, щоб надати чітку інформацію про механізми деформації і, зокрема, деформацію зсуву наскрізної товщини.

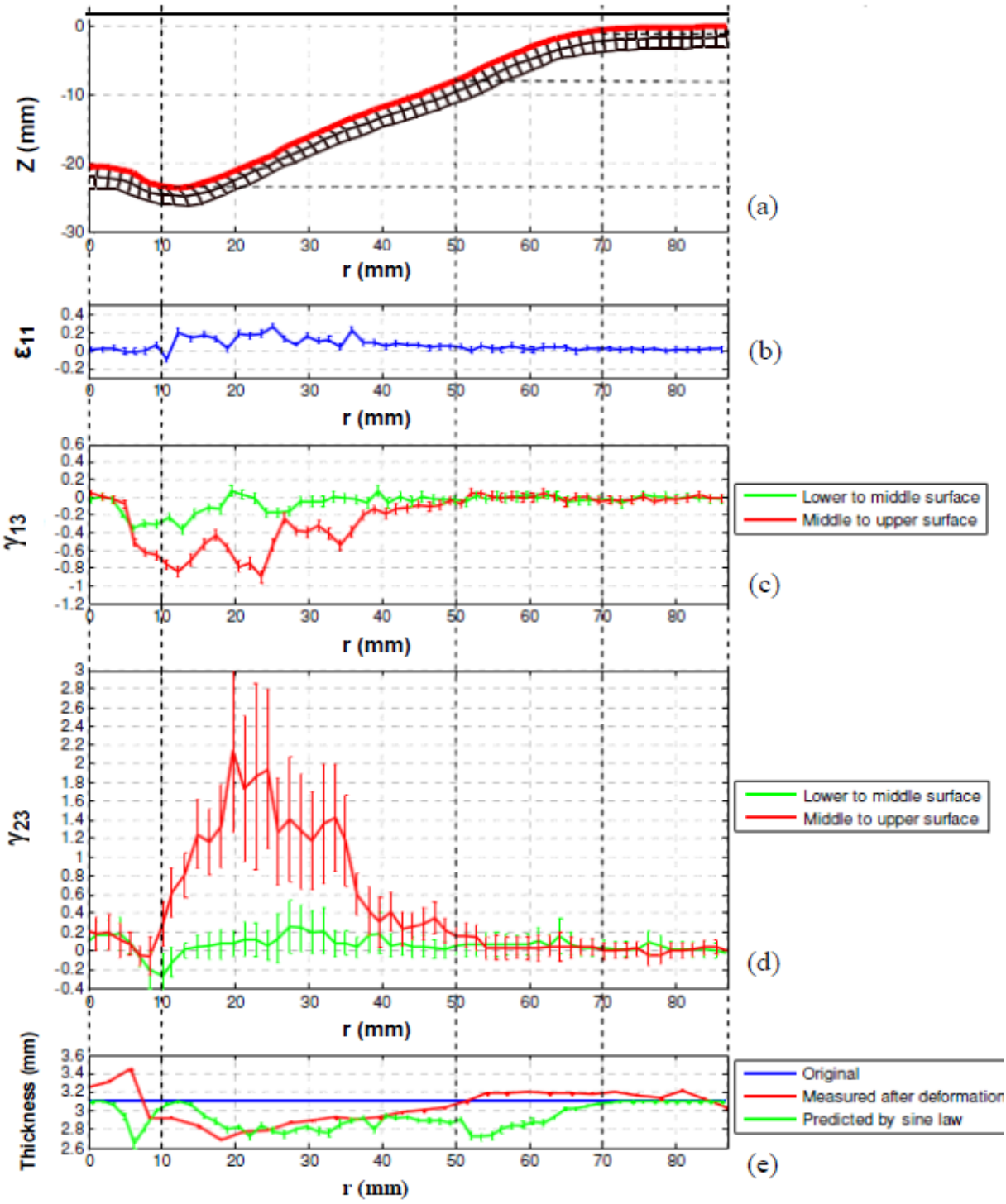


Рис 1.10: Вимірювання пластини, утвореної SPIF, як експериментально виміряли Джексон і Олвуд [87]: (a) геометрія, (b) розтягнення листа ε11, (c) компонент зсуву γ13, (d) компонент зсуву γ23 , (e) розподіл товщини [1].

1.3.6.5 Ліміт формування

Встановлено, що межі формування в AISF вищі, ніж у традиційних

процесах формування, таких як волочіння. Гранична діаграма формування є поширеним методом, при якому найбільша деформація (горизонтальна вісь) і найменша деформація (вертикальна вісь) відкладаються при руйнуванні (як можна ближче до утворення тріщини). Hussian та ін. [64, 88-91] запропонували метод для перевірки формуваності з точки зору максимально досяжного кута стінки при руйнуванні шляхом виготовлення деталей із змінним кутом стінки. Такий підхід допоміг звести до мінімуму необхідну кількість експериментів для визначення межі формування листа. Зроблено висновок, що межа AISF має один негативний нахил (див Рис 1.11) [19, 34, 80].

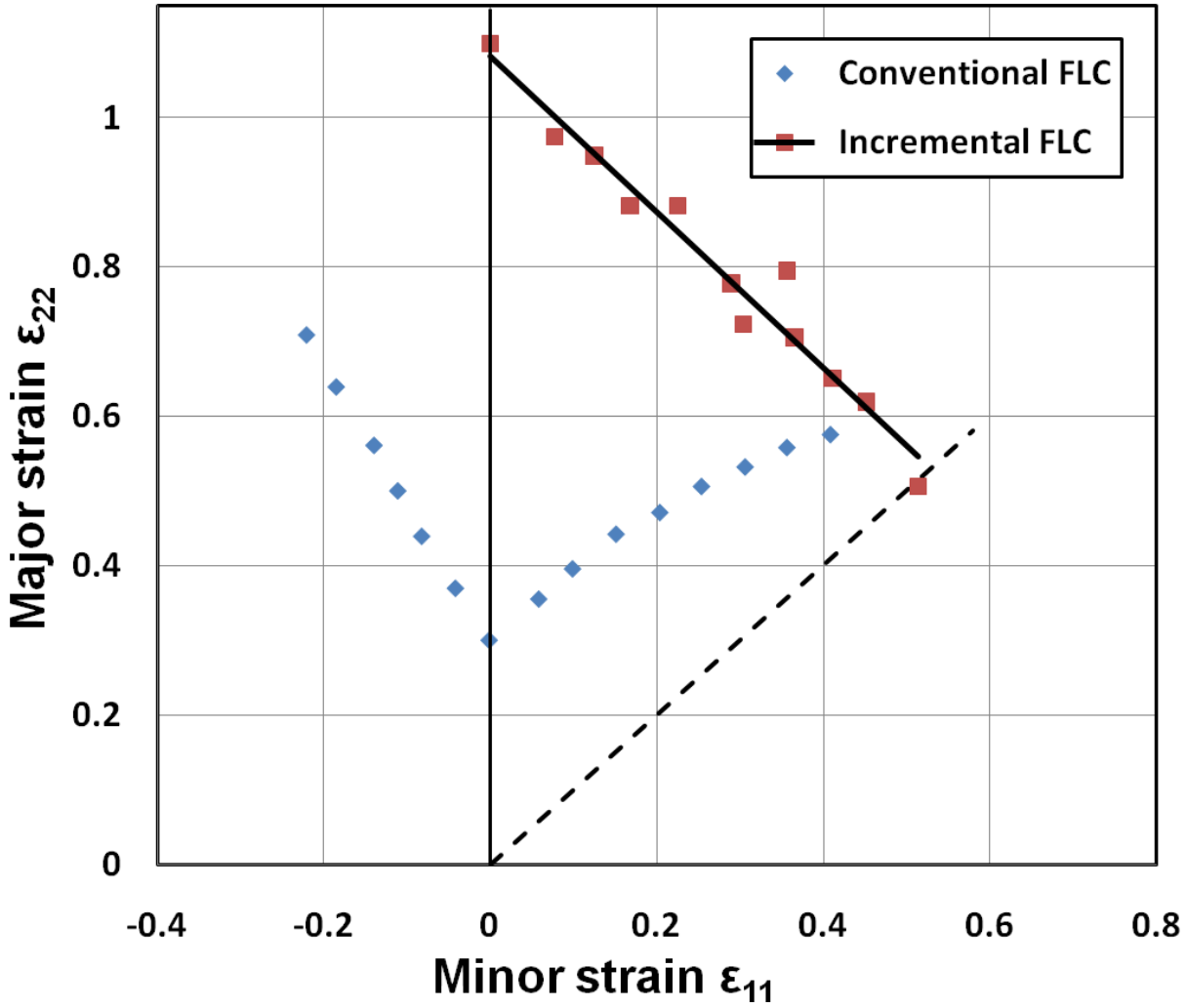


Рис 1.11: Експериментальні FLC AA1050, отримані в результаті традиційного тесту та тесту SPIF [19].

Існує ряд параметрів процесу, які мають сильний вплив на межу формування

SPIF і TPIF, таких як властивості листового матеріалу та мастило. Бамбах та інші [21] розробили скінченноелементні моделі для прогнозування деформацій в AISF і повідомили, що ізотропні властивості матеріалу можна використовувати без впливу на точність прогнозу. Фратіні та співавтори [29] повідомили, що механічні властивості з точки зору деформаційного зміцнення продемонстрували значний вплив формуемості, коли більш високий коефіцієнт деформаційного зміцнення збігався з найбільшою формованістю матеріалу. Амброджіо та інші [27], Кітазава [32], Кім і Парк [35], Хірт та інші [63] та Хуссейн та інші [92,93] показали, що формуемість збільшується в результаті зменшення кроку вниз. Зі збільшенням розміру знизу лист зазнає більш важких умов деформації.

Кім і Парк [35] виявили, що більш високого рівня деформації можна досягти, якщо не використовується змащення та інструмент з наконечником, що накатується. Park та ін. [82], Hirt та ін. [63], Hussain та ін. [92,93] та Ham and Jeswiet [94,95] виявили, що зменшення діаметра інструменту призводить до збільшення межі формування. Jeswiet та ін. [96] виявили, що більші кути стінок можна досягти за рахунок збільшення товщини листа. Silva та ін. [44,45] також повідомили, що збільшення товщини листа затримує початок нестабільності та руйнування.

Межі формування AISF були порівняні із звичайними випробуваннями на межі формування, вперше проведеними Ісекі в 1993 [80], Kitazawa [32], Shim and Park [34], Hirt та ін. [63] та пізніше Lamminen у 2005 [13], які всі помітили, що процеси AISF мають вищу формуемість. Емменс та інші [97] досліджували різні причини вищої формуючості процесів AISF. Бамбах та співавтори у 2003 році[21] повідомили, що однією з причин підвищення формуючості AISF може бути гідростатичний стрес, пов'язаний з процесом. Про той самий висновок пізніше повідомили Мартінс та інші у 2008 році [43]. Мікарі у 2005 році [98] вказав, що низькі головні напруження в області деформації можуть бути причиною високої формуючості процесів AISF, що узгоджується з

результатами, опублікованими Ambrogio та ін. [99]. Eyckens та ін. у 2007 році [61] показали циклічні/зубчасті шляхи деформації вздовж товщини листа через те, що лист багаторазово згинається в напрямку руху інструменту, і вони прийшли до висновку, що циклічні ефекти можуть покращити формувість. Емменс та інші у 2008 році [100] повідомили, що згинання під розтягуванням може діяти як механізм, що забезпечує велике рівномірне деформування при поступовому формуванні листа. Нещодавно Allwood та ін. у 2009 році [101] запропонували модель, яка показала, що вищої формувості можна досягти за наявності зсуву по товщині. Це узгоджується із спостереженням, яке повідомляє Allwood та ін [47].

На основі огляду літератури можна зробити висновок, що традиційні методики, що використовуються в практиці формування металу для вимірювання межі формування, не можуть бути застосовані безпосередньо до процесів AISF. Про це також повідомили Allwood та інші [47], які підкреслили, що методи, які використовуються для оцінки меж формування звичайних процесів формування, не повинні використовуватися в AISF. Крім того, Ландерт [65], Оллвуд та інші [47] та Бамбах та інші [102] прийшли до висновку, що традиційна діаграма меж формування не є хорошим підходом для представлення формуваності в AISF. Більш недавнє дослідження Емменса [103] показало, що наявна деформація наскрізної товщини робить недійсним розгляд горизонтальних і вертикальних деформацій у межі формування як основних деформацій.

З літератури, розглянутої вище, можна зробити висновок, що немає чітких причин для більш високої формуючості, пов’язаної з процесами AISF. Щоб пояснити цей момент, слід провести більш комплексні дослідження. Це можна зробити шляхом розробки більш потужних чисельних моделей.

1.3.6.6 Геометрична та розмірна точність

Одним з найважливіших аспектів для промислових процесів є геометрична точність сформованого виробу. Однак безштамповий характер

процесу ускладнює досягнення високого рівня точності, а типові геометричні похибки виникають через небажане жорстке переміщення ділянок листа, пружну пружину та витончення листа [37, 61]. Fiorentino [104] повідомили, що, хоча формуемість SPIF вища, ніж у TPIF, низька геометрична точність все ще залишається проблемою у SPIF. Мікарі та ін [405] визначили геометричну похибку в SPIF як відстань між отриманим профілем та ідеальним. Три типові форми геометричної похибки, які можна виявити на кінцевому виробі, пов'язані з вигином листа в області початкового контакту інструменту, підйомом листа біля основи листа так, що кінцева глибина була меншою за проектну, тобто пружиною, і ефект подушки в центрі кінцевого продукту. Основним джерелом неточності процесу є пружиніння, що виникає під час та після операції формування.

Це пружиніння може складатися з локального пружиніння (виникає під час деформації), глобального пружиніння (після розвантаження та зняття затиску) і пружинного зворотного ходу через обрізку (якщо вона виконана) [60]. Ліч та інші у 2001 році [14] повідомили, що геометрична точність ±2 мм може бути досягнута у SPIF та TPIF. Duflou та ін. у 2005 році [18] виготовили складну деталь за допомогою SPIF, і геометрична похибка виявилася меншою за 6 мм. Hirt та співавтори [63] виготовили складну деталь за допомогою двоточкового інкрементного формування, а похибка вимірювання була менше 3 мм.

Точність процесів AISF була покращена за допомогою низки методів. Сюди входять корекція траєкторії інструменту, оптимізація траєкторії інструменту, багатопрохідне формування, модифікації конструкції процесу та застосування динамічного локального нагрівання. Алгоритм корекції траєкторії інструменту був використаний Hirt та ін. [15,106] та Ambrogio та ін. [11,30]. Раух та інші [106] запропонували онлайн-систему моніторингу в SPIF, яка автоматично адаптує траєкторію інструменту на основі онлайн-вимірювань тенденцій сили, щоб уникнути збою. Інший метод був використаний Filice та ін [107], де результати формування зусиль використовуються для корекції

параметрів процесу, щоб запобігти руйнуванню листа. Траєкторію інструменту можна оптимізувати, отримавши траєкторію інструменту, яка мінімізує геометричні похибки. Bambach та інші [28] використовували шлях, у якому інструмент чергується за годинниковою стрілкою та проти годинникової стрілки. Аттанасіо та інші [109,110] використовували шлях інструменту зі змінним розміром кроку вниз, тобто постійною висотою гребінця.

Використовували Bambach та ін [111]. те, що вони назвали «стратегією конічної траєкторії інструменту», в якій рух інструменту починається з центру деталі і відкривається зі збільшенням глибини, поки не буде досягнутий потрібний діаметр на максимальній глибині. Використання траєкторії інструменту, при якій на першому етапі формуючий інструмент має вертикальне переміщення, а потім траєкторію, яка намагається охопити сформовану поверхню, запропонували Олексік та ін. [112]. Остаточна деформація може бути досягнута шляхом використання ряду етапів формування, щоб мінімізувати формуючу силу та покращити геометричну точність, як використовували Duflou та ін. [18], Kim and Yang [25], Young and Jeswiet [26], Hirt та ін. [106], Duflou та ін. [113],

Verbert та ін. [114], Skjoedt та ін. [115] та Bambach [116]. Franzen та ін. [117] описали використання додаткового кінематичного інструменту, який переміщується по нижній поверхні листа синхронізовано з формуючим інструментом для підвищення геометричної точності [II]. Інший підхід, реалізований шляхом введення динамічного локалізованого тепла через лазерний промінь або систему електричного нагріву, призвів до зниження рівня напруги та ефекту пружини, що покращило точність, як продемонстрували Duflou та ін. [118,119] , Hino та ін. [120] та Ghiotti and Bruschi [121]. Прості методи, що використовуються для підвищення точності, включають збільшення кута стінки перших кількох контурів для зменшення вигину в недеформованій зоні поруч з фланцем листа, Ambrogio та ін. [16],

використання статистичного аналізу для отримання емпіричних моделей на основі параметри процесу, які можуть передбачити геометричні похибки та дозволити мінімізувати їх, Ambrogio та ін. [123], і застосування додаткової фази зворотного витягування після традиційної негативної деформації для мінімізації остаточного відхилення профілю, Filice та ін. [123], Ambrogio та ін [124].

Для підвищення геометричної та розмірної точності деталей, виготовлених за допомогою процесів AISF, було розроблено багато методів. Однак існує мотивація для розробки простих методів, які легко реалізувати та компенсувати пов'язані з ними помилки, щоб досягти кращої точності без додавання додаткових обмежень і впливу на безвихідний характер процесу.

1.4 Підсумок

Наочно продемонстровано потенціал формування металу, що включає інкрементальний підхід для виробництва широкого спектру виробленої продукції. Було проведено широкий спектр експериментальних, аналітичних та чисельних аналізів як на AISF, так і на його більш традиційному попереднику ISF, прядіння металу. З огляду на літературу було визначено ряд областей, які потребують подальшого дослідження.

Можна помітити, що формуюча сила при звичайному пряденні не була повністю зрозуміла для зсувного прядіння. Більшість попередніх досліджень прядіння були зосереджені на першому проході при звичайному пряденні, зрозуміло, що вплив наступних проходів роликів на механіку деформації потребує більшої уваги. Крім того, вплив використання різних роликових трас при наступних проходах на розподіл напружень і деформацій не був предметом великого дослідження. Такі статистичні методи, як планування експерименту (DOE) і дисперсійний дисперсійний аналіз, які можна використовувати для визначення найбільш критичних робочих параметрів, що впливають на характеристики якості кінцевого продукту та їх оптимальне налаштування, рідко використовуються в звичайній практиці прядіння, але

мають великі потенціал для такого типу процесу.

Хоча SPIF та інші процеси AISF мають потенційні сфери застосування, які включають створення прототипів в автомобільній промисловості та індивідуальні продукти в біомедичних додатках, використання процесів AISF у реальних промислових застосуваннях дуже обмежене. Крім того, існує багато прогалин у існуючих знаннях про процеси. Поведінка деформації в AISF дуже заплутана і потребує певної уваги. Вища формованість, пов'язана з процесами SPIF, є сферою, де даються різні ідеї та пояснення. Крім того, геометрична точність, отримана від SPIF, недостатня для деяких критичних додатків. Чисельні методи, що використовуються для підвищення точності в процесах AISF, є дорогими в обчисленні, їх реалізація є складною.

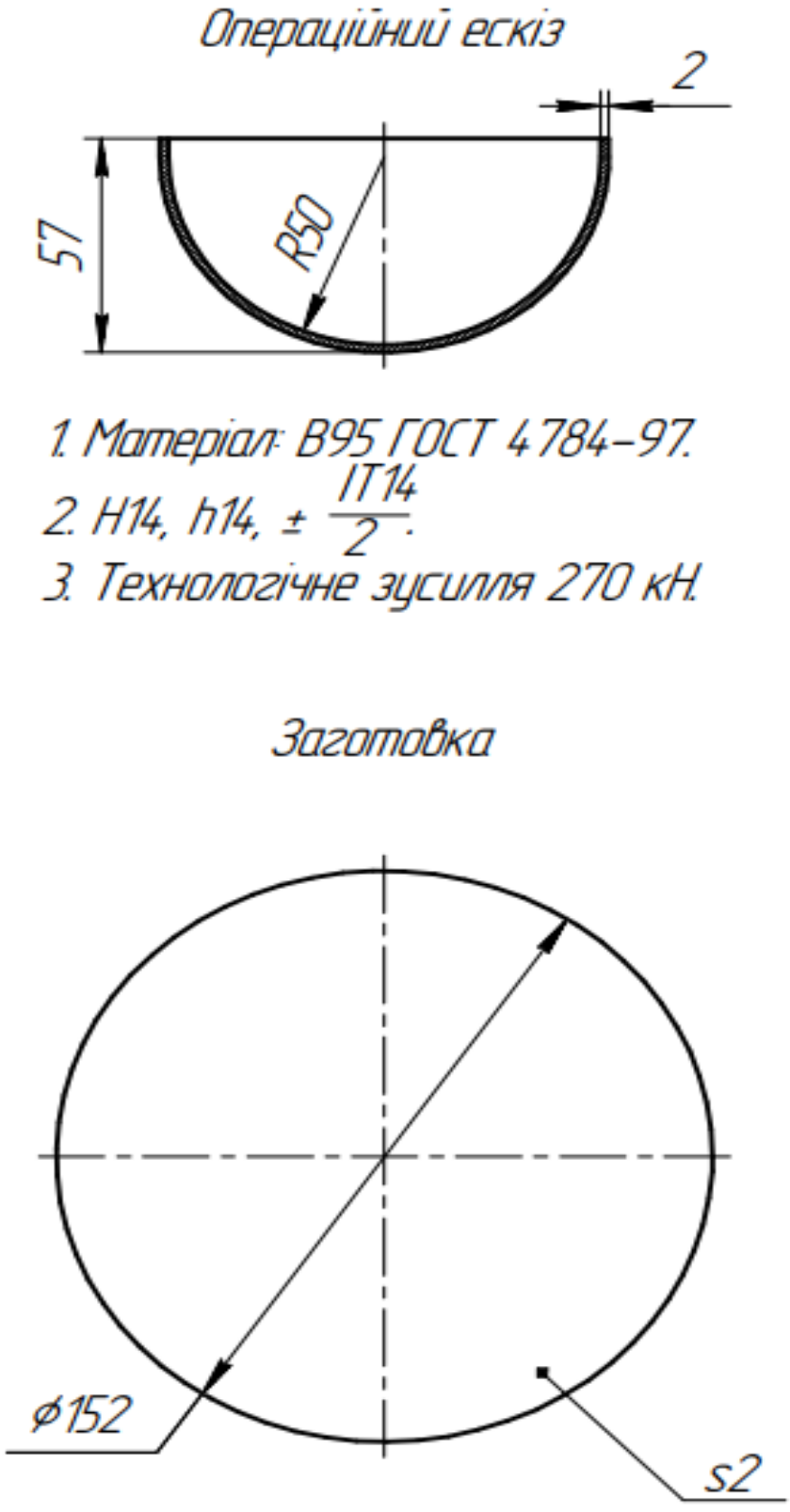


Рис 1.12 Операційний ескіз деталі що виготовляється

РОЗДІЛ 2

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ВИТЯГУВАННЯ ДЕТАЛІ «НАПІВСФЕРА» В ПРОГРАМНОМУ СЕРЕДОВИЩІ DEFORM

2.1. Моделювання процесу в середовищі DEFORM-2D.

Для перевірки можливості здійснення витягування деталі «Напівсфера» було проведено комп'ютерне чисельне моделювання. Вихідними даними для моделювання є розміри вихідної плоскої заготовки $D_{зг} = 158$ мм та розміри напівфабрикату після формоутворення. При моделюванні було задано наступні граничні умови:

- швидкість деформуючого інструменту $V_0 = 1$ мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0{,}1$;
- модель матеріалу – пластична;
- матеріал – ALUMINUM-7075 (аналог алюмінієвого сплав В95)

Спочатку було виконано моделювання процесу без притискача.

На рис. 2.1 показана розрахункова схема процесу витягування напівфабрикату деталі «Напівфера» без притискача. Вихідна заготовка 3 розташована на матриці 2. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 1.

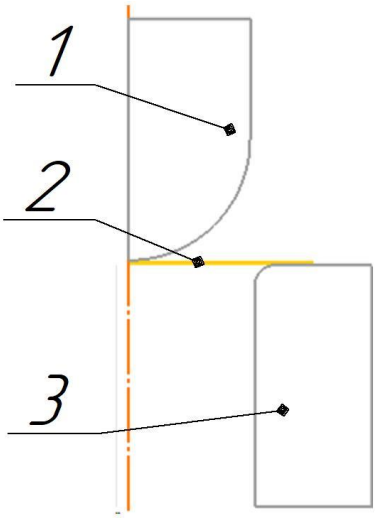
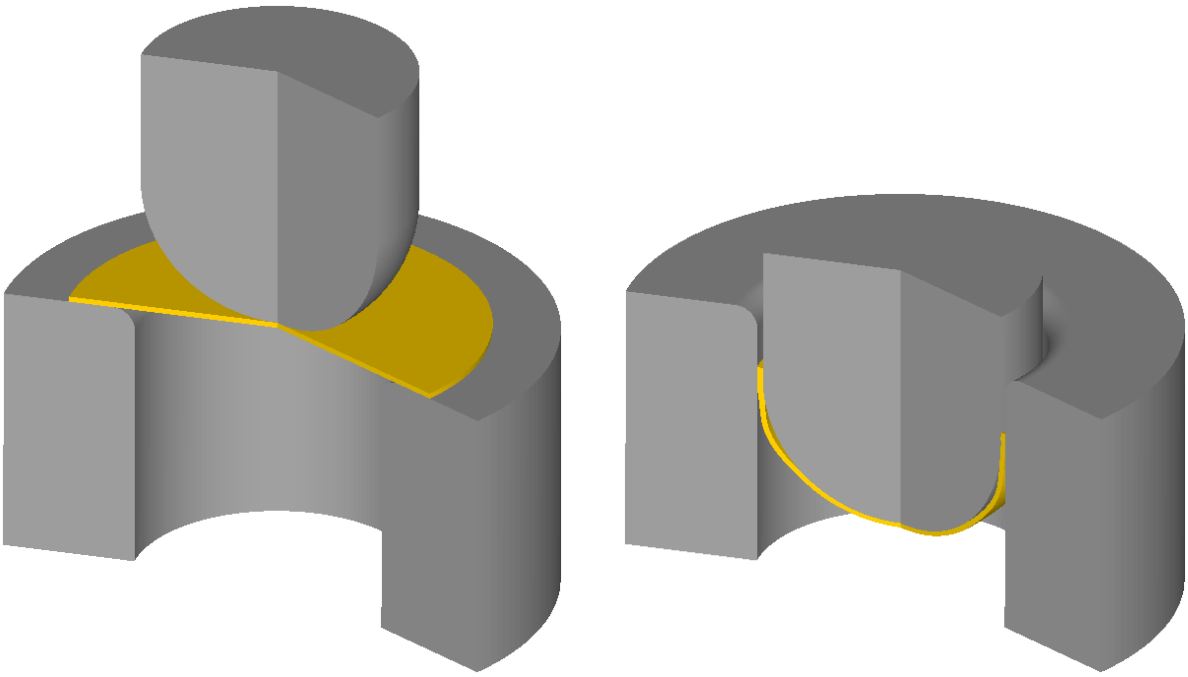


Рис 2.1 – Розрахункова схема витягування напівфабрикату деталі «Напівсфера» без притискача

Розрахункова схема витягування на різних етапах показана на рис. 2.2.



а б

Рис 2.2 – Розрахункова схема витягування без притискача напівфабрикату деталі «Напівсфера» на різних етапах:

а – на початку процесу; б – в кінці процесу

В результаті чисельного моделювання отримано графік залежності зусилля, що виникає на пуансоні від переміщення пуансону. Вказаний графік показаний на рис. 2.3. З нього видно, що максимальне зусилля витягування досягає 21 т (210 кН) в кінці процесу витягування.

Розподіл компонент напружень при витягуванні без притискача у здеформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування показано на рис. 2.4.

На рис. 2.4, а показано розподіл інтенсивності напружень у здеформованому напівфабрикаті, який знаходиться в межах $\sigma_i = 0 \div 630$ МПа. В донній частині значення становлять $\sigma_i = 158 \div 236$ МПа, найменші значення $\sigma_i = 0 \div 158$ МПа виникають в місці переходу з радіусної частини в циліндричну, найбільші $\sigma_i = 551 \div 630$ МПа – на торцях напівфабрикату.

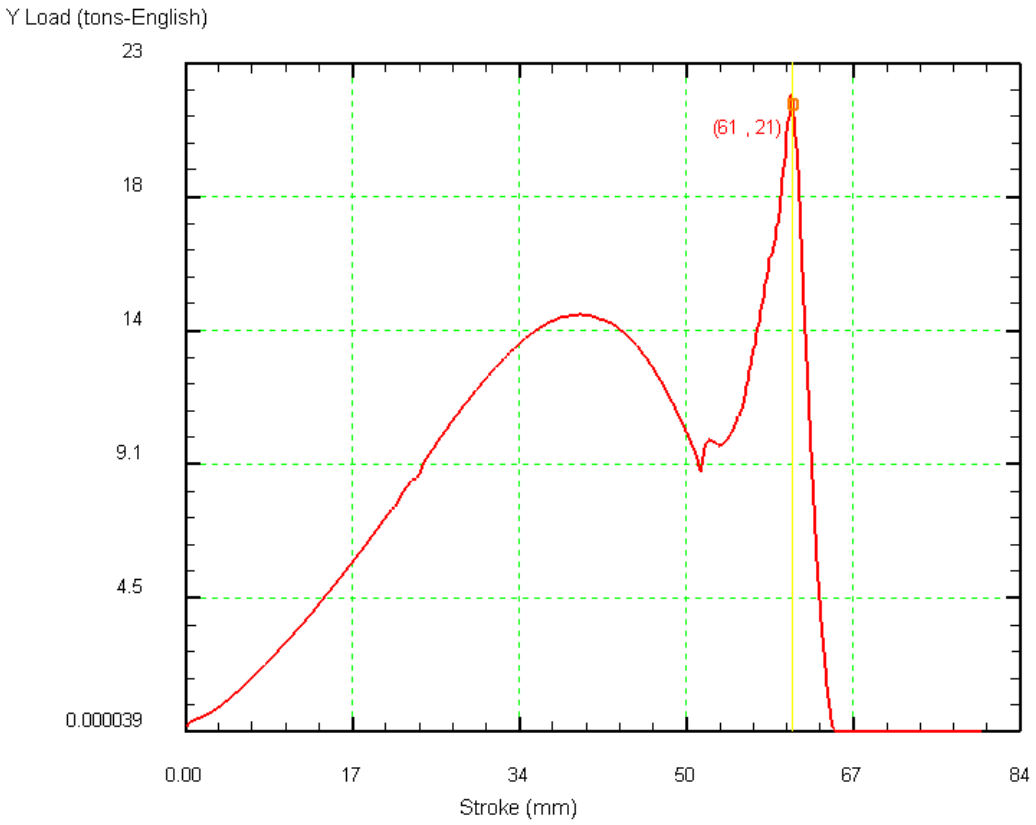
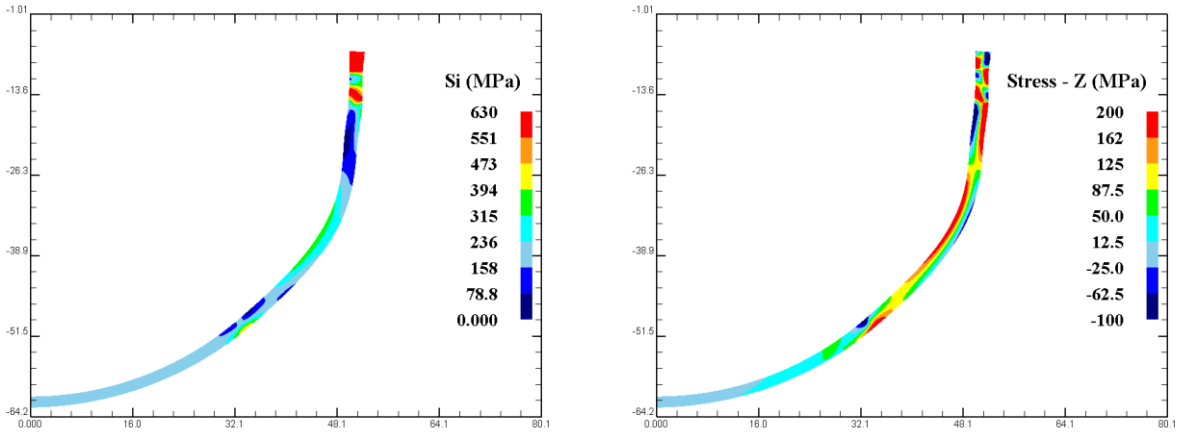


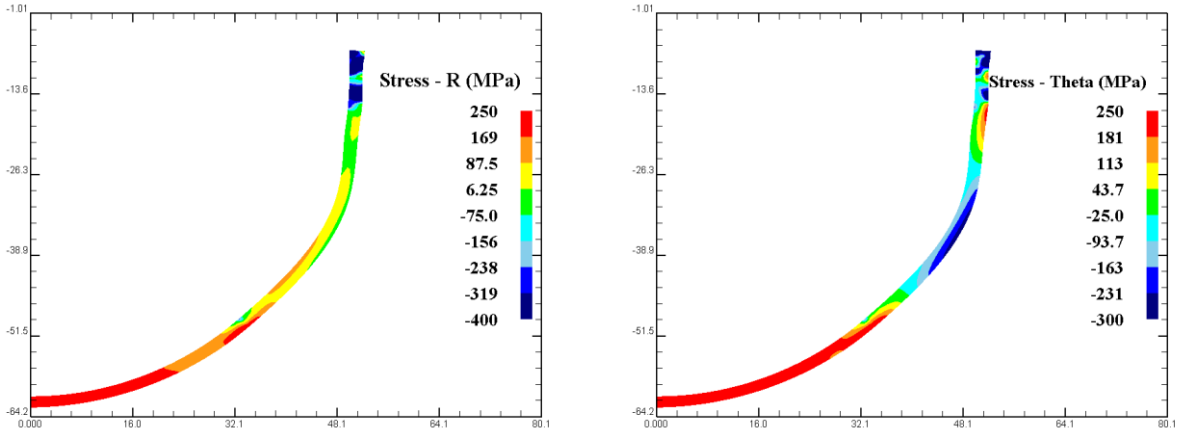
Рис 2.3 – Графік залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при витягуванні напівфабрикату деталі «Напівсфера» без притискача

Осьові напруження, які показано на рис. 2.4б, знаходяться в межах $\sigma_z = -100 \div 200$ МПа. Стискаючі осьові напруження $\sigma_z = -25 \div 0$ МПа виникають в донній частині виробу та $\sigma_z = -100 \div -62{,}5$ МПа у внутрішній частині стінки в місці переходу з радіусної в циліндричну частину. Найбільші значення розтягуючих осьових напружень $\sigma_z = 162 \div 200$ МПа виникають у зовнішній частині стінки в місці переходу з радіусної в циліндричну частину.

Радіальні напруження, що показані на рис. 2.4в, знаходяться в межах $\sigma_\rho = -400 \div 250$ МПа. У циліндричній частині виробу виникають стискаючі радіальні напруження $\sigma_\rho = -400 \div -238$ МПа. Найбільші розтягувальні радіальні напруження складають $\sigma_\rho = 169 \div 250$ МПа та зосереджені в донній частині виробу.



а) б)

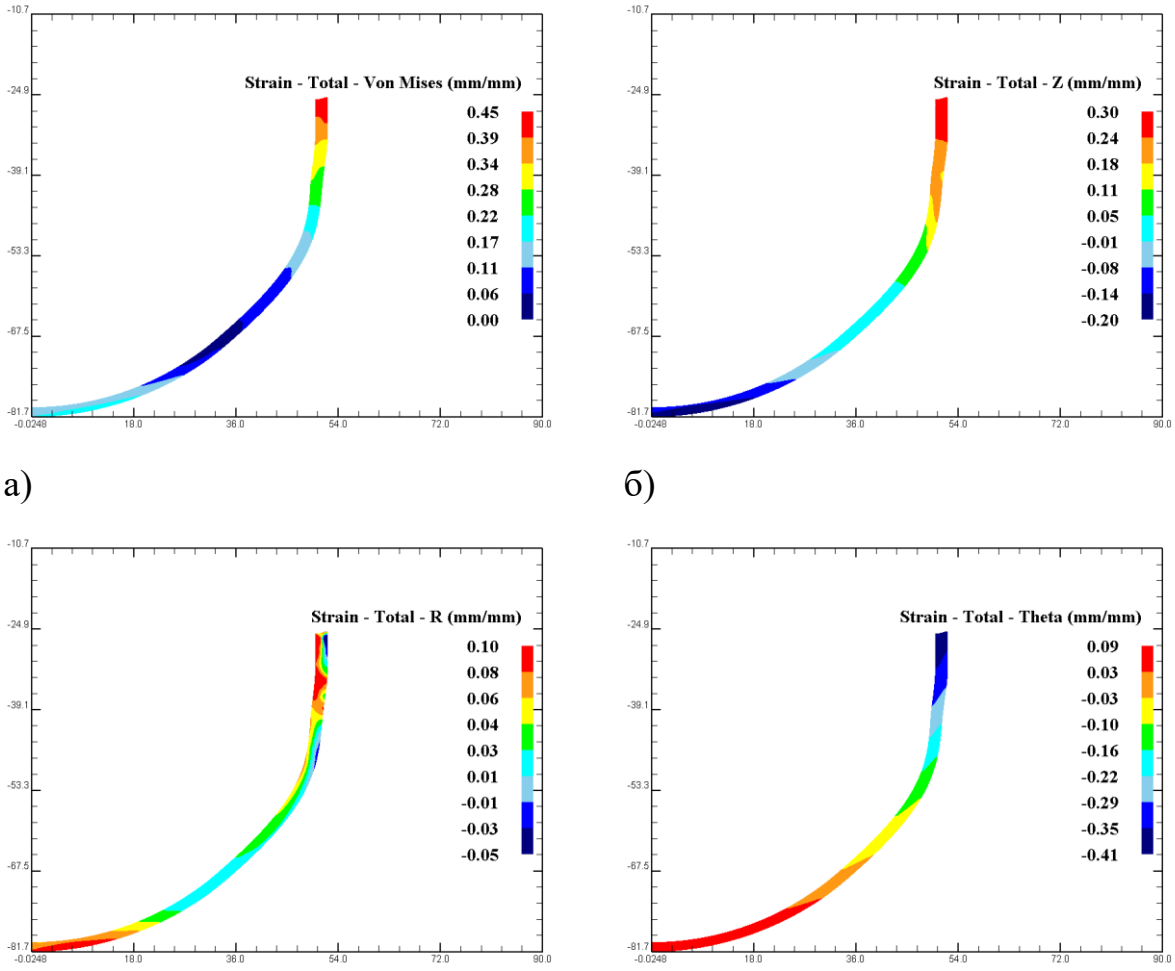


в) г)

Рис 2.4 – Розподіл компонент напружень при витягуванні без притискача при максимальному зусиллі: а – інтенсивність напружень σ_i ; б – осьові напруження σ_z; в – радіальні напруження σ_ρ; г – тангенціальні напруження σ_θ

Тангенціальні напруження показано на рис. 2.4г. Вони знаходяться в межах $\sigma_\theta = -300 \div 250$ МПа . Найбільші розтягувальні тангенціальні напруження виникають у донній частині виробу й становлять $\sigma_\theta = 181 \div 250$ МПа . У місці переходу радіусної частини стінки в циліндричну переважають стискаючі тангенціальні напруження.

На рис. 2.5 зображено розподіл компонент деформацій здеформованого напівфабрикату при витягуванні без притискача.



а) б)

в) г)

Рис 2.5 – Розподіл компонентів деформацій при витягуванні без притискача у здеформованому напівфабрикаті:

а – інтенсивність деформацій ε_i; б – осьові деформації ε_z; в – радіальні деформації ε_ρ; г – тангенціальні деформації ε_θ.

На рис. 2.5а показано інтенсивність деформацій, які знаходиться в межах $\varepsilon_i = 0{,}00 \div 0{,}45$. Найменші значення інтенсивності в радіусній частині виробу знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}00 \div 0{,}17$. Найбільші величини знаходяться в місці переходу радіусної частини стінки напівфабрикату в циліндричну, власне циліндричній та знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}22 \div 0{,}45$.

Осьові деформації, які показані на рис. 2.5б знаходяться в межах $\varepsilon_z = -0{,}20 \div 0{,}30$. По всій циліндричні стінці виробу та в місці її переходу у радіусну частину виникають розтягувальні осьові деформацій. В торцях їх значення досягають найбільшої величини $\varepsilon_z = 0{,}30$, далі поступово

зменшуючись до донної частини напівфабрикату. В донній частині виробу виникають стискаючі осьові деформації й досягають величини $\varepsilon_z = -0{,}20$.

Радіальні деформації показані на рис. 2.5в та знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = -0{,}05 \div 0{,}10$. Найбільшої величини розтягувальні радіальні деформації сягають у донній частині здеформованого напівфабрикату та внутрішній частині стінки в торці, де знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = 0{,}06 \div 0{,}10$. На зовнішній частині стінки в торці виникають стискаючі радіальні деформації, що знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = -0{,}05 \div -0{,}01$.

На рис. 2.5г показано тангенціальні деформації, які знаходяться в межах $\varepsilon_\theta = -0{,}41 \div 0{,}09$. Найбільшої величини стискаючі тангенціальні деформації $\varepsilon_\theta = -0{,}41$ сягають в торцях стінки виробу, далі поступово зменшуючись поступово переходячи в розтягувальні тангенціальні деформації в донній частині виробу до величини $\varepsilon_\theta = 0{,}09$.

Значення критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні без притискача показано на рис. 2.6. Його значення знаходяться в межах 0,00÷0,15. Найбільші значення критерію руйнування виникають в донній частині виробу та в зовнішній і внутрішній частині стінки в місці переходу її циліндричної частини в радіусну, де знаходяться в межах 0,11÷0,15.

На рис. 2.7 показано розміри напівфабрикату деталі «Напівсфера», отриманого витягуванням без притискача.

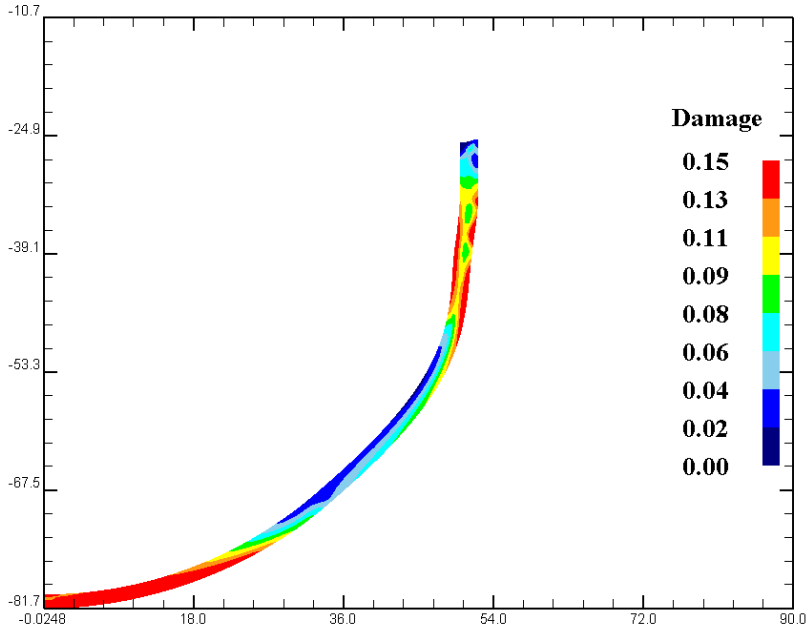


Рис 2.6 – Розподіл критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні без притискача

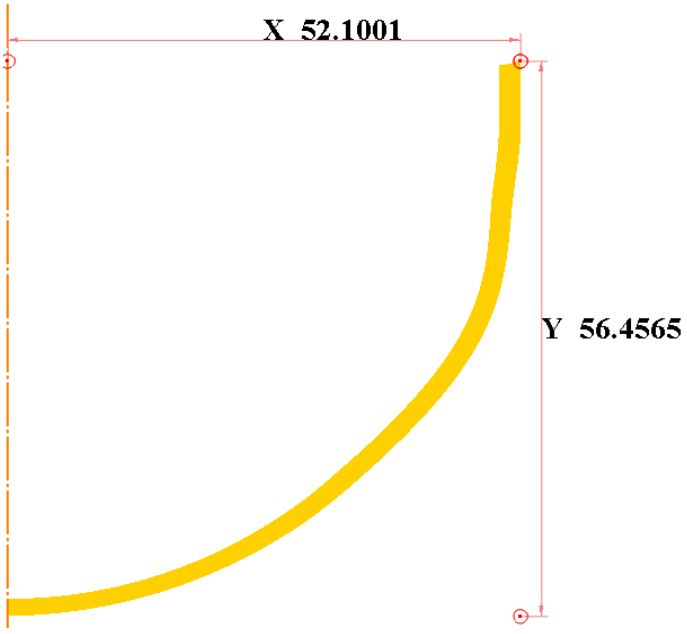


Рис 2.7 – Розміри здеформованого напівфабрикату деталі «Напівсфера» при витягуванні без притискача

Далі було виконано моделювання процесу витягування напівфабрикату деталі «Напівсфера» з притискачем.

Вихідними даними для моделювання є розміри вихідної плоскої заготовки $D_{\text{зг}} = 158$ мм та розміри напівфабрикату після формоутворення.

При моделюванні було задано наступні граничні умови:

- швидкість деформуючого інструменту $V_0 = 1$ мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0{,}1$;
- модель матеріалу – пластична;
- матеріал – ALUMINUM-7075 (аналог алюмінієвого сплав В95)

На рис. 3.8 показана розрахункова схема процесу витягування напівфабрикату деталі «Напівфера» з притискачем. Вихідна заготовка 3 розташована на матриці 2. Над заготовкою із зазором 0,6 розташований притискач 4. Зусилля деформування прикладають за допомогою пуансона 1.

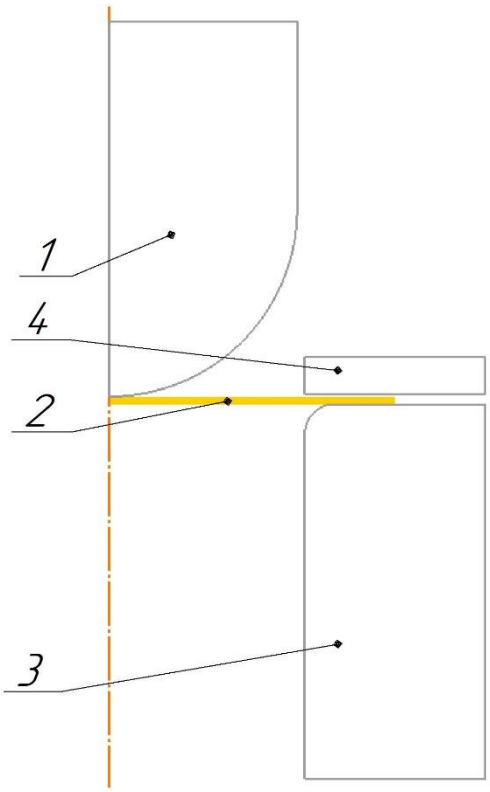
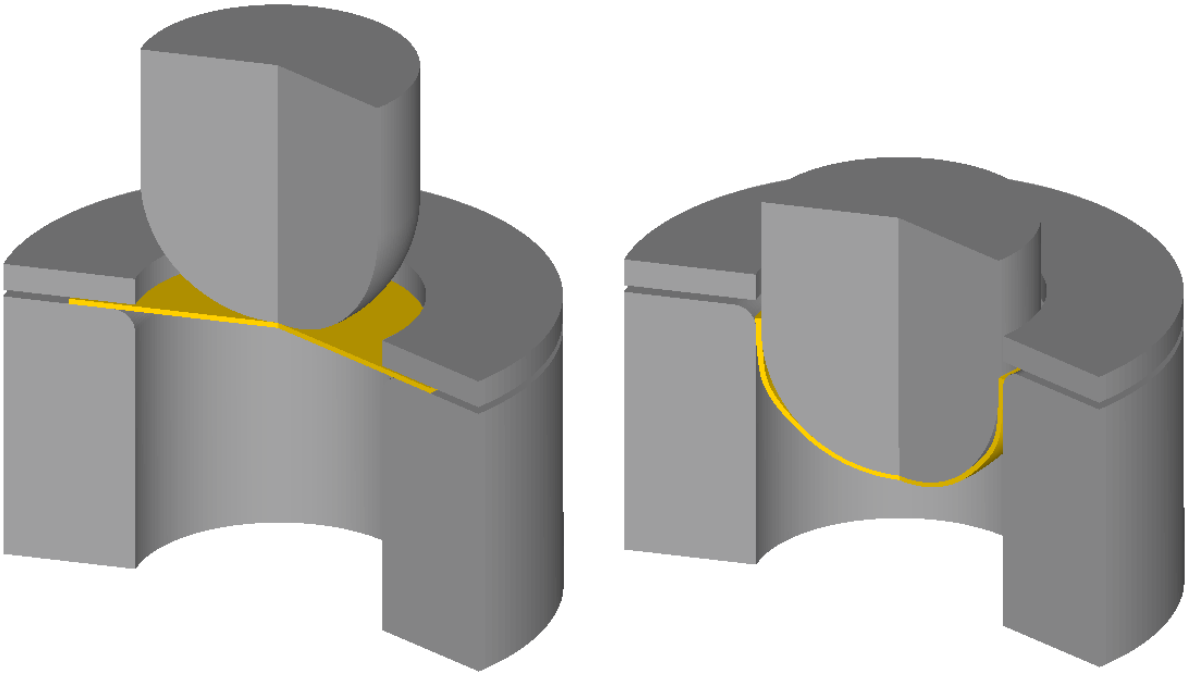


Рис 2.8 – Розрахункова схема витягування напівфабрикату деталі «Напівсфера» з притискачем

Розрахункова схема витягування на різних етапах показана на рис. 2.9.



а б

Рис 2.9 – Розрахункова схема витягування з притискачем напівфабрикату деталі «Напівсфера» на різних етапах:

а – на початку процесу; б – в кінці процесу

В результаті чисельного моделювання отримано графік залежності зусилля, що виникає на пуансоні від переміщення пуансону. Вказаний графік показаний на рис. 2.10. З нього видно, що максимальне зусилля витягування досягає 22 т (220 кН) в кінці процесу витягування.

Також в результаті чисельного моделювання отримано графік залежності зусилля, що виникає на притискачі від переміщення пуансону. Вказаний графік показаний на рис. 2.11. З нього видно, що максимальне зусилля на притискачі досягає 4,9 т (49 кН) в кінці процесу витягування.

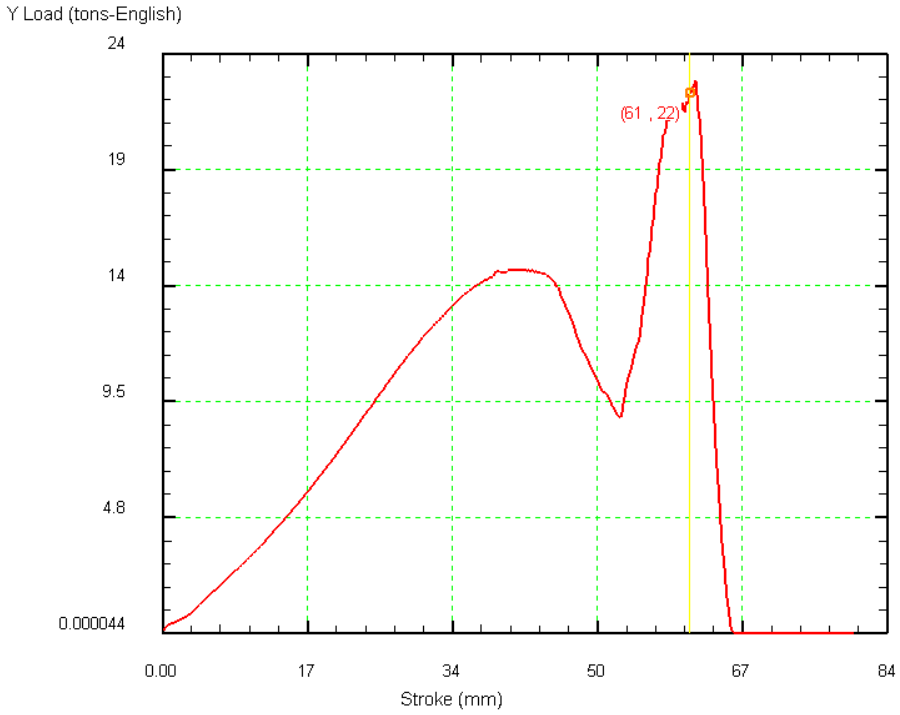


Рис 2.10 – Графік залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при витягуванні напівфабрикату деталі «Напівсфера» з притискачем

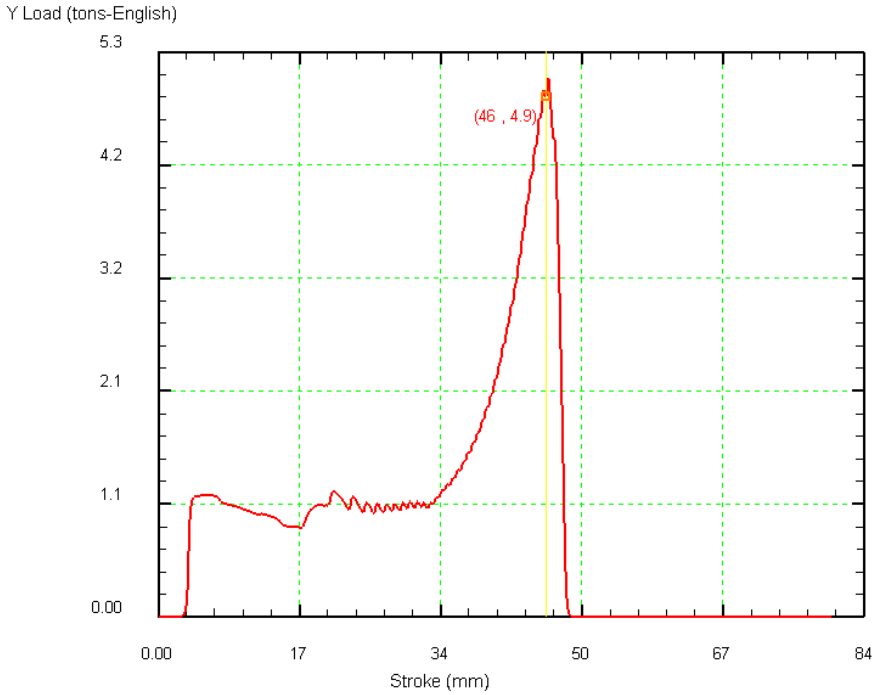


Рис 2.11 – Графік залежності зусилля на притискачі від переміщення пуансона при витягуванні напівфабрикату деталі «Напівсфера»

Розподіл компонент напружень при витягуванні з притискачем у здеформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування показано на рис. 2.12.

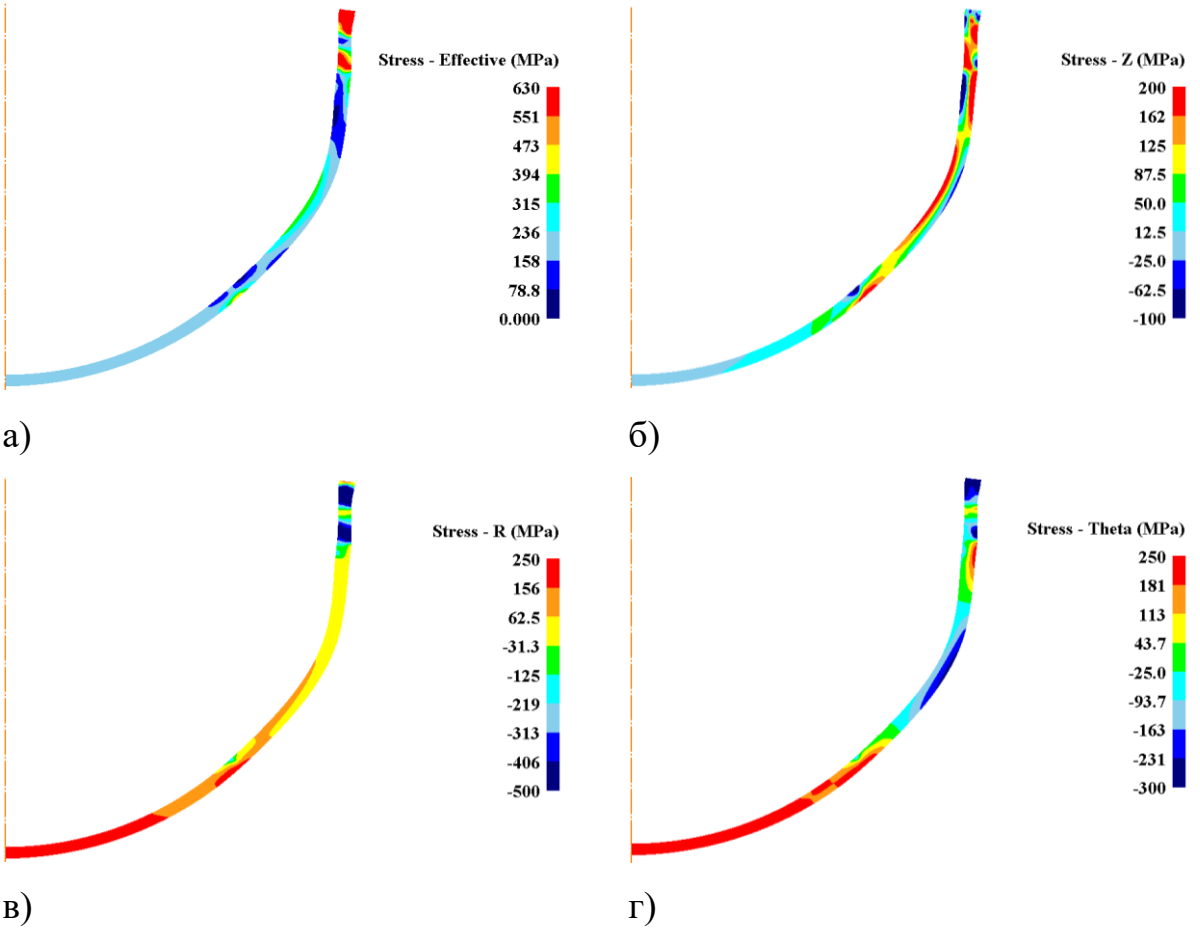


Рис 2.12 – Розподіл компонент напружень при витягуванні з притискачем при максимальному зусиллі: а – інтенсивність напружень σ_i; б – осьові напруження σ_z; в – радіальні напруження σ_ρ; г – тангенціальні напруження σ_θ

На рис. 2.12, а показано розподіл інтенсивності напружень у здеформованому напівфабрикаті, який знаходиться в межах $\sigma_i = 0 \div 630$ МПа. В донній частині значення становлять $\sigma_i = 158 \div 236$ МПа, найменші значення $\sigma_i = 0 \div 158$ МПа виникають в місці переходу з радіусної частини в циліндричну, найбільші $\sigma_i = 551 \div 630$ МПа – на торцях напівфабрикату.

Осьові напруження, які показано на рис. 2.12б, знаходяться в межах $\sigma_z = -100 \div 200$ МПа. Стискаючі осьові напруження $\sigma_z = -25 \div 0$ МПа виникають в донній частині виробу та $\sigma_z = -100 \div -62{,}5$ МПа у внутрішній частині стінки в місці переходу з радіусної в циліндричну частину.

Найбільші значення розтягуючих осьових напружень $\sigma_z = 162 \div 200$ МПа виникають у зовнішній частині стінки в місці переходу з радіусної в циліндричну частину.

Радіальні напруження, що показані на рис. 2.12в, знаходяться в межах $\sigma_\rho = -500 \div 250$ МПа. У циліндричній частині виробу виникають стискаючі радіальні напруження $\sigma_\rho = -500 \div -313$ МПа. Найбільші розтягувальні радіальні напруження складають $\sigma_\rho = 62{,}5 \div 250$ МПа та зосереджені в донній частині виробу.

Тангенціальні напруження показано на рис. 2.12г. Вони знаходяться в межах $\sigma_\theta = -300 \div 250$ МПа. Найбільші розтягувальні тангенціальні напруження виникають у донній частині виробу й становлять $\sigma_\theta = 181 \div 250$ МПа. У місці переходу радіусної частини стінки в циліндричну та на торцях виробу переважають стискаючі тангенціальні напруження.

На рис. 2.13 зображено розподіл компонент деформацій здеформованого напівфабрикату при витягуванні з притискачем.

На рис. 2.13а показано інтенсивність деформацій, які знаходиться в межах $\varepsilon_i = 0{,}02 \div 0{,}52$. Найменші значення інтенсивності в радіусній частині виробу знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}02 \div 0{,}15$. Найбільші величини знаходяться в місці переходу радіусної частини стінки напівфабрикату в циліндричну, власне циліндричній та знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}21 \div 0{,}52$.

Осьові деформації, які показані на рис. 2.13б знаходяться в межах $\varepsilon_z = -0{,}19 \div 0{,}49$. По всій циліндричні стінці виробу та в місці її переходу у радіусну частину виникають розтягувальні осьові деформацій. В торцях їх значення досягають найбільшої величини $\varepsilon_z = 0{,}49$, далі поступово зменшуючись до донної частини напівфабрикату. В донній частині виробу виникають стискаючі осьові деформації й досягають величини $\varepsilon_z = -0{,}19$.

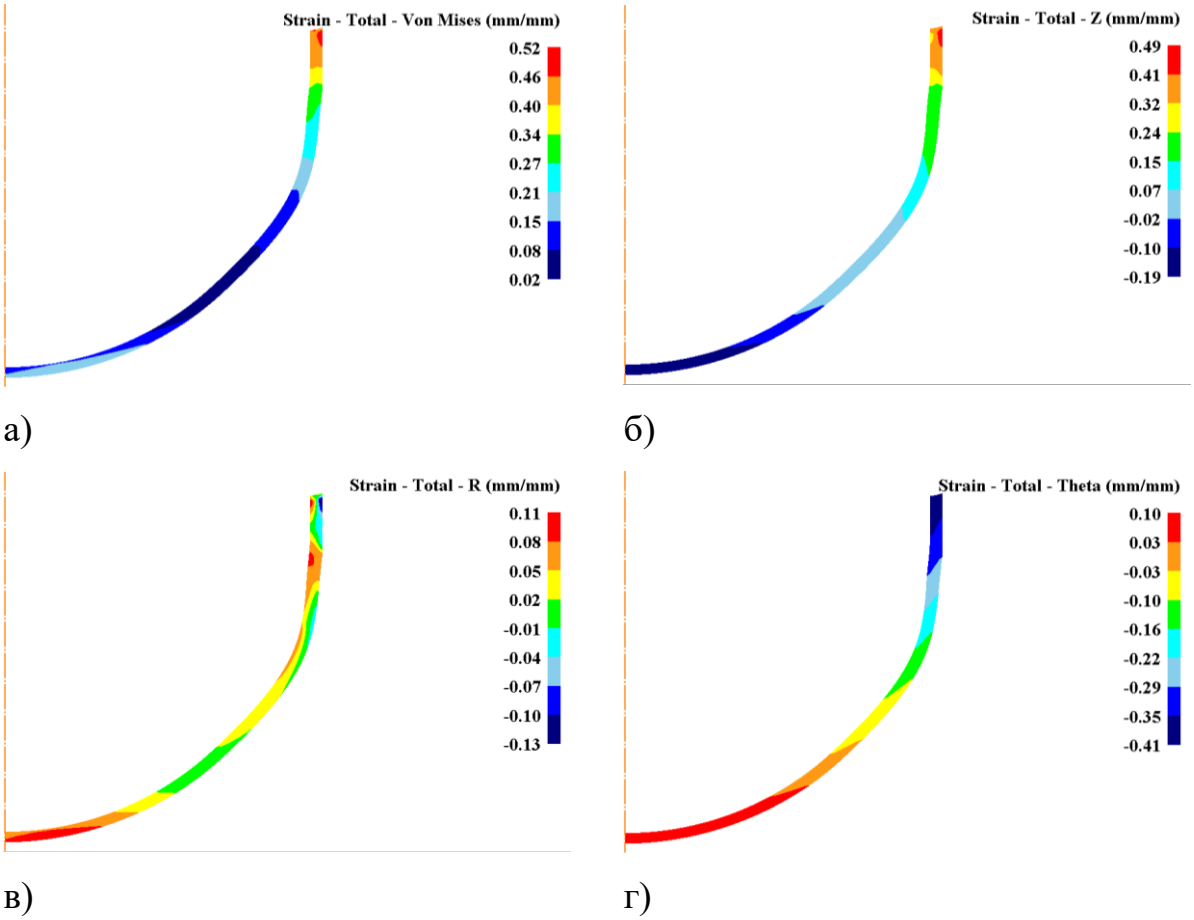


Рис 2.13 – Розподіл компонентів деформацій при витягуванні з притискачем у здеформованому напівфабрикаті:

а – інтенсивність деформацій ε_i; б – осьові деформації ε_z; в – радіальні деформації ε_ρ; г – тангенціальні деформації ε_θ.

Радіальні деформації показані на рис. 2.13в та знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = -0{,}13 \div 0{,}11$. Найбільшої величини розтягувальні радіальні деформації сягають у донній частині здеформованого напівфабрикату та внутрішній частині стінки в торці, де знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = 0{,}05 \div 0{,}11$. На зовнішній частині стінки в торці виникають стискаючі радіальні деформації, що знаходяться в межах $\varepsilon_\rho = -0{,}13 \div -0{,}01$.

На рис. 2.13г показано тангенціальні деформації, які знаходяться в межах $\varepsilon_\theta = -0{,}41 \div 0{,}10$. Найбільшої величини стискаючі тангенціальні деформації $\varepsilon_\theta = -0{,}41$ сягають в торцях стінки виробу, далі поступово зменшуючись поступово переходячи в розтягувальні тангенціальні деформації

в донній частині виробу до величини $\varepsilon_\theta = 0{,}10$.

Значення критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем показано на рис. 2.14. Його значення знаходяться в межах 0,00÷0,15. Найбільші значення критерію руйнування виникають в донній частині виробу та в зовнішній і внутрішній частині стінки в місці переходу її циліндричної частини в радіусну, де знаходяться в межах 0,11÷0,15.

На рис. 2.15 показано розміри напівфабрикату деталі «Напівсфера», отриманого витягуванням з притискачем.

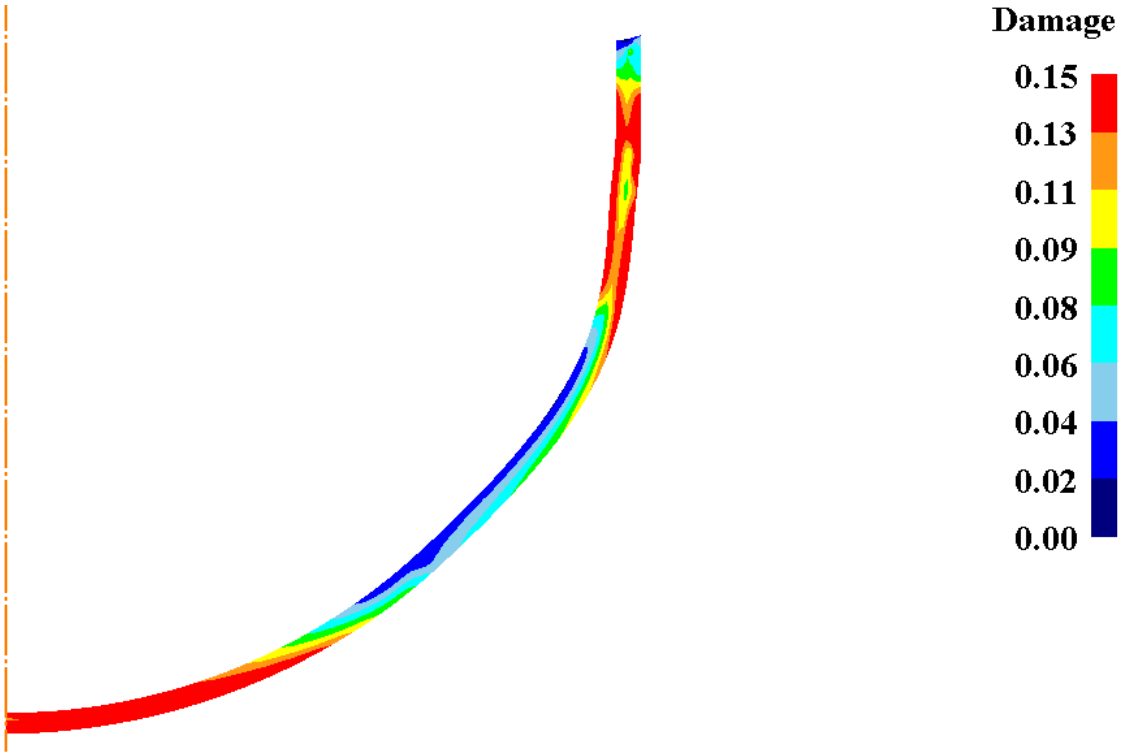


Рис 2.14 – Розподіл критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем

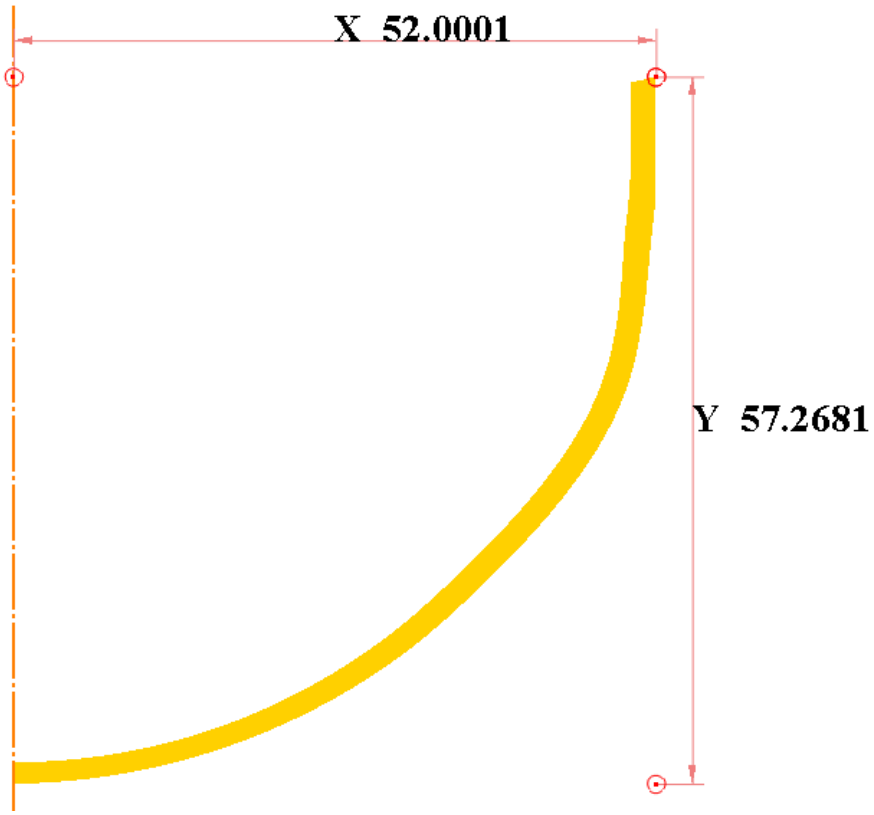


Рис 2.15 – Розміри здеформованого напівфабрикату деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем

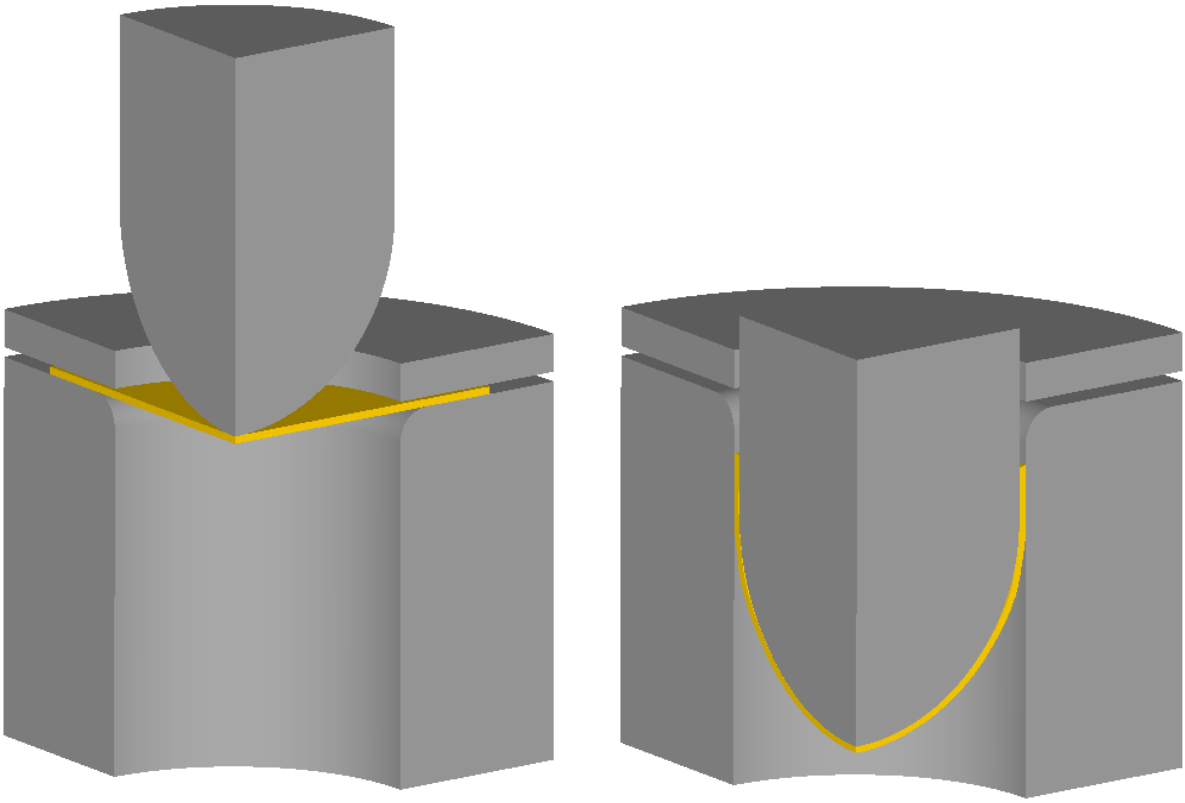
2.2. Моделювання процесу в середовищі DEFORM-3D.

Також було виконано моделювання процесу витягування напівфабрикату деталі «Напівсфера» з притискачем в DEFORM-3D. При цьому виконували моделювання четвертини заготовки для пришвидшення процесу розрахунку.

Вихідними даними для моделювання є розміри вихідної плоскої заготовки $D_{\text{зг}} = 160$ мм та розміри напівфабрикату після формоутворення. При моделюванні було задано наступні граничні умови:

- швидкість деформуючого інструменту $V_0 = 1$ мм/с;
- коефіцієнт тертя по Кулону $\mu = 0{,}1$;
- модель матеріалу – пластична;
- матеріал – ALUMINUM-7075 (аналог алюмінієвого сплав В95)

Розрахункова схема витягування на різних етапах показана на рис. 2.16.



а б

Рис 2.16 – Розрахункова схема витягування з притискачем напівфабрикату деталі «Напівсфера» на різних етапах:

а – на початку процесу; б – в кінці процесу

В результаті чисельного моделювання отримано графік залежності зусилля, що виникає на пуансоні від переміщення пуансону. Вказаний графік показаний на рис. 2.17. З нього видно, що максимальне зусилля витягування досягає 5,1 т (51 кН) в кінці процесу витягування.

Також в результаті чисельного моделювання отримано графік залежності зусилля, що виникає на притискачі від переміщення пуансону. Вказаний графік показаний на рис. 2.18. З нього видно, що максимальне зусилля на притискачі досягає 2,3 т (23 кН) в кінці процесу витягування.

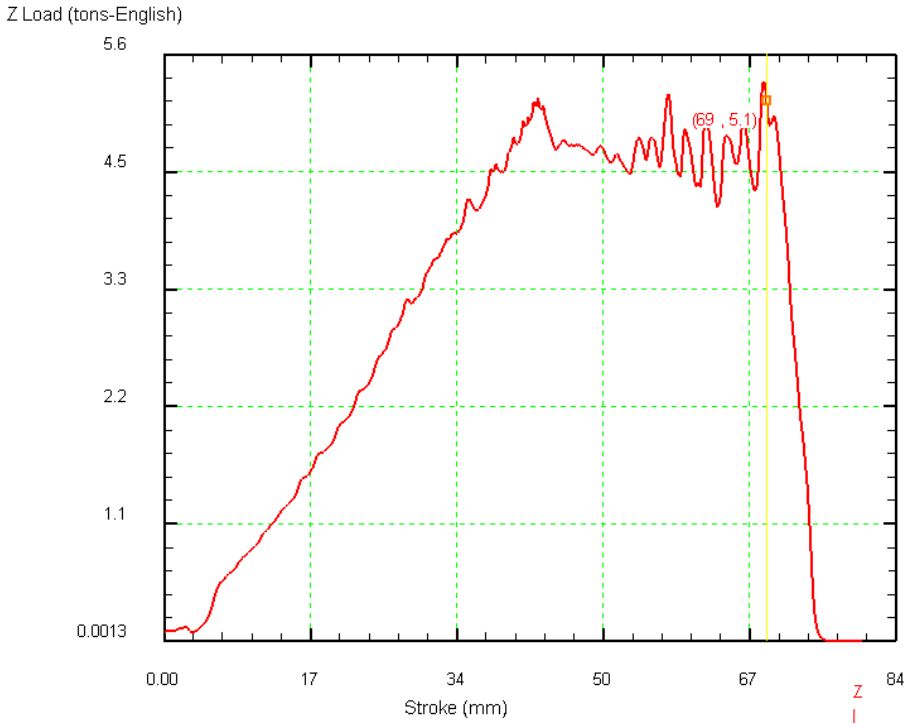


Рис 2.17 – Графік залежності зусилля витягування від переміщення пуансона при витягуванні напівфабрикату деталі «Напівсфера» з притискачем

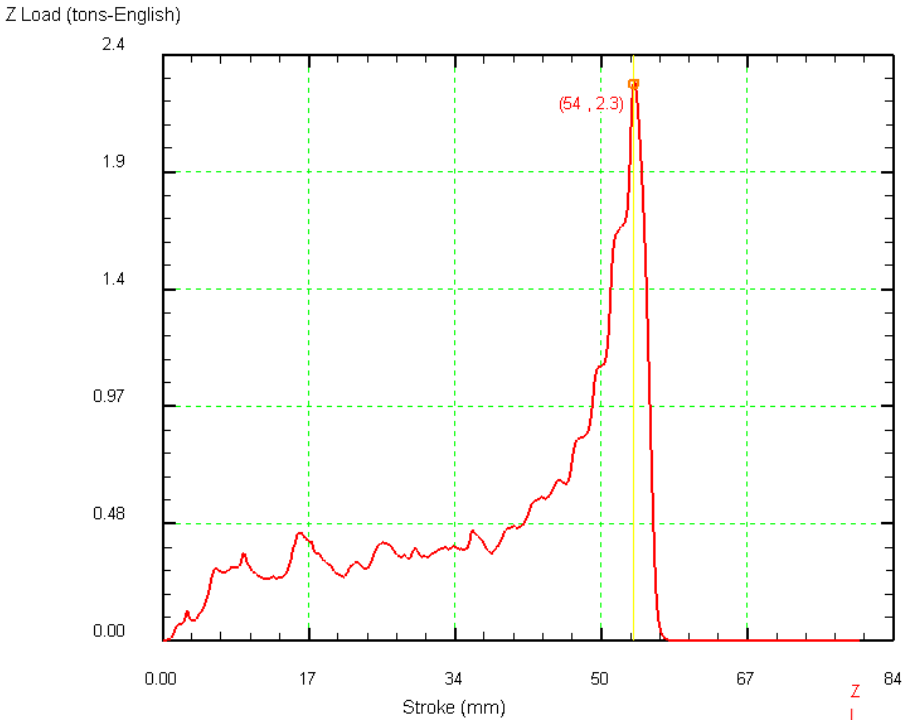


Рис 2.18 – Графік залежності зусилля на притискачі від переміщення пуансона при витягуванні напівфабрикату деталі «Напівсфера»

Розподіл компонент напружень при витягуванні з притискачем у здеформованій заготовці при максимальному зусиллі витягування показано на

рис. 2.19.

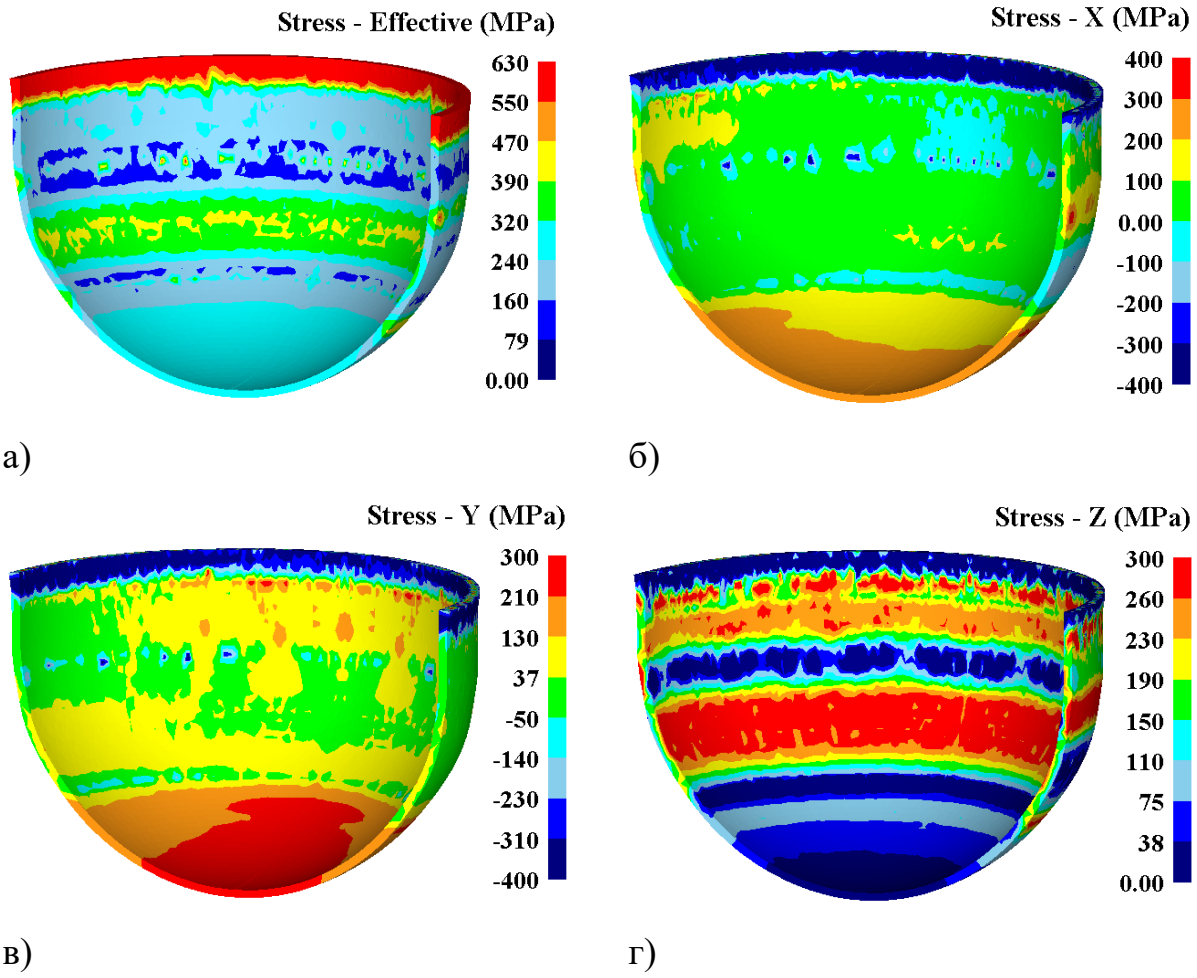


Рис 2.19 – Розподіл компонент напружень при витягуванні з притискачем при максимальному зусиллі: а – інтенсивність напружень σ_i; б – напруження σ_x; в – напруження σ_y; г – напруження σ_z

На рис. 2.19а показано розподіл інтенсивності напружень у здеформованому напівфабрикаті, який знаходиться в межах $\sigma_i = 0 \div 630$ МПа. В донній частині значення становлять $\sigma_i = 160 \div 320$ МПа, найменші значення $\sigma_i = 79 \div 160$ МПа виникають в місці переходу з радіусної частини в циліндричну, найбільші $\sigma_i = 550 \div 630$ МПа – на торцях напівфабрикату.

Напруження σ_x, які показано на рис. 2.19б, знаходяться в межах $\sigma_x = -400 \div 400$ МПа.

Напруження σ_y, що показані на рис. 2.19в, знаходяться в межах $\sigma_y = -400 \div 300$ МПа.

Напруження σ_z показано на рис. 2.19г. Вони знаходяться в межах $\sigma_z = 0 \div 300$ МПа.

На рис. 2.20 зображено розподіл компонент деформацій здеформованого напівфабрикату при витягуванні з притискачем.

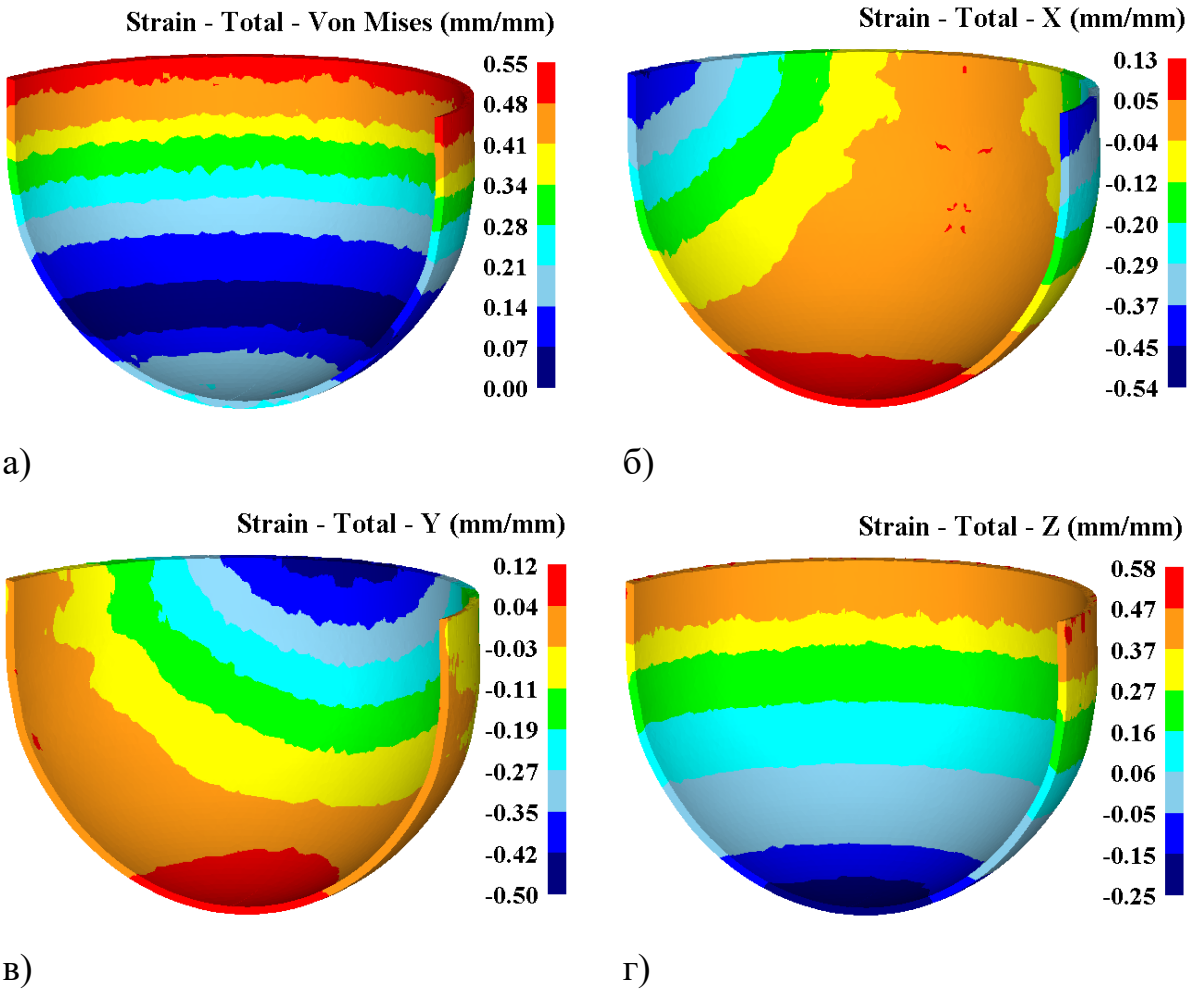


Рис 2.20 – Розподіл компонентів деформацій при витягуванні з притискачем у здеформованому напівфабрикаті:

а – інтенсивність деформацій ε_i; б – деформації ε_x; в – деформації ε_y; г – деформації ε_z.

На рис. 2.20а показано інтенсивність деформацій, які знаходиться в межах $\varepsilon_i = 0{,}00 \div 0{,}55$. Найменші значення інтенсивності в радіусній частині виробу знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}00 \div 0{,}14$. Найбільші величини знаходяться в торцях виробу та знаходяться в межах $\varepsilon_i = 0{,}48 \div 0{,}55$.

Деформації ε_x, які показані на рис. 2.20б знаходяться в межах $\varepsilon_x =$

$-0{,}54 \div 0{,}13$. Деформації ε_y показані на рис. 2.20в та знаходяться в межах $\varepsilon_y = -0{,}50 \div 0{,}12$. На рис. 2.20г показано деформації ε_z, які знаходяться в межах $\varepsilon_z = -0{,}25 \div 0{,}58$.

Значення критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем показано на рис. 2.21. Його значення знаходяться в межах 0,00÷0,25. Найбільші значення критерію руйнування виникають в донній частині виробу та в зовнішній і внутрішній частині стінки в місці переходу її циліндричної частини в радіусну, де знаходяться в межах 0,19÷0,25.

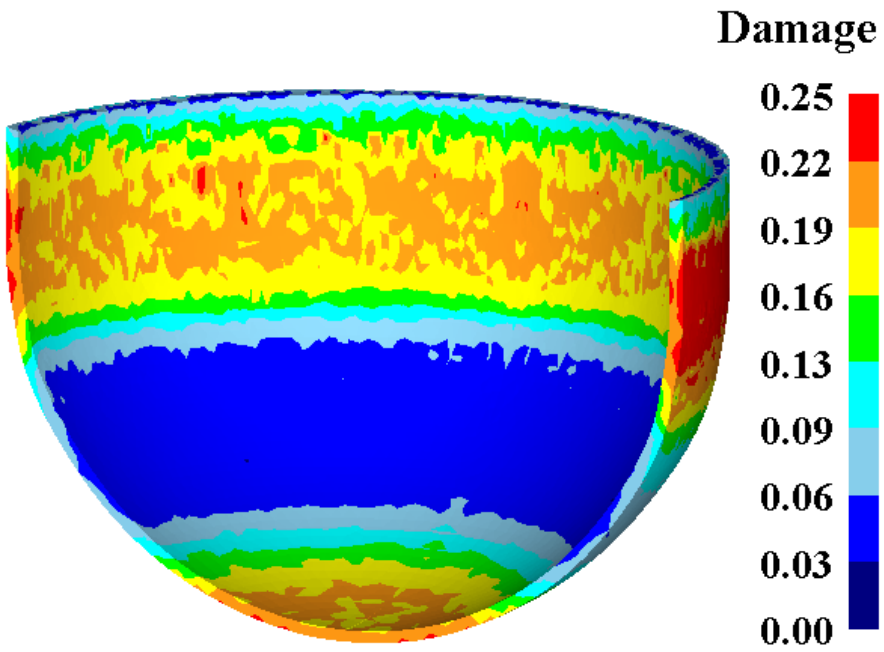


Рис 2.21 – Розподіл критерію руйнування в здеформованому напівфабрикаті деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем

На рис. 2.22 показано розміри напівфабрикату деталі «Напівсфера», отриманого витягуванням з притискачем.

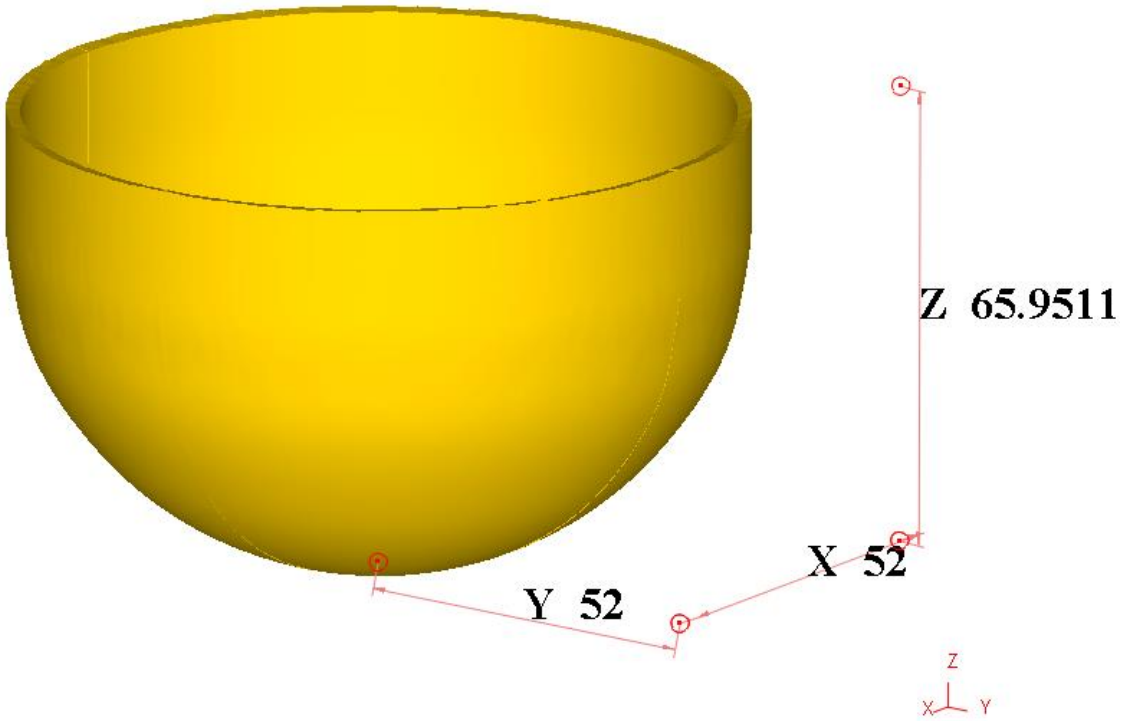


Рис 2.22 – Розміри здеформованого напівфабрикату деталі «Напівсфера» при витягуванні з притискачем

2.3. Товщина стінки здеформованого напівсферичного виробу.

На рис. 2.23 показано товщину стінки в різних місцях напівсферичного виробу після моделювання без притискача в DEFORM-2D. На торцях товщина стінки становить 1,98 мм. Відбувається незначне потовщення до 2,14 мм в місці переходу циліндричної частини то радіусної. Далі поступово до донної частини відбувається потоншення стінки до величини 1,7-1,73 мм.

На рис. 2.24 показано товщину стінки в різних місцях напівсферичного виробу після моделювання без притискача в DEFORM-2D. На торцях товщина стінки становить 1,98 мм. Відбувається незначне потовщення до 2,14 мм в місці переходу циліндричної частини то радіусної. Далі поступово до донної частини відбувається потоншення стінки до величини 1,7-1,73 мм.

На рис. 2.25 показано товщину стінки в різних місцях напівсферичного виробу після моделювання без притискача в DEFORM-3D. На торцях товщина стінки становить 1,83 мм. Відбувається незначне потоншення до 1,97 мм в місці переходу циліндричної частини то радіусної. Далі поступово до донної частини відбувається потоншення стінки до величини 1,56-1,57 мм.

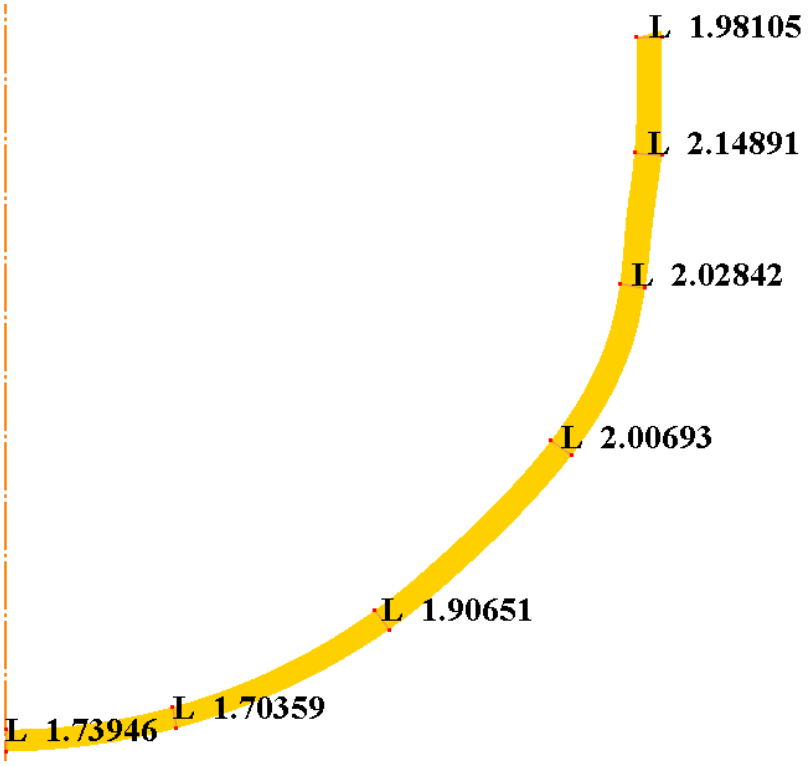


Рисунок 2.23 – Товщина стінки напівсферичного виробу після моделювання витягування без притискача в DEFORM-2D.

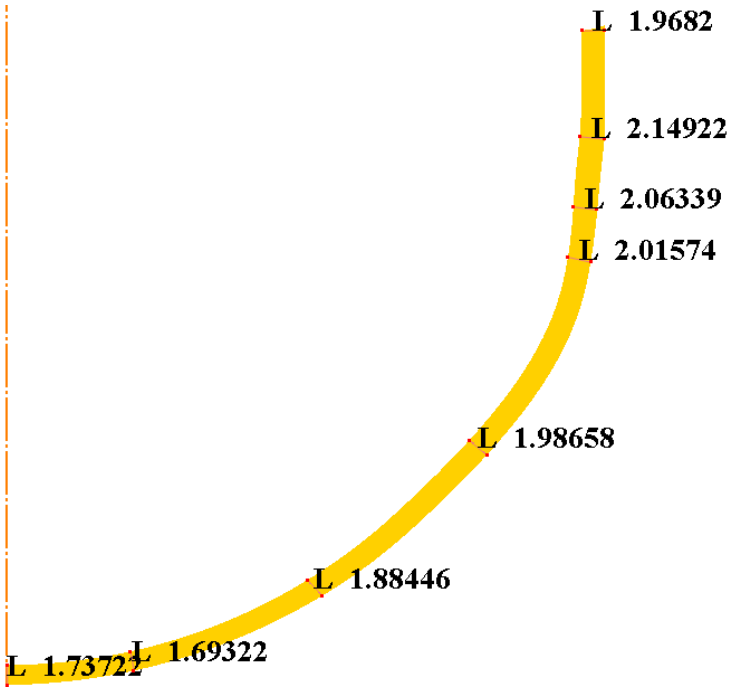


Рисунок 2.24 – Товщина стінки напівсферичного виробу після моделювання витягування з притискачем в DEFORM-2D.

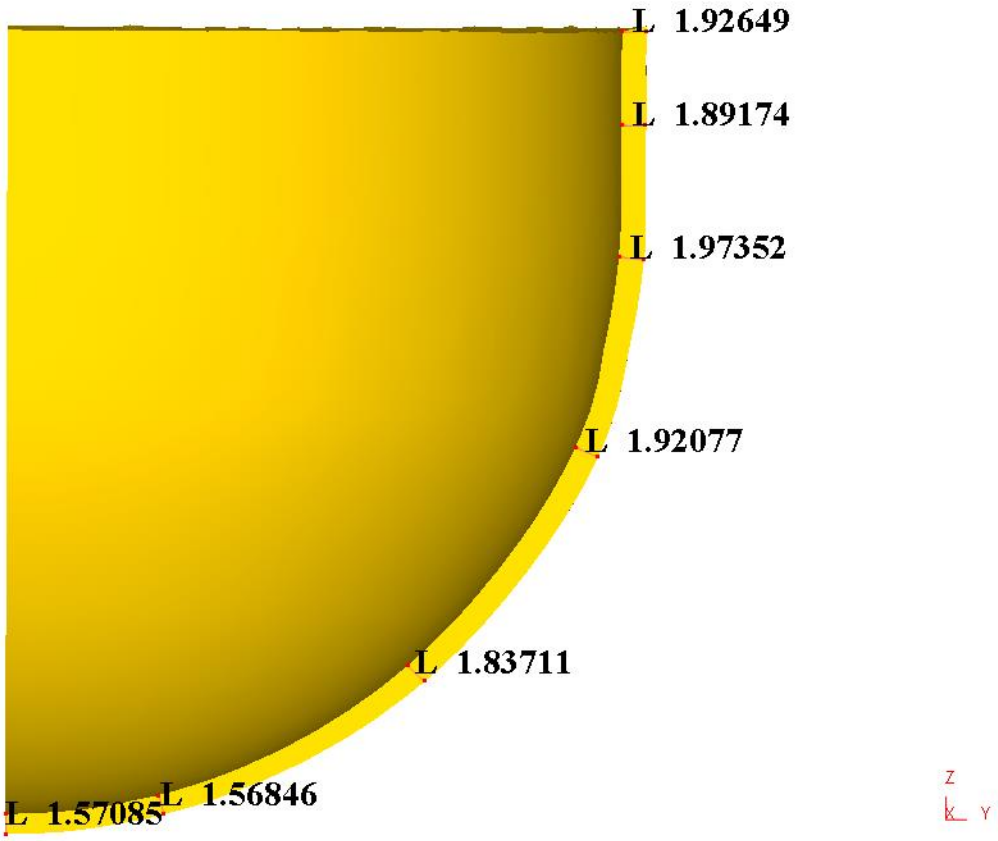


Рис 2.25 Товщина стінки напівсферичного виробу після моделювання в програмному комплексі DEFORM – 3D

РОЗДІЛ 3

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ІНКРЕМЕНТАЛЬНОГО ФОРМУВАННЯ НАПІВСФЕРИЧНОГО ВИРОБУ В ПРОГРАМНОМУ КОМПЛЕКСІ ABAQUS

Відмінність процесу інкрементального формування від традиційних схем листового штампування полягає в тому, що в процесі інкрементального формування середовище пластичної деформації локалізовано біля пуансону. Внаслідок чого, сила деформування зменшується і відсутня необхідність у використанні найчастіше дорогої штампової оснастки та потужного пресового обладнання. Деталь виходить не за рахунок суміщення верхньої та нижньої частин штампу, а за рахунок реалізації переміщення інструменту за заданим контуром за раніше розрахованими режимами. Під час процесу формування інструмент використовується для поступового формування листа в деталь, і його траєкторія задається з обробного центру з ЧПУ, а сам процес інкрементального формування може бути здійснений в автоматизованому режимі.

Принципова схема процесу інкрементального формування [1] представлена на рис. 3.1: заготовка, що утримується притиском, піддається штампуванню пуансоном, що забезпечує локальний осередок пластичної деформації, при цьому здійснюється обертання пуансону для зниження сил контактного тертя. Розглянута технологія формування дозволяє отримувати вироби типу напівсфери із сталей із різними фізичними властивостями.

Традиційна схема штампування, зокрема традиційна схема формування включає себе такі етапи: 1) проектування форми; 2) моделювання виробу в програмних комплексах та розробка технологічного процесу; 3) проектування оснащення; 4) виготовлення оснастки; 5) налагодження обладнання; 6) штампування.

Запропонована схема інкрементального формування включає такі етапи, як: 1) проектування форми; 2) моделювання виробу в програмному комплексі

та отримання програми для деформування у вигляді G-коду; 3) виготовлення виробу на універсальному обладнанні. Технологічний процес із застосуванням інкрементального формування зменшує тимчасові та матеріальні витрати при виготовленні виробу.

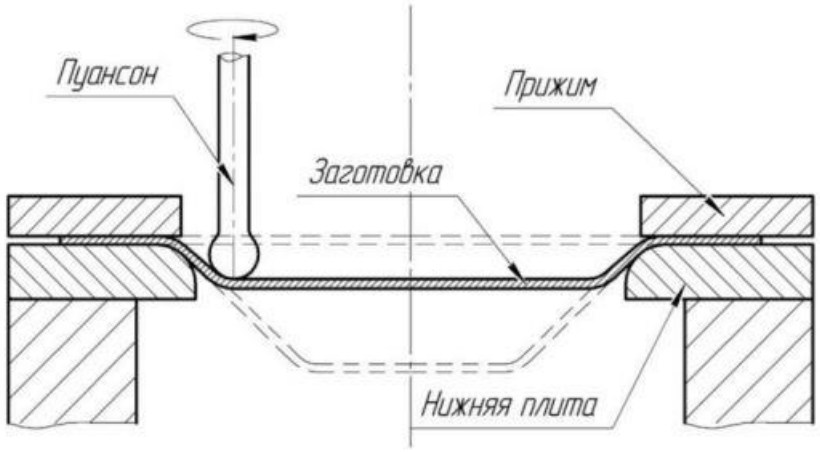


Рис 3.1 – Принципова схема інкрементального формування

Для отримання виробів методом інкрементального формування використовуємо таку схему деформування, як поетапне розширення.

Метод поетапного розширення є процесом, при якому інструмент формує виріб за ряд невеликих послідовних кроків. Формування відбувається шляхом переміщення пуансона трьома координатними осями невеликими кроками, утворюючи кінцеву форму.

Так як при інкрементальному формуванні інструмент переміщається складною траєкторією, то для моделювання операції використовувався пакет програми Abaqus, заснований на розрахунку методом кінцевих елементів.

Для створення проекту в даному програмному комплексі прийнято таку послідовність.

Підготовка моделей інструменту та заготовки.

1. Вибір стратегії деформування:

• вибір схеми деформування;

• завдання точок переміщення до Excel;

• перевірка траєкторії у MathCad.

2. Завдання параметрів моделювання:

• реологія матеріалу (модуль Юнга, коефіцієнт Пуансона, щільність, крива зміцнення);

• параметри розрахунку (кількість кінцевих елементів, граничні умови, величина кроку, час деформування, амплітуди руху інструменту).

3. Аналіз результатів отриманої деталі:

• форма;

• товщина;

• деформації та напруження.

Для визначення розмірів інструменту, необхідно ґрунтуватися на габаритних розмірах виробу. При досить великому радіусі заокруглення пуансону осередок пластичної деформації не буде локалізовано, а малий радіус пуансону не забезпечить практичного контакту із поверхнею заготівлі. Радіус заокруглення необхідно вибирати з діапазону 0,05-0,08 Rзаг.

Для першого способу деформування розглядається поетапне розширення кілька проходів. Перевірку траєкторії руху інструменту для даного методу проводимо у програмному комплексі WolframMathematica, отримані амплітуди руху представлені на рис. 3.2.

Параметри моделювання реології матеріалу:

1. Реологія матеріалу.

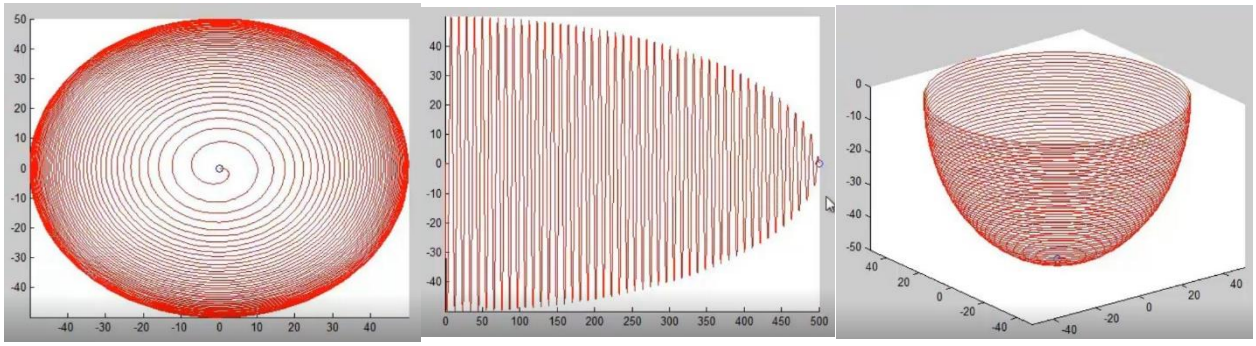
Розрахунок виконувався з моделлю матеріалу: В95.

2. Параметри розрахунку:

- коефіцієнт тертя – 0,15;

- розмір скінченного елементу 2 (1 % від діаметра заготовки, при більшому числі елементів точність зменшується, при меншому числі елементів – велика тривалість розрахунку);

- величина кроку – 0,07 сек (0,02 % від часу деформування).



а) б) в)

Рис 3.2 – Амплітуди руху інструменту:

а – вид зверху; б – по координатам X, Y; в – переміщення в координатах XYZ

Моделювання процесу інкрементального формування напівсферичного виробу було виконано в програному комплексі Abaqus. Розрахункову схему наведено на рис. 3.3.

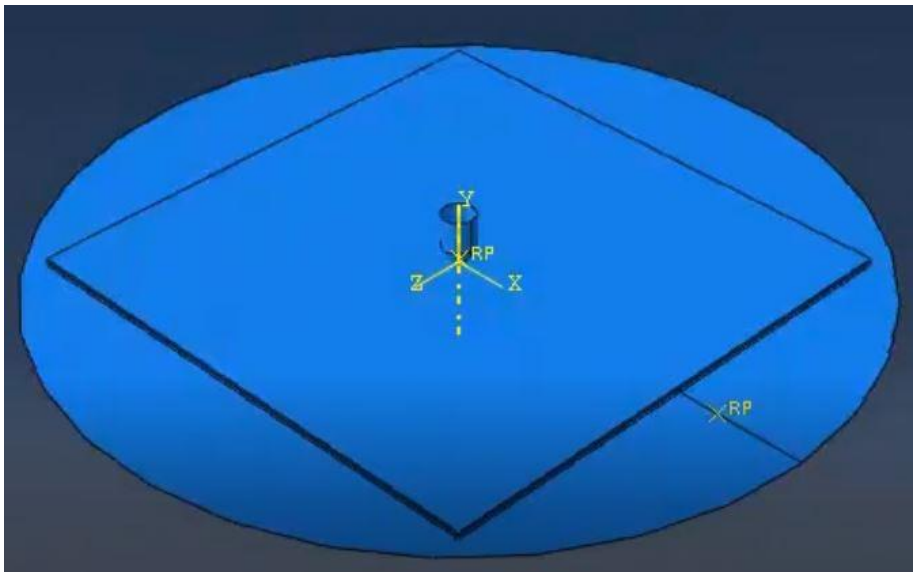


Рис 3.3 – Розрахункова схема процесу інкрементального формування із Abaqus

Матрицю та пуансон показано на рис. 3.4 та рис. 3.5 відповідно.

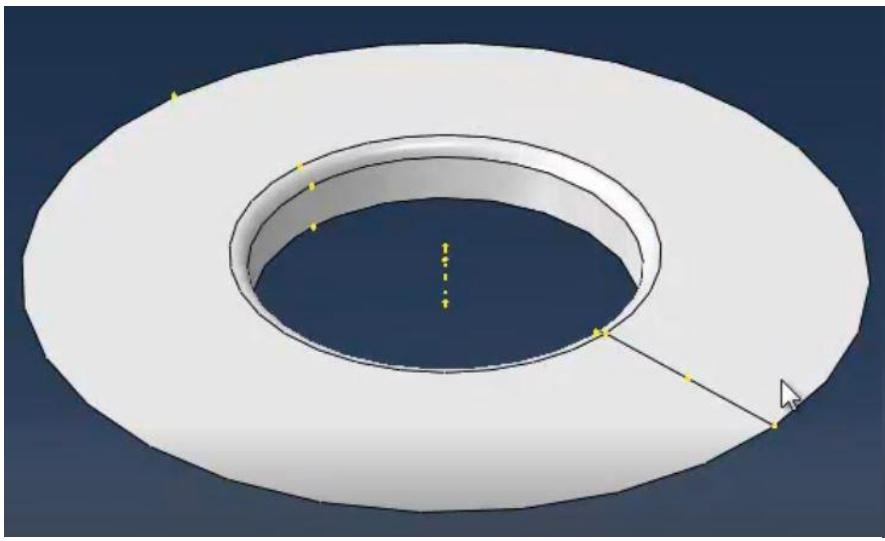


Рис 3.4 – Матриця

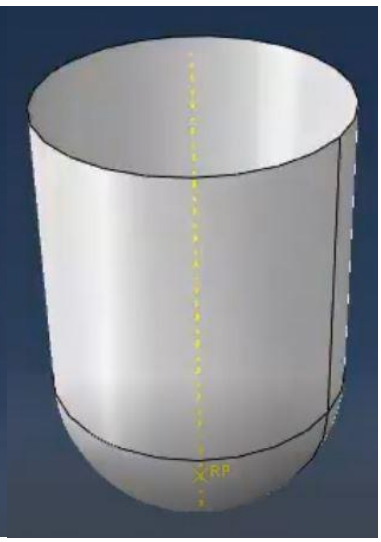


Рис 3.5 – Пуансон

Послідовність формоутворення напівсферичного виробу показано на рис. 3.6.

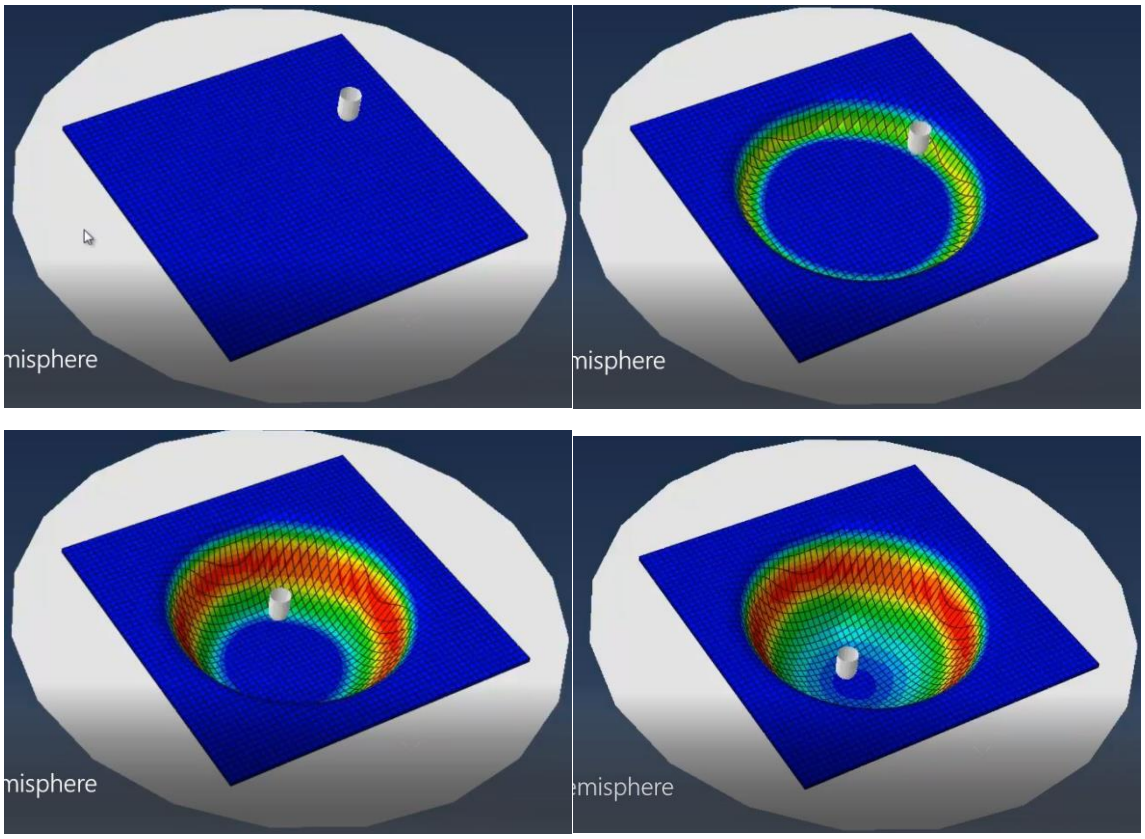


Рис 3.6 – Послідовність формоутворення напівсферичного виробу

Результати розподілення товщини по деталі показані на рис. 3.7. По отриманим результатам можна сказати, що при виконаній схемі деформування та використанні поетапного розширення максимальне потоншення складає 69 %.

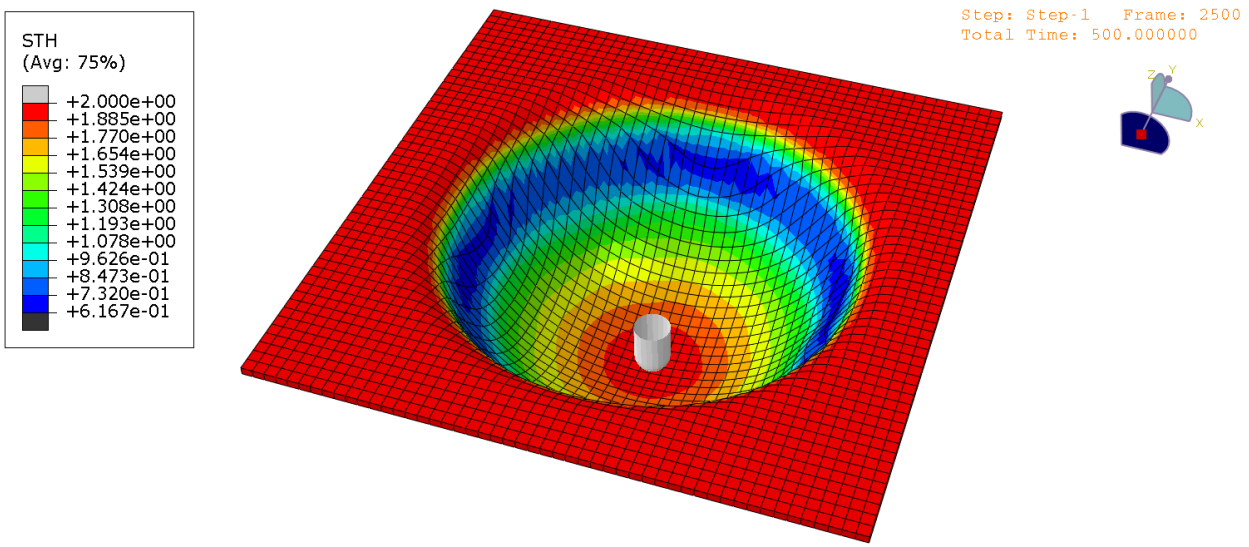


Рис 3.7 – Розподіл товщини стінки по деталі

Розподіл інтенсивності деформацій показано на рис. 3.8.

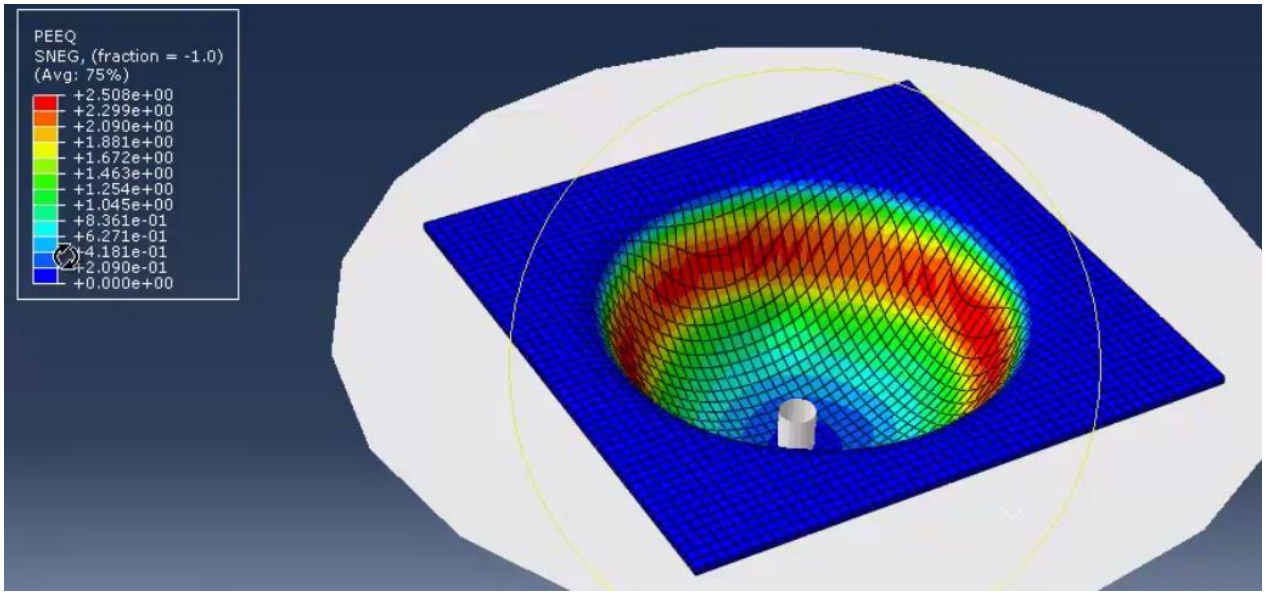


Рис 3.8 – Розподіл інтенсивності деформацій

На рис. 3.9 показано розподіл інтенсивності напружень по Мізесу в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\sigma_i = 6{,}3 \div 627$ МПа.

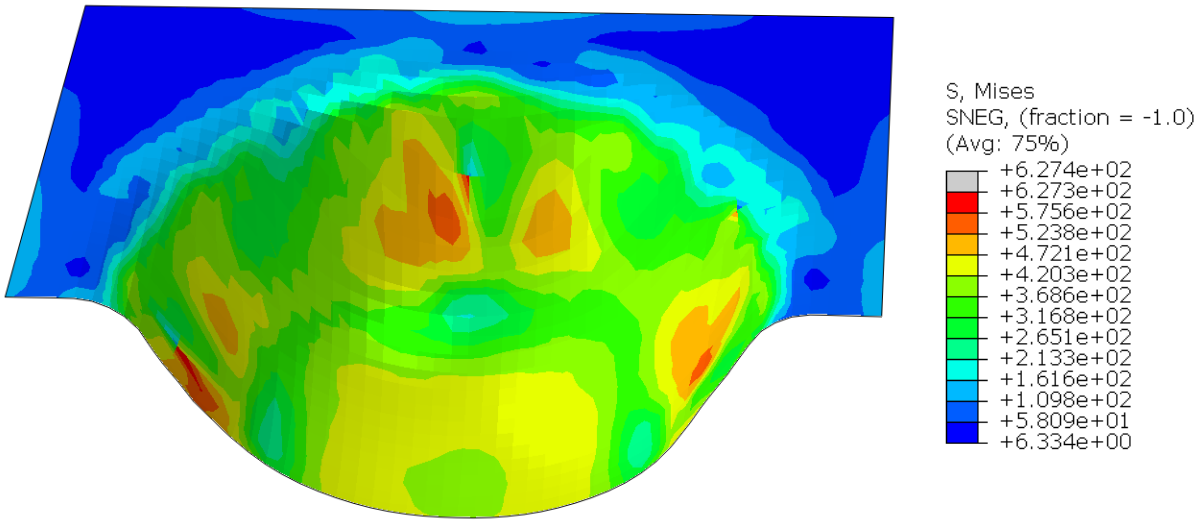


Рис 3.9 – Розподіл інтенсивності напружень по Мізесу

На рис. 3.10 показано розподіл напружень σ_{11} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\sigma_{11} = -504 \div 627$ МПа.

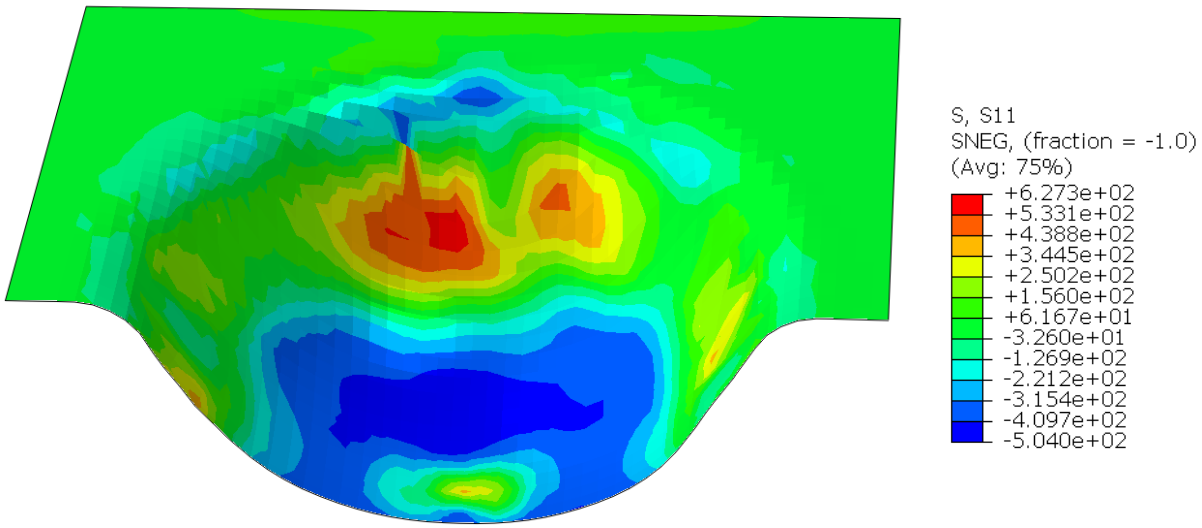


Рис 3.10 – Розподіл напружень σ_{11}

На рис. 3.11 показано розподіл напружень σ_{22} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\sigma_{22} = -513 \div 627$ МПа.

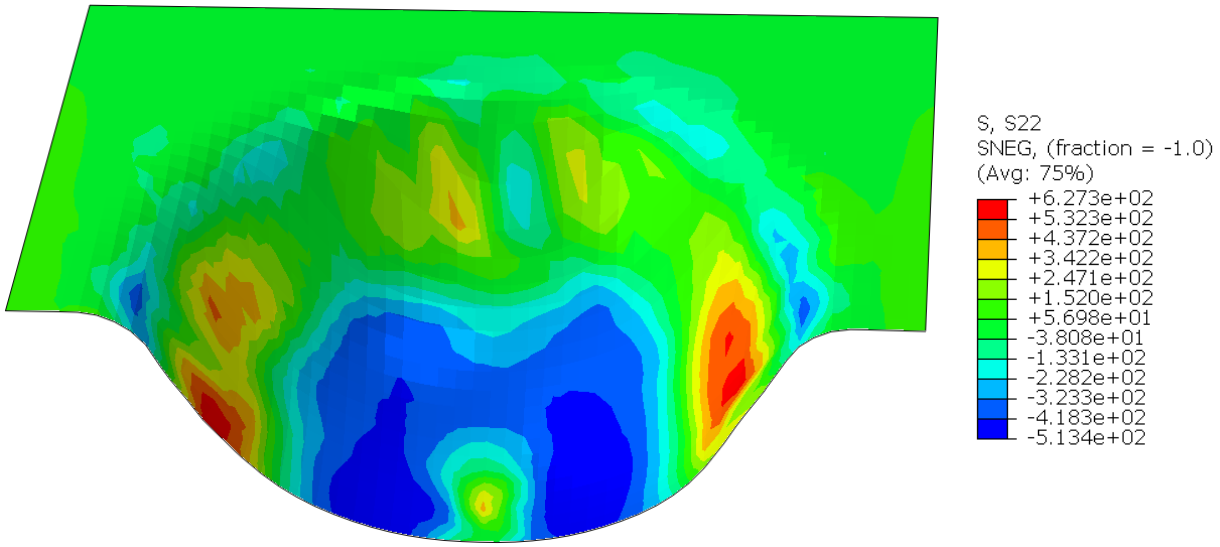


Рис 3.11 – Розподіл напружень σ_{22}

На рис. 3.12 показано розподіл напружень σ_{33} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\sigma_{33} = 0 \div 627$ МПа. Практично по всій поверхні значення не перевищують 52 МПа.

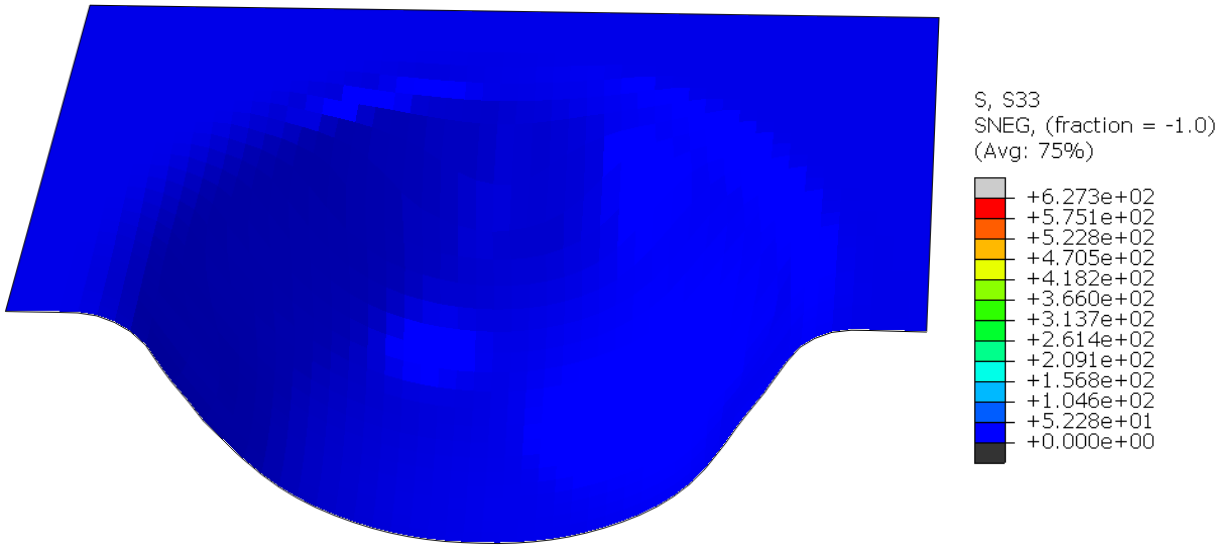


Рис 3.12 – Розподіл напружень σ_{33}

На рис. 3.13 показано розподіл напружень σ_{12} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\sigma_{12} = -228 \div 237$ МПа.

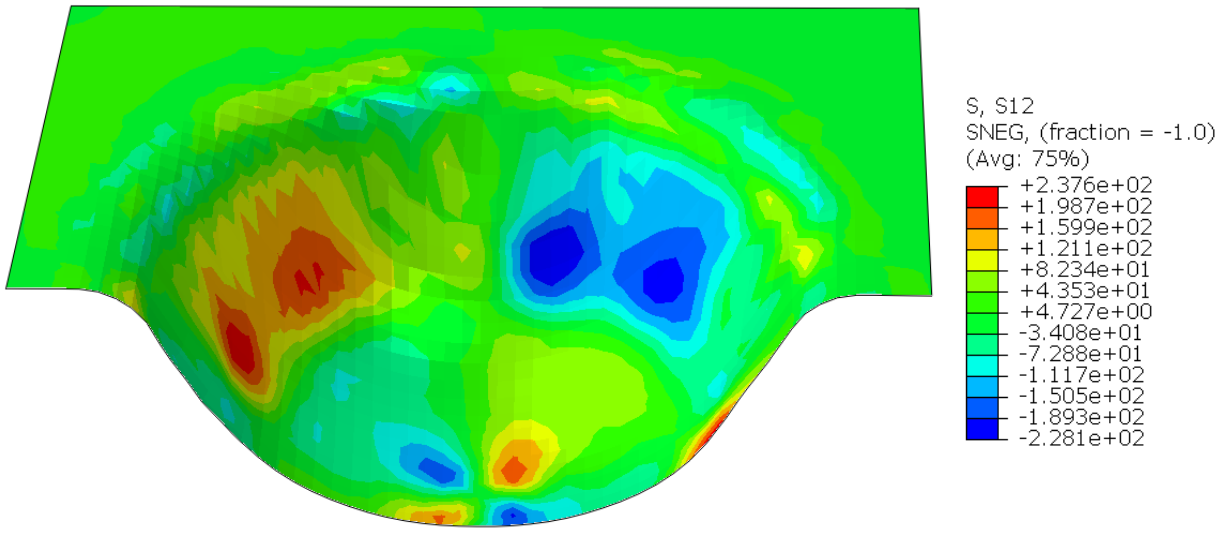


Рис 3.13 – Розподіл напружень σ_{12}

На рис. 3.14 показано розподіл максимальних пластичних деформацій ε_{max} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{msx} = -0{,}0058 \div 1{,}546$.

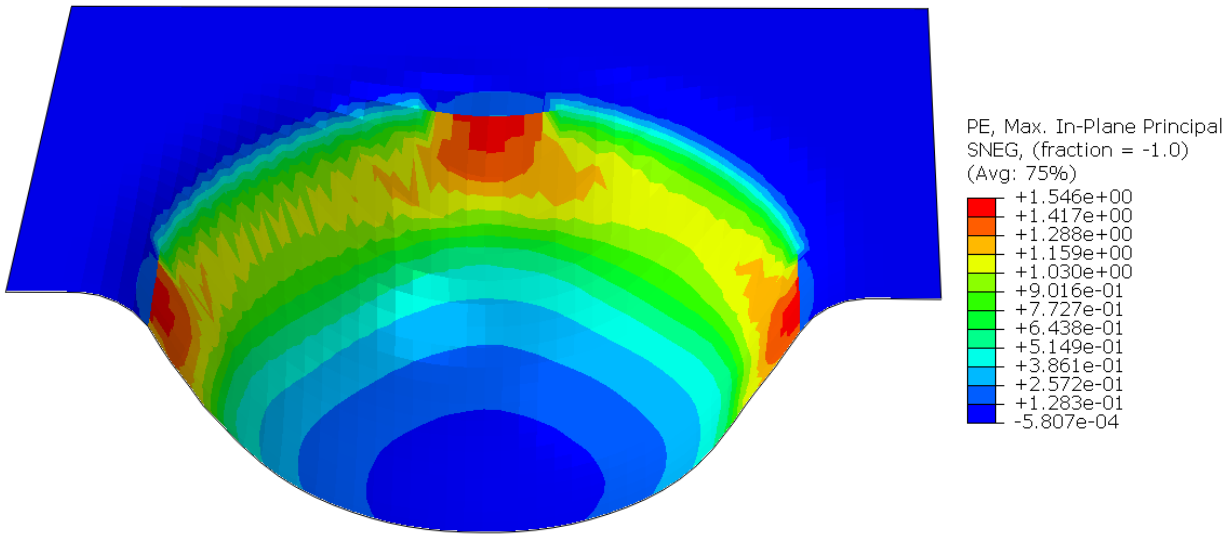


Рис 3.14 – Розподіл максимальних пластичних деформацій ε_{max}

На рис. 3.15 показано розподіл пластичних деформацій ε_{11} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{11} = -0{,}057 \div 1{,}544$.

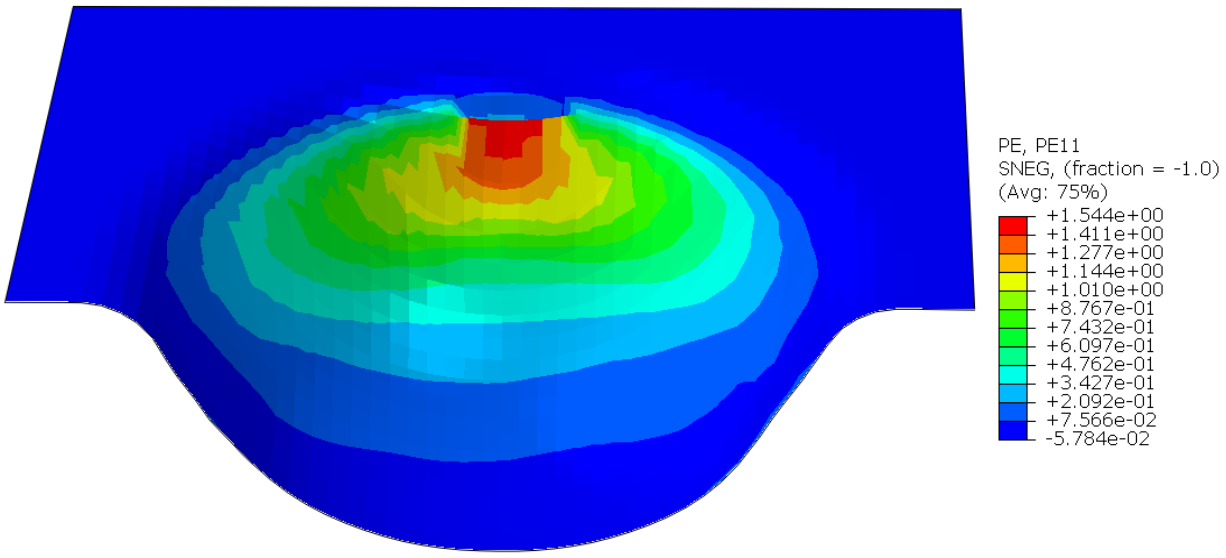


Рис 3.15 – Розподіл пластичних деформацій ε_{11}

На рис. 3.15 показано розподіл пластичних деформацій ε_{11} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{11} = -0{,}057 \div 1{,}544$.

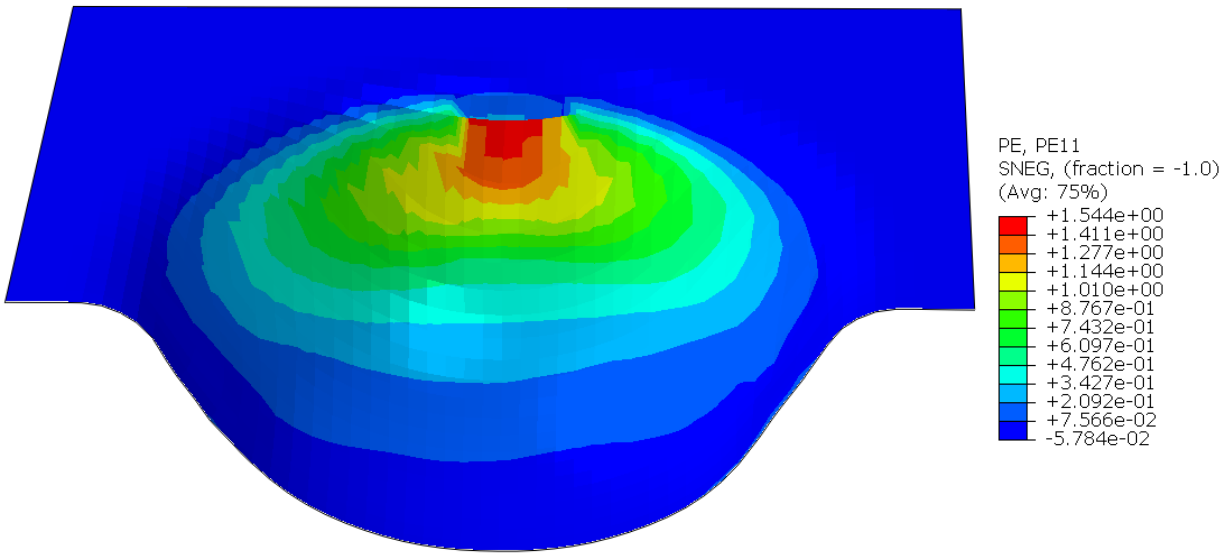


Рис 3.15 – Розподіл пластичних деформацій ε_{11}

На рис. 3.16 показано розподіл пластичних деформацій ε_{22} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{22} = -0{,}057 \div 1{,}544$.

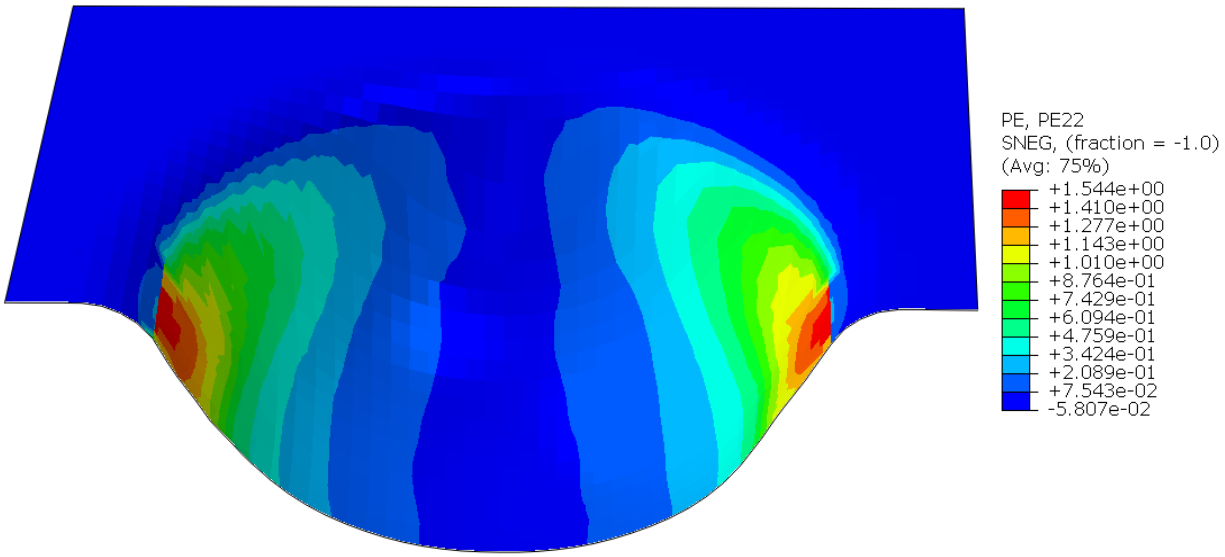


Рис 3.16 – Розподіл пластичних деформацій ε_{22}

На рис. 3.17 показано розподіл пластичних деформацій ε_{33} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{33} = -1{,}6 \div 0{,}058$.

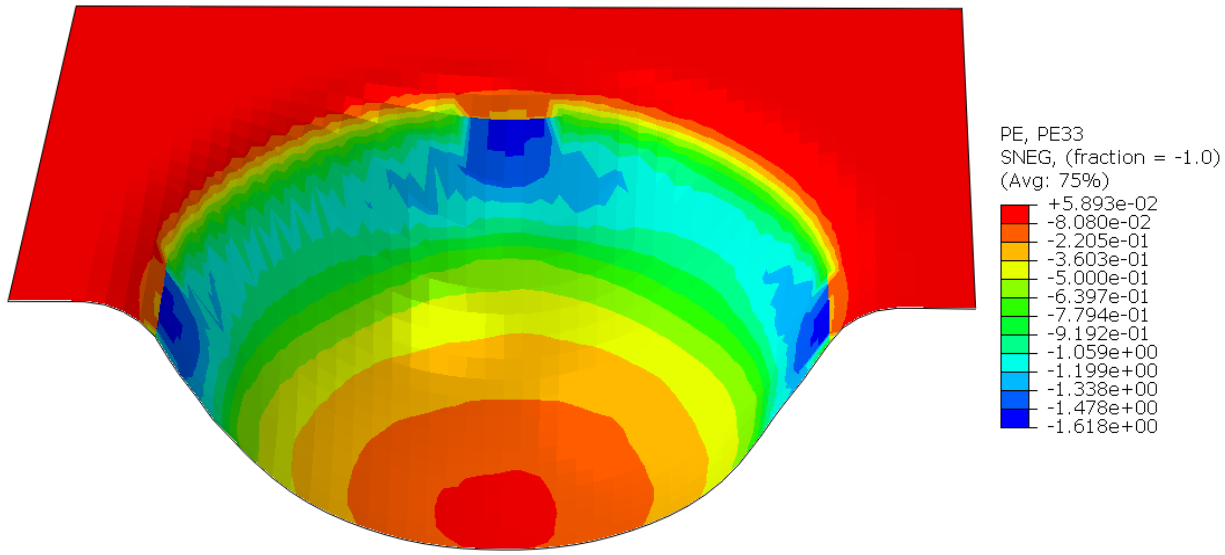


Рис 3.17 – Розподіл пластичних деформацій ε_{33}

На рис. 3.18 показано розподіл пластичних деформацій ε_{12} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $\varepsilon_{12} = -1{,}05 \div 1{,}05$.

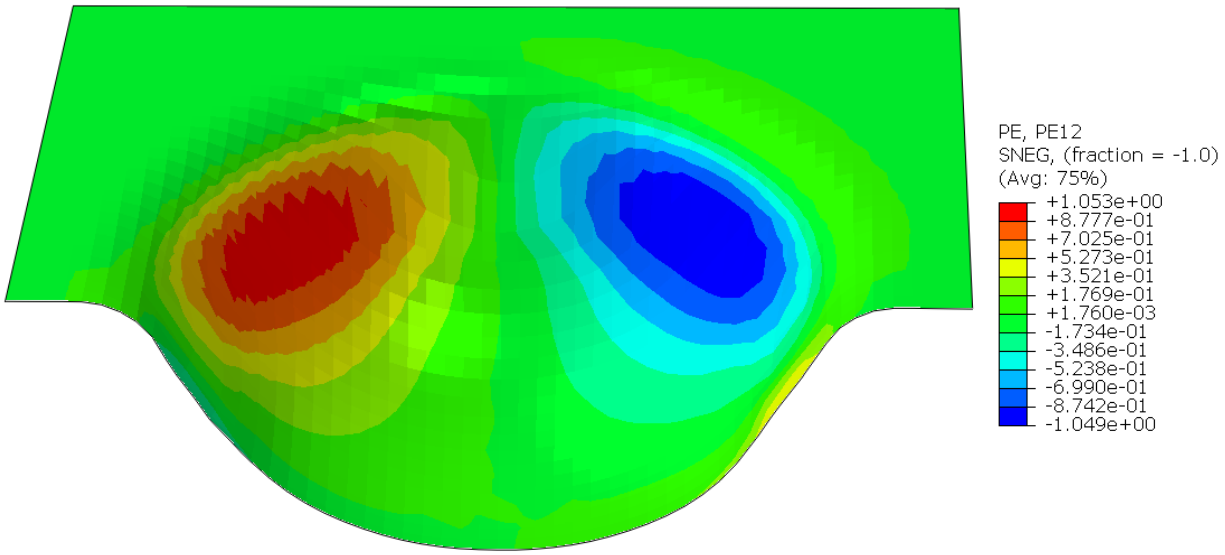


Рис 3.18 – Розподіл пластичних деформацій ε_{12}

На рис. 3.19 показано розподіл максимальних логарифмічних деформацій e_{max} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $e_{max} = -0{,}00012 \div 1{,}548$.

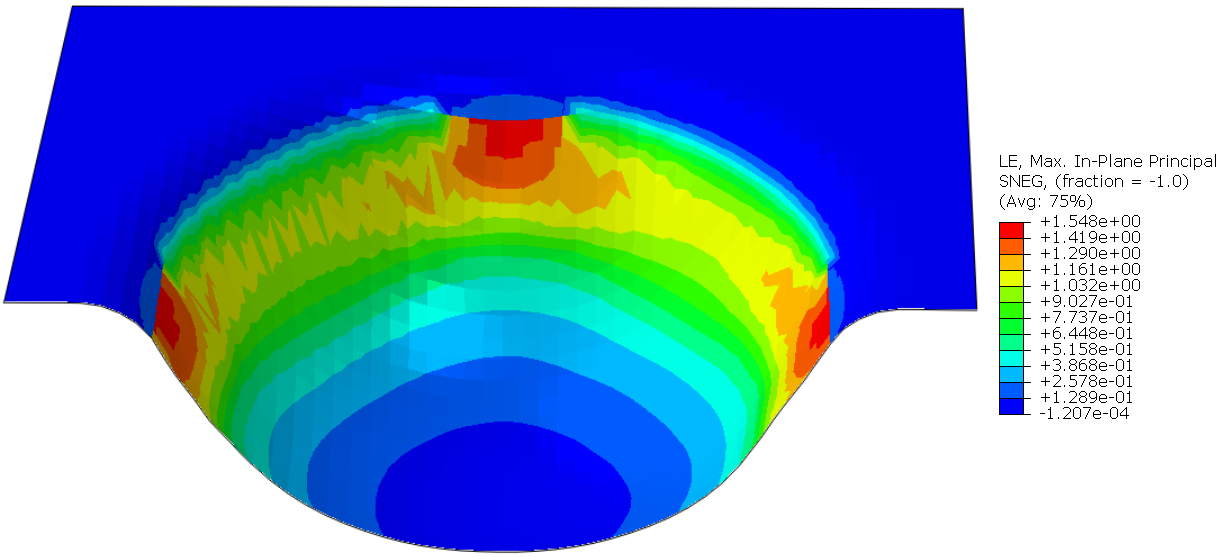


Рис 3.19 – Розподіл максимальних логарифмічних деформацій e_{max}

На рис. 3.20 показано розподіл логарифмічних деформацій e_{11} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $e_{11} = -0{,}057 \div 1{,}545$.

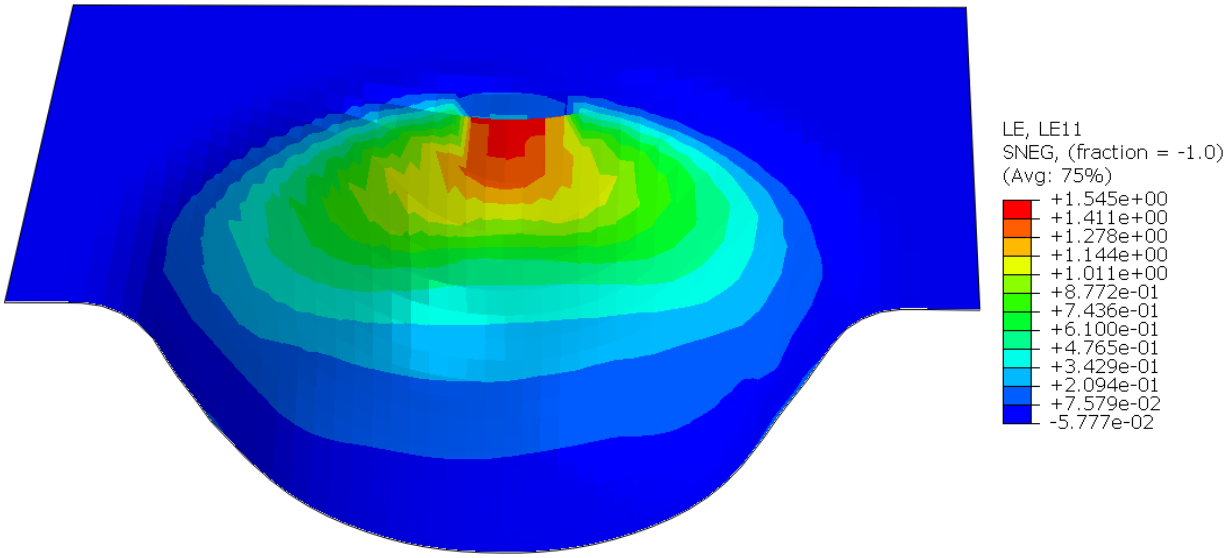


Рис 3.20 – Розподіл логарифмічних деформацій e_{11}

На рис. 3.21 показано розподіл логарифмічних деформацій e_{22} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $e_{22} = -0{,}057 \div 1{,}546$.

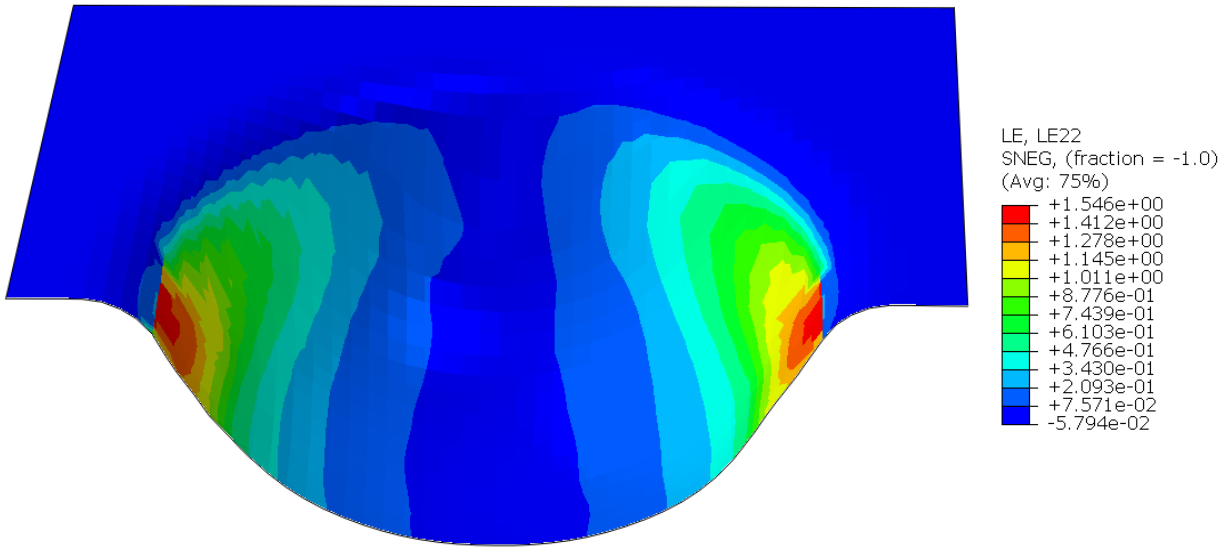


Рис 3.21 – Розподіл логарифмічних деформацій e_{22}

На рис. 3.22 показано розподіл логарифмічних деформацій e_{33} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $e_{33} = -1{,}619 \div 0{,}059$.

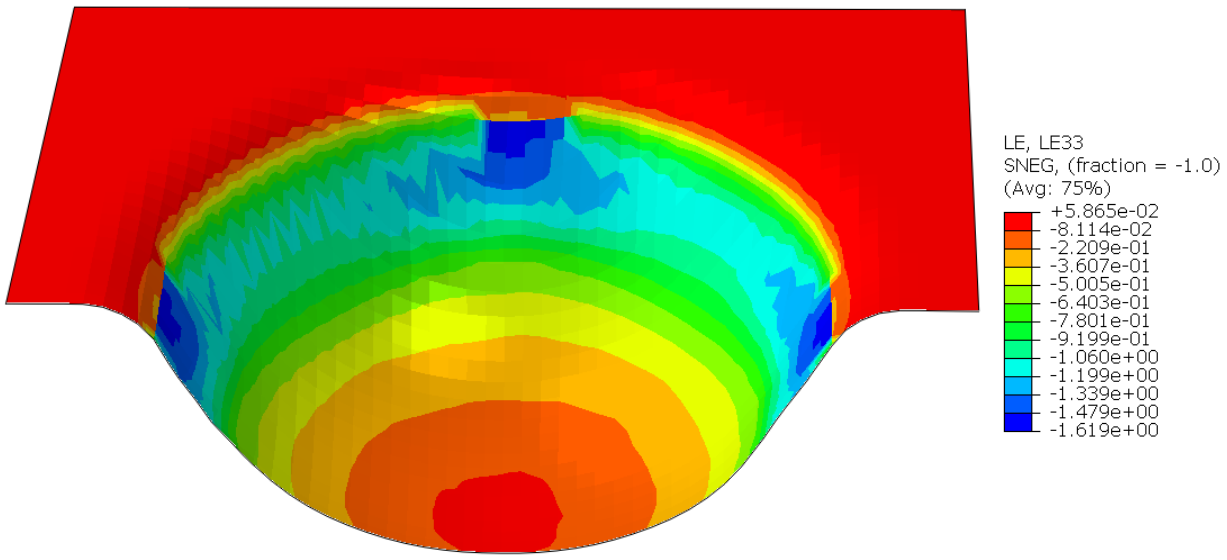


Рис 3.22 – Розподіл логарифмічних деформацій e_{33}

На рис. 3.23 показано розподіл логарифмічних деформацій e_{12} в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $e_{12} = -1{,}055 \div 1{,}058$.

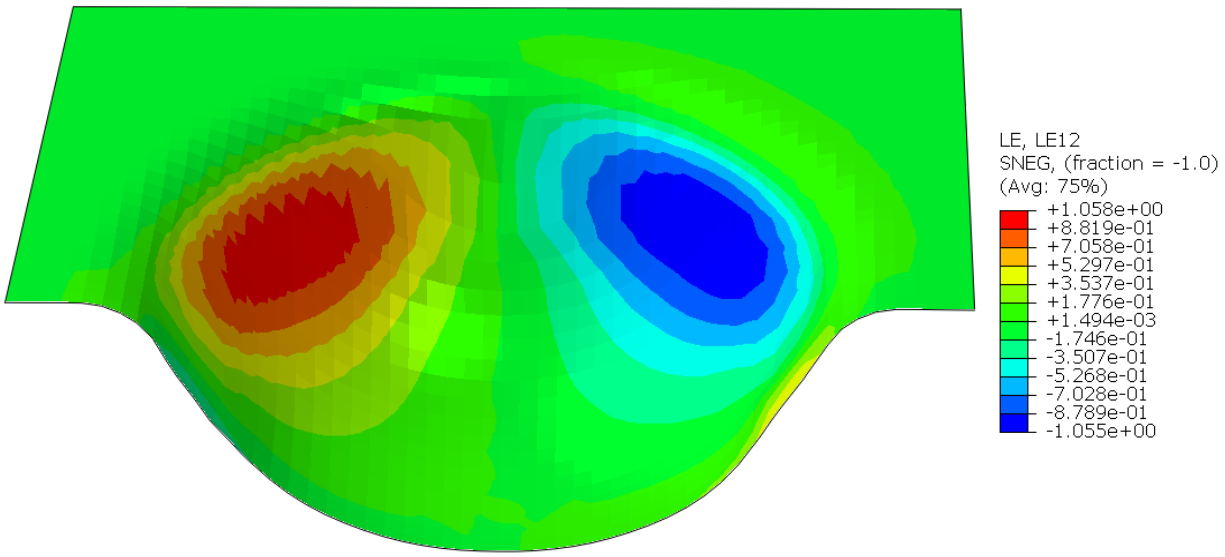


Рис 3.23 – Розподіл логарифмічних деформацій e_{12}

На рис. 3.24 показано розподіл переміщень u_3 в здеформованому напівсферичному виробі. Значення знаходяться в межах $u_3 = 0{,}1 \div 49{,}99$ мм .

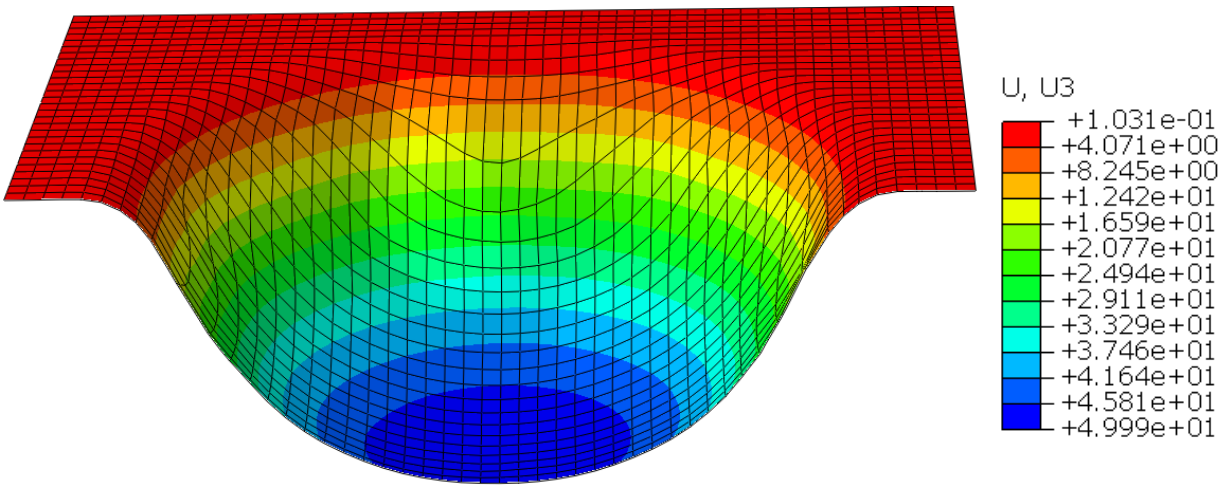


Рис 3.24 – Розподіл переміщень u_3

РОЗДІЛ 4

ПРОЕКТУВАННЯ ШТАМПОВОГО ОСНАЩЕННЯ ДЛЯ ВИТЯГУВАННЯ НАПІВСФЕРИЧНОГО ВИРОБУ

4.1 Технологічний розрахунок для процесу витягування

Встановимо спочатку припуск на обрізування [126] при $H_д = 52$мм

$$\frac{H_д}{d_н} = \frac{52}{102} = 0.51$$

припуск $\Delta H_д = 5{,}0$ мм

Тепер розрахуємо розмір вихідної заготовки для даної деталі із визначеним припуском

Знайдемо площі поверхонь елементарних площин за формулами:

$$f_1 = \pi * d * \Delta H = 3.14 * 102 * 5 = 1601.4\text{мм}^2$$

$$f_1 = \frac{\pi * d^2}{2} = \frac{\pi * 102^2}{2} = 16334.3\text{мм}^2$$

Отже діаметр заготовки визначаємо за формулою

$$D_{заг} = \sqrt{\frac{4 * F}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 * (1601.4 + 16334.3)}{\pi}} = 151.2\text{мм}$$

Розрахунок кількості переходів

Згідно [127] при витягуванні деталей сферичної форми коефіцієнт витягування постійний та становить: m=0.71

Розрахунковий коефіцієнт витягування визначаємо за формулою:

$$m_1 = \frac{d_n}{D_{заг}} = \frac{102}{151{,}2} = 0{,}67$$

Визначення зусилля витягування

Згідно [127] для витягування сферичних деталей використовуємо формулу:

$$P = \pi * d_k * S * \sigma_в * K_ф = \pi * 50 * 2 * 9 * 0{,}30 = 847{,}8\text{кгс}$$

де :$d_k = 0.5$ діаметра сферичної деталі

S – товщина стінки

$\sigma_в = 7{,}5 - 11\ \text{кгс/мм}^2$

$K_{\text{ф}} = 0{,}30$

4.2. Загальний вигляд штампу.

Для типової напівсферичної вісесиметричної порожнистої деталі (рис. 4.1) був спроектований штамп для витягування із жорстким притискачем.

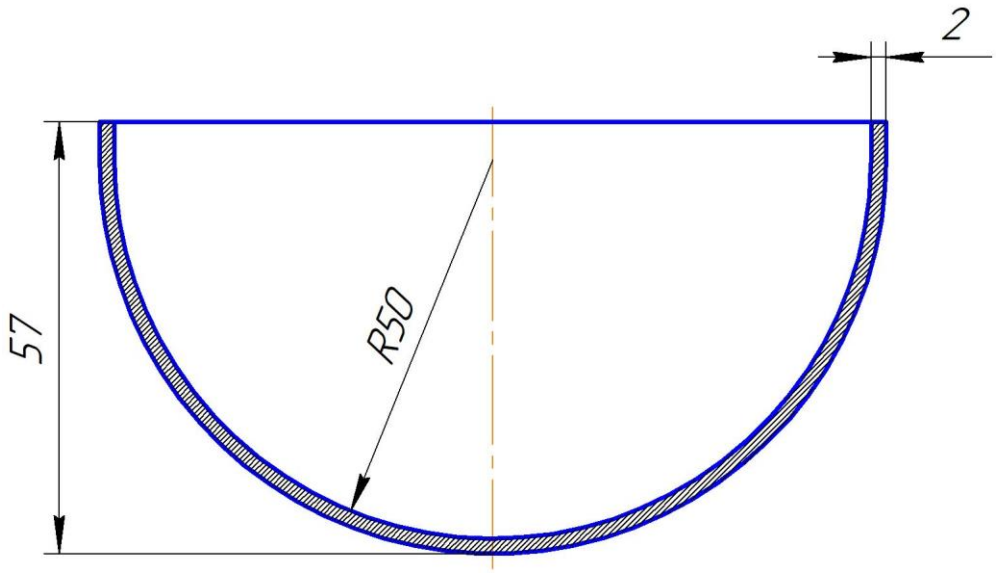


Рис 4.1 – Напівсферична деталь.

При моделюванні у програмному середовищі DEFORM (рис. 2.10) було визначено зусилля витягування. Зусилля на пуансоні становить $P_{\text{вит}} = 220$ кН, на притискачі $P_{\text{прит}} = 50$ кН, тому приймаємо жорсткий притискач.

Тип блоку штампа – із осьовим розташуванням колонок.

Колонки приймаємо гладкі за ГОСТ 13118-83.

Втулки приймаємо гладкі за ГОСТ 13120-83.

Хвостовик приймаємо з буртиком за ГОСТ 16715-83.

В штампі використовуємо підкладну стальну плитку товщиною 8 мм між пуансонотримачем та верхньою плитою штампа. Вона для того, щоб пуансон не впирався у хвостовик.

Загальний вигляд спроектованого штампа для витягування показано на рис. 4.2.

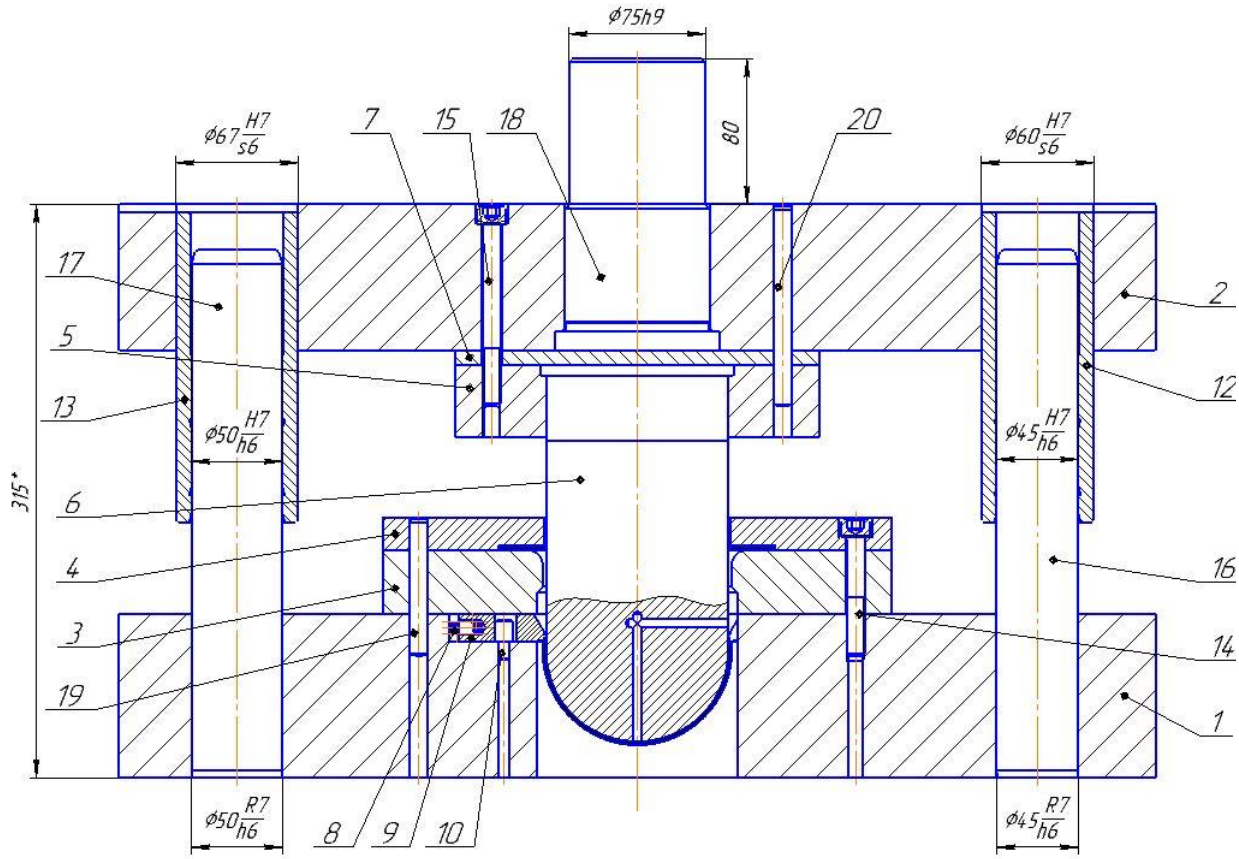


Рис 4.2 – Загальний вигляд штампу для витягування напівсферичного виробу

Опис конструкції штампу

До нижньої плити штампу 1 із використанням гвинтів 14 та штифтів 19 кріпляться матриця 3 та жорсткий притискач 4. Знімачі 9 із упорами 10 та пружинами 8 встановлені в нижню плиту.

До верхньої плити 2 із використанням гвинтів 15 та штифтів 20 кріпляться підкладна плитка 7 та пуансонотримач 5. В пуансонотримач встановлено пуансон для витягування 6. Також у верхню плиту запресований хвостовик 18. За допомогою нього верхня частина штампу кріпиться до повзуна преса.

Для забезпечення руху верхньої плити відносно нижньої використовуються колонки 16, 17 та втулки 12, 13.

Робота штампа

Вихідна заготовка вкладається в паз у притискачі 4. При опусканні верхньої частини штампу вниз, відбувається витягування деталі пуансоном 6. При підніманні пуансона напівсферична деталь знімається з нього за допомогою знімачів 9. Готовий напівфабрикат випадає через отвір в плиті.

Даний штамп встановлюється на однокривошипний прес К2130 зусиллям 1000 кН. Його характеристики наведено в табл. 4.1.

Таблиця 4.1 – Основні характеристики пресу К2130

Модель преса	К2130
Номінальне зусилля, кН	1000
Хід повзуна: - найменший - найбільший	 25 130
Робота пресу, кДж	4,35
Закрита висота преса, мм	400
Товщина підштампової плити, мм	100
Розміри стола пресу, мм	850х560
Діаметр більшого центрального отвору у підштамповій плиті, мм	240
Діаметр меншого центрального отвору у підштамповій плиті, мм	200
Діаметр отвору в повзуні преса, мм	75

4.2. Розрахунок виконавчих розмірів пуансону та матриці.

Виконавчі діаметральні розміри пуансону та матриці для витягування напівсферичного виробу розраховуємо за формулами [126, ст. 286]:

$$L_{\text{м}} = (L - \Delta)^{+\delta_{\text{м}}}$$

$$L_{\text{п}} = (L - \Delta - 2 \cdot z_{\text{вт}})_{-\delta_{\text{п}}}$$

де $L = \emptyset 104$ мм – номінальний зовнішній діаметр виробу, що витягується; $\Delta = 0{,}87$ мм – допуск на розмір напівфабрикату по $h14$ [126, ст. 65, табл. 13]; $z_{\text{вт}} = s + 0{,}02 \cdot \sqrt{10 \cdot s} = 2 + 0{,}02 \cdot \sqrt{10 \cdot 2} = 2{,}1$ – односторонній зазор між матрицею та пуансоном для товщини матеріалу 2 мм із алюмінію [126, ст. 287]; $\delta_{\text{м}} = +0{,}15$ мм, $\delta_{\text{п}} = -0{,}1$ мм – граничні відхилення витяжних матриці та пуансона відповідно при товщині матеріалу

2 мм для розміру 104 мм [127, ст. 411, табл. 196].

Отже:

$$L_{\text{м}} = (L - \Delta)^{+\delta_{\text{м}}} = (\emptyset 104 - 0{,}87)^{+0{,}15} = \emptyset 103{,}13^{+0{,}15} \text{ мм}$$

$$L_{\text{п}} = (L - \Delta - 2 \cdot z_{\text{вт}})_{-\delta_{\text{п}}} = (\emptyset 104 - 0{,}87 - 2 \cdot 2{,}1)_{-0{,}1} = \emptyset 98{,}93_{-0{,}1}$$

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході магістерської дисертації була проведена робота, яка направлена на дослідження та моделювання процесу отримання напівсферичного виробу інкрементним формуванням.

1. Проведено аналіз сучасного стану досліджень по інкрементному формуванню. Продемонстровано потенціал формування металу, що включаєінкрементальний підхід для виробництва широкого спектру виробленої продукції. Наведений широкий спектрекспериментальних, аналітичних та чисельних аналізів процесів AISF та ISF. На основі проведеного огляду встановлено ряд областей, які потребують подальшого дослідження.
2. Виконано розрахунок процесу отримання напівсферичної деталікласичним способом витягування. Встановлено, що витягування виконується за один перехід із заготовки Ø152мм.
3. Проведено скінченно-елементне моделювання штампування напівсферичного виробу із притискачем та без притискача в DEFORM - 2D та DEFORM – 3D. Встановлено напружено-деформований стан металу та кінцеві форми та розміри витягнутого виробу. Встановлено, що максимальне потоншення при моделюванні в DEFORM – 2D становить 15% при витягуванні з притискачем та без нього, в DEFORM – 3D становить 22%.
4. Проведено комп’ютерне моделювання інкрементного формування напівсферичного виробу в програмному комплексі Abaqus. Встановлено, напружено-деформований стан металу та розподіл товщини по деталі. Максимальне потоншення становить 69%.
5. Розроблено штампове оснащення для отримання напівсферичного виробу витягуванням.

Список використаної літератури

1. Jackson, K. P., 2008. The Mechanics of Incremental Sheet Forming. PhD Thesis, University of Cambridge. DOI: https://doi.org/10.17863/CAM.13766.
2. Shima, S., 2001. State of the art - Incremental forming. In: 3rd International Conference on Intelligent Processing and Manufacturing of Materials. Vancouver, Canada.
3. Jeswiet, J., Micari, F., Hirt, G., Bramley, A., Duflou, J., and Allwood, J., 2005. Asymmetric Single Point Incremental Forming of Sheet Metal. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **54(2)**: pp. 88-114.
4. Jeswiet, J. and Hagan, E., 2001. Rapid Proto-typing of a Headlight with Sheet Metal. In: 9th International Conference on Sheet Metal. Leuven. pp. 165-170.
5. Kleiner, M., Geiger, M., and Klaus, A., 2003. Manufacturing of Lightweight Components by Metal Forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **52(2)**: pp. 521-542.
6. Jeswiet, J., 2004. Single PointI ncremental Forming: recent results. In: Seminar on Incremental Forming. Cambridge University.
7. Ambrogio, G., De Napoli, L., Filice, L., Gagliardi, F., and Muzzupappa, M., 2005. Application of Incremental Forming process for high customised medical product manufacturing. Journal of Materials Processing Technology. **162-163**: pp. 156-162.
8. Tanaka, S., Nakamura, T., Hayakawa, K., Nakamura, H., and Motomura K., 2005. Incremental Sheet Metal Forming Process for Pure Titanium Denture Plate In: 8th International Conference on Technology of Plasticity - ICTP. pp. 135-136.
9. Silva, M.B., Skjoedt, M., Vilaça, P., Bay, N., and Martins, P.A.F., 2009. Single point incremental forming of tailored blanks produced by friction stir welding. Journal of Materials Processing Technology. **209(2)**: pp. 811-820.
10. Kopp, R.a.S., J., 2002. Flexible Sheet Forming Technology by Double-sided Simultaneous Shot Peen Forming. Annals of CIRP. **Vol.51/1/2002**.
11. Petek, A., Jurisevic, B., Kuzman, K., and Junkar, M., 2009. Comparison of alternative approaches of single point incremental forming processes. Journal of Materials Processing Technology. **209(4)**: pp. 1810-1815.
12. Hirt, G., 2004. Tools and Equipment used in Incremental Forming. In: 1st Incremental Forming Workshop, University of Saarbrucken. On Cdrom.
13. 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.
14. Leach, D., Green, A.J., and Bramley, A.N., 2001. A new incremental sheet forming process for small batch and prototype parts. In: 9th International Conference on Sheet Metal. Leuven. pp. 211-218.
15. Hirt, G., Bambach, M., Junk, S., and Chouvalova, I., 2003. FEM modelling and optimisation of geometric accuracy in incremental CNC sheet forming, Developments in Equipment Based Accuracy. In: CIRP international conference

on accuracy in forming technology (ICAFT/10). Chemnitz. pp. 293-304.
16. Ambrogio, G., Costantino, I., De Napoli, L., Filice, L., Fratini, L., and Muzzupappa, M., 2004. Influence of some relevant process parameters on the dimensional accuracy in incremental forming: a numerical and experimental investigation. Journal of Materials Processing Technology. **153-154**: pp. 501-507.
17. Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., Micari, F., and Umbrello, D., 2005. Application of the neural network technique for reducing springback in incremental forming processes. In: 8th ESAFORM Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 699-702.
18. Duflou, J., Lauwers, B., Verbert, J., Tunckol, Y., and De Baerdemaeker, H., 2005. Achievable accuracy in single point incremental forming: Case studies. In: 8th ESAFORM Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 675-678.
19. Filice, L., Fratini, L., and Micari, F., 2002. Analysis of Material Formability in Incremental Forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **51(1)**: pp. 199-202.
20. Iseki, H. and Naganawa, T., 2002. Vertical wall surface forming of rectangular shell using multistage incremental forming with spherical and cylindrical rollers. Journal of Materials Processing Technology. **130-131**: pp. 675-679.
21. Bambach, M., Hirt, G., and Junk, S., 2003. Modelling and experimental evaluation of the incremental CNC sheet metal forming process. In: Proceedings of the 7th International Conference on Computational Plasticity. Barcelona, Spain. pp. 1-17.
22. Hirt, G., Ames, J., and Bambach, M., 2005. A new forming strategy to realise parts designed for deep-drawing by incremental CNC sheet forming. Steel Research. **76(2005)**: pp. 2-3.
23. Jeswiet, J., Young, D., and Ham, M., 2005. Non-traditional forming limit diagrams for incremental forming. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 409-416.
24. Dai, K., Wang, Z.R., and Fang, Y., 2000. CNC incremental sheet forming of an axially symmetric specimen and the locus of optimization. Journal of Materials Processing Technology. **102(1-3)**: pp. 164-167.
25. Kim, T.J. and Yang, D.Y., 2000. Improvement of formability for the incremental sheet metal forming process. International Journal of Mechanical Sciences. **42(7)**: pp. 1271-1286.
26. Young, D. and Jeswiet, J., 2004. Wall thickness variations in single-point incremental forming. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **218(11)**: pp. 1453-1459.
27. Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., and Micari, F., 2005. Sheet thinning prediction in single point incremental forming. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 479-486.
28. Bambach, M., Ames, J., Azaouzi, M., Campagne, L., Hirt, G., and Batoz, J.L., 2005. Initial experimental and numerical investigations into a class of new strategies for single point incremental sheet forming (SPIF). In: 8th ESAFORM

Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 671-674
29. Fratini, L., Ambrogio, G., Di Lorenzo, R., Filice, L., and Micari, F., 2004. Influence of mechanical properties of the sheet material on formability in single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **53(1)**: pp. 207-210.
30. Ambrogio, G., Filice, L., De Napoli, L., and Muzzupappa, M., 2005. A simple approach for reducing profile diverting in a single point incremental forming process. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **219(11)**: pp. 823-830.
31. Watzeels, K., Tunckol, Y., Henrard, C., Gu, J., Sol, H., Duflou, J., and Habraken, A.M., 2005. Experimental validation of the finite element simulation of the first stroke in single point incremental forming. In: 8th ESAFORM Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 703-706.
32. Kitazawa, K., 1993. Incremental sheet metal stretch-expanding with CNC machine tools. In: Proceedings of the 4th International Conference on Technology of Plasticity. pp. 1899-1904.
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.
34. Shim, M. and Park, J.J., 2001. The formability of aluminum sheet in incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **113(1-3)**: pp. 654-658.
35. Kim, Y.H. and Park, J.J., 2002. Effect of process parameters on formability in incremental forming of sheet metal. Journal of Materials Processing Technology. **130-131**: pp. 42-46.
36. Duflou, J., Szekeres, A., and VanHerck, P., 2005. Force Measurements for Single Point Incremental Forming: and experimental study. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 441-448.
37. Duflou, J., Tunçkol, Y., Szekeres, A., and Vanherck, P., 2007. Experimental study on force measurements for single point incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **189(1-3)**: pp. 65-72.
38. Bologa, O., Oleksik, V., and Racz, G., 2005. Experimental research for determining the forces on incremental sheet forming process. In: 8th ESAFORM Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 317-320.
39 Jeswiet, J., Duflou, J., and Szekeres, A., 2005. Forces in Single Point and Two point Incremental Forming. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 449-456.
40. Ambrogio, G., Filice, L., Gagliardi, F., and Micari, F., 2005. Three-dimensional FE simulation of single point incremental forming: experimental evidences and process design improving. In: 8th International Conference on Computational Plasticity. Barcelona. pp. 1-4.
41. Dejardin, S., Gelin, J., and Thibaud, S., 2010. On-Line Thickness Measurement in Incremental Sheet Forming Process. Steel Research International. **81(9)**: pp. 938-941.
42. Hagan, E. and Jeswiet, J., 2004. Analysis of surface roughness for parts formed by computer numerical controlled incremental forming. Proceedings of

theInstitution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **218(10)**: pp. 1307-1312.
43. Martins, P.A.F., Bay, N., Skjoedt, M., and Silva, M.B., 2008. Theory of single point incremental forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **57(1)**: pp. 247-252.
44. Silva, M.B., Skjoedt, M., Atkins, A.G., Bay, N., and Martins, P.A.F., 2008. Single point incremental forming and formability–failure diagrams. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. **43(1)**: pp. 15-35.
45. Silva, M.B., Skjoedt, M., Martins, P.A.F., and Bay, N., 2008. Revisiting the fundamentals of single point incremental forming by means of membrane analysis. International Journal of Machine Tools and Manufacture. **48(1)**: pp. 73-83.
46. Marciniak, Z. and Kuczynski, K., 1967. Limit Strains in the Processes of Stretch-forming Sheet Metal. International Journal of Mechanical Sciences. **9**: pp. 609-620.
47. Allwood, J., Shouler, D.R., and Tekkany, A.E., 2007. The increased forming limits of incremental sheet forming processes. In: SheMet '07 International Conference on Sheet Metal. Palermo, Italy. pp. 621-628.
48. Eyckens, P., Del-lero Moreau, J., Duflou, J., Van Bael, A., and Van Houtte, P., 2009. MK modelling of sheet formability in the incremental sheet forming process, taking into account through-thickness shear. International Journal of Material Forming. **2**: pp. 379-382.
49. Eyckens, P., Van Bael, A., and Van Houtte, P., 2009. Marciniak-Kuczynski type modelling of the effect of Through-Thickness Shear on the forming limits of sheet metal. International Journal of Plasticity. **25(12)**: pp. 2249-2268.
50. ABAQUS, I., 2007. ABAQUS User Manuals, Version 6.7. United State of America.
51. Ambrogio, G., Filice, L., and Manco, G., 2008. Considerations on the Incremental Forming of Deep Geometries. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1143-1146.
52. Hirt, G., Junk, S., and Witulsky, N., 2002. Incremental sheet forming: Quality evaluation and process simulation. In: 7th International Conference on Technology of Plasticity-ICTP Yokohama, Japan. pp. 925-930.
53. Qin, Q., Masuku, E.S., Bramley, A.N., Mileham, A.R., and Owen, G.W., 2005. Incremental sheet forming simulation and accuracy. In: 8th International Conference on Technology of Plasticity-ICTP. Verona, Italy.
54. He, S., Van Bael, A., Van Houtte, P., Tunckol, Y., Duflou, J., Henrard, C., Bouffioux, C., and Habraken, A.M., 2005. Effect of FEM choices in the modelling of incremental forming of aluminium sheets. In: 8th ESAFORM Conference. Cluj-Napoca, Romania. pp. 711-714.
55. Decultot, N., Velay, V., Robert, L., Bernhart, G., and Massoni, E., 2008. Behaviour modelling of aluminium alloy sheet for single point incremental forming. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1151-1154.
56. Bambach, M., 2007. Process Strategies and Modelling Approaches for

Asymmetric Incremental Sheet Forming. PhD Thesis, Materials Technology/Precision Forming, Saarland University, Saarbrücken, Germany.
57. Bambach, M. and Hirt, G., 2007. Error analysis in explicit finite element analysis of incremental sheet forming. In: Numiform '07.
58. Hadoush, A. and van den Boogaard, A.H., 2008. Time reduction in implicit single point incremental sheet forming simulation by refinement - derefinement. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1167-1170.
59. Hadoush, A. and van den Boogaard, A., 2009. Substructuring in the implicit simulation of single point incremental sheet forming. International Journal of Material Forming. **2(3)**: pp. 181-189.
60. Lasunon, O. and Knight, W., 2007. Comparative investigation of single-point and double-point incremental sheet metal forming processes. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **221(12)**: pp. 1725-1732.
61. Dejardin, S., Thibaud, S., and Gelin, J., 2008. Finite element analysis and experimental investigations for improving precision in single point incremental sheet forming process. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 121-124.
62. Matsubara, S., 2001. A computer numerically controlled dieless incremental forming of a sheet metal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **215(7)**: pp. 959-966.
63. Hirt, G., Junk, S., Bambach, M., and Chouvalova, I., 2003. Process limits and material behaviour in incremental sheet forming with CNC-Tools. In: THERMEC 2003 International Conference on Processing & Manufacturing of Advanced Materials-Fabrication, Properties, Applications. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP). Madrid, Spain. pp. 3825-3830.
64. Hussain, G., Hayat, N., and Gao, L., 2008. An experimental study on the effect of
thinning band on the sheet formability in negative incremental forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture. **48(10)**: pp. 1170-1178.
66. Landert, M., 2006. Forming behaviour of metal sandwich sheets. PhD Thesis, Department of Materials Science and Metallurgy, Cambridge University.
67. Le, V., Ghiotti, A., and Lucchetta, G., 2008. Preliminary Studies on Single Point Incremental Forming for Thermoplastic Materials. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1179-1182.
68. Franzen, V., Kwiatkowski, L., Martins, P.A.F., and Tekkaya, A.E., 2009. Single point incremental forming of PVC. Journal of Materials Processing Technology. **209(1)**: pp. 462-469.
69. Martins, P.A.F., Kwiatkowski, L., Franzen, V., Tekkaya, A.E., and Kleiner, M., 2009. Single point incremental forming of polymers. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **58(1)**: pp. 229-232.
70. Allwood, J., King, G.P., and Duflou, J., 2005. A structured search for applications of the incremental sheet-forming process by product segmentation.

Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **219(2)**: pp. 239-244.
71. Tanaka, S., Nakamura, T., and Hayakawa, K., 2002. Minature incremental forming of millimetre-sized thin shell structures. Advanced Technology of Plasticity (Proceedings of the 7th International Conference on Technology of Plasticity-ICTP, Yokohama, Japan). pp. 403-408.
72. Jyllilä, M., 2006. Presentation: 'Incremental sheet forming as a part of a sheet metal business'. In: International Seminar on Novel Sheet Metal Forming Technologies. Jvyäskylä, Finland.
73. Junk, S., Hirt, G., and Chouvalova, I., 2003. Forming Strategies and Tools in Incremental Sheet Forming. In: SheMet '03 International Conference on Sheet Metal. University of Ulster, Ireland. Institute of Materials Technology/Precision Forming (LWP). pp. 57-64.
74. Wang, Y., Xiao, X., Yuan, Z., and Wu, W., 2010. Incremental Sheet Metal Forming with Multiple-Head Tools. Steel Research International. **81(9)**: pp. 922-925.
75. He, S., Bael, A.V., Houtte, P.V., Szekeres, A., Duflou, J.R., Henrard, C., and Habraken, A.M., 2005. Finite element modelling of incremental forming of aluminium sheets. In: SheMet '05 International Conference on Sheet Metal. Erlangen, Germany. pp. 525-532.
76. Iseki, H., 2001. An approximate deformation analysis and FEM analysis for the incremental bulging of sheet metal using a spherical roller. Journal of Materials Processing Technology. **111(1-3)**: pp. 150-154.
76. Duflou, J., Tunckol, Y., and Aerens, R., 2007. Force analysis for single point incremental forming. In: SheMet '07 International Conference on Sheet Metal. Palermo, Sicily. pp. 543-550.
77. Bouffioux, C., Eyckens, P., Henrard, C., Aerens, R., Van Bael, A., Sol, H., Duflou, J.R., and Habraken, A.M., 2008. Identification of material parameters to predict Single Point Incremental Forming forces. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1147-1150.
78. Durante, M., Formisano, A., Langella, A., and Capece Minutolo, F.M., 2009. The influence of tool rotation on an incremental forming process. Journal of Materials Processing Technology. **209(9)**: pp. 4621-4626.
79. Katajarinne, T., Komulainen, A., and Kivivuori, S., 2010. Force and Frictional Conditions in Incremental Forming. Steel Research International. **81(9)**: pp. 934-937.
80. Iseki, H., Kato, K., and Sakamoto, S., 1993. Forming limit of flexible and incremental sheet metal bulging with a spherical roller. In: Proceedings of the 4th International Conference on Technology of Plasticity. pp. 1635-1904.
81. Hirt, G., Bambach, M., and Junk, S., 2003. Modelling of the incremental CNC sheet metal forming process. In: Proceeding of the 10th International Conference on Sheet Metal. Leuven.
82. Park, J.-J. and Kim, Y.-H., 2003. Fundamental studies on the incremental sheet metal forming technique. Journal of Materials Processing Technology. **140(1-3)**:

pp. 447-453.
83. Jeswiet, J. and Young, D., 2005. Forming limit diagrams for single-point incremental forming of aluminium sheet. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **219(4)**: pp. 359-364.
84. Matsubara, S., 1994. Incremental backward bulge forming of a sheet metal with a hemispherical head tool - A study of a numerically controlled forming system. Journal of the Japanese Society of Technology of Plasticity (Plasticity and Processing). **35(406)**: pp. 1311-1321.
85. Shankar, R., Jadhav, S., Goebel, R., Homberg, W., and Kleiner, M., 2005. Incremental sheet metal forming of preformed sheets. In: 8th International Conference on Technology of Plasticity-ICTP. Verona, Italy.
86. Hirt, G., Junk, S., Bambach, M., Chouvalouva, I., and Ames, J., 2003. Flexible CNC incremental sheet forming: Process evaluation and simulation. In: 6th National Conference on Sheet Metal Forming. Porto Alegre/RS, Brasilien. pp. 30-38.
87. Jackson, K. and Allwood, J., 2009. The mechanics of incremental sheet forming. Journal of Materials Processing Technology. **209(3)**: pp. 1158-1174.
88. Hussain, G., Dar, N.U., Gao, L., and Chen, M.H., 2007. A comparative study on the forming limits of an aluminum sheet-metal in negative incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **187-188**: pp. 94-98.
89. Hussain, G. and Gao, L., 2007. A novel method to test the thinning limits of sheet
metals in negative incremental forming. International Journal of Machine Tools and Manufacture. **47(3-4)**: pp. 419-435.
90. Hussain, G., Gao, L., and Dar, N.U., 2007. An experimental study on some formability evaluation methods in negative incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **186(1-3)**: pp. 45-53.
91. Hussain, G., Gao, L., Hayat, N., and Ziran, X., 2009. A new formability indicator in single point incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **209(9)**: pp. 4237-4242.
92. Hussain, G., Gao, L., and Zhang, Z., 2008. Formability evaluation of a pure titanium sheet in the cold incremental forming process. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. **37(9)**: pp. 920-926.
93. Hussain, G., Gao, L., and Hayat, N., 2009. Empirical modelling of the influence of operating parameters on the spifability of a titanium sheet using response surface methodology. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **223(1)**: pp. 073-081.
94. Ham, M. and Jeswiet, J., 2006. Single Point Incremental Forming and the Forming Criteria for AA3003. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **55(1)**: pp. 241-244.
95. Ham, M. and Jeswiet, J., 2007. Forming Limit Curves in Single Point Incremental Forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **56(1)**: pp. 277-280.

96. Jeswiet, J., Hagan, E., and Szekeres, A., 2002. Forming parameters for incremental forming of aluminium alloy sheet metal. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **216(10)**: pp. 1367-1371.
97. 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.
98. Micari, F., 2005. Some remarks on material formability in single point incremental forming of sheet metal. In: 8th International Conference on Technology of Plasticity-ICTP. Verona, Italy.
99. Ambrogio, G., Filice, L., Fratini, L., and Micari, F., 2004. Process Mechanics analysis in single point incremental forming. In: NUMIFORM 2004-Proceedings of the 8th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes. Columbus, Ohio. pp. 922-927.
100. Emmens, W.C. and Van Den Boogaard, A.H., 2008. Tensile tests with bending: a mechanism for incremental forming. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1155-1158.
101. Allwood, J. and Shouler, D.R., 2009. Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states. International Journal of Plasticity. **25(7)**: pp. 1207-1230.
102. Bambach, M., Todorova, M., and Hirt, G., 2007. Experimental and numerical analysis of forming limits in CNC incremental sheet forming. In: SheMet '07 International Conference on Sheet Metal. Palermo, Sicily. pp. 511-518.
103. Emmens, W.C., 2007. Strain in shear, and material behaviour in incremental forming. In: SheMet '07 International Conference on Sheet Metal. Palermo, Sicily. pp. 519-526.
104. Fiorentino, A., Ceretti, E., Attanasio, A., Mazzoni, L., and Giardini, C., 2009. Analysis of forces, accuracy and formability in positive die sheet incremental forming. International Journal of Material Forming. **2**: pp. 805-808.
105. Micari, F., Ambrogio, G., and Filice, L., 2007. Shape and dimensional accuracy in Single Point Incremental Forming: State of the art and future trends. Journal of Materials Processing Technology. **191(1-3)**: pp. 390-395.
106. Hirt, G., Ames, J., Bambach, M., and Kopp, R., 2004. Forming strategies and Process Modelling for CNC Incremental Sheet Forming. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **53(1)**: pp. 203-206.
107. Rauch, M., Hascoet, J., Hamann, J., and Plennel, Y., 2008. A new approach for toolpath programming in Incremental Sheet Forming. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1191-1194.
108. Filice, L., Ambrogio, G., and Micari, F., 2006. On-Line Control of Single Point Incremental Forming Operations through Punch Force Monitoring. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **55(1)**: pp. 245-248.
109. Attanasio, A., Ceretti, E., and Giardini, C., 2006. Optimization of tool path in two points incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **177(1-3)**: pp. 409-412.

110. Attanasio, A., Ceretti, E., Giardini, C., and Mazzoni, L., 2008. Asymmetric two points incremental forming: Improving surface quality and geometric accuracy by tool path optimization. Journal of Materials Processing Technology. **197(1-3)**: pp. 59-67.
111. Bambach, M., Cannamela, M., Azaouzi, M., Hirt, G., and Batoz, J.L., 2007. Computer-aided tool path optimization for single point incremental sheet forming. Advanced Methods in Material Forming. pp. 233-250.
112. Oleksik, V., Bologa, O., Breaz, R., and Racz, G., 2008. Comparison between the
numerical simulations of incremental sheet forming and conventional stretch forming process. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1187-1190.
113. Duflou, J.R., Verbert, J., Belkassem, B., Gu, J., Sol, H., Henrard, C., and Habraken, A.M., 2008. Process window enhancement for single point incremental forming through multi-step toolpaths. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **57(1)**: pp. 253-256.
114. Verbert, J., Belkassem, B., Henrard, C., Habraken, A., Gu, J., Sol, H., Lauwers, B., and Duflou, J., 2008. Multi-Step toolpath approach to overcome forming limitations in single point incremental forming. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1203-1206.
115. Skjoedt, M., Bay, N., Endelt, B., and Ingarao, G., 2008. Multi Stage Strategies for Single Point Incremental Forming of a Cup. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1199-1202.
116. Bambach, M., Taleb Araghi, B., and Hirt, G., 2009. Strategies to improve the geometric accuracy in asymmetric single point incremental forming. Production Engineering. **3(2)**: pp. 145-156.
117. Franzen, V., Kwiatkowski, L., Sebastiani, G., Shankar, R., Tekkaya, A., and Kleiner, M., 2008. Dyna-Die: Towards Full Kinematic Incremental Forming. International Journal of Material Forming. **1**: pp. 1163-1166.
118. Duflou, J.R., Callebaut, B., Verbert, J., and De Baerdemaeker, H., 2007. Laser Assisted Incremental Forming: Formability and Accuracy Improvement. CIRP Annals - Manufacturing Technology. **56(1)**: pp. 273-276.
119. Duflou, J.R., Callebaut, B., Verbert, J., and De Baerdemaeker, H., 2008. Improved SPIF performance through dynamic local heating. International Journal of Machine Tools and Manufacture. **48(5)**: pp. 543-549.
120. Hino, R., Nagaishi, N., Yamamoto, Y., Naka, T., and Yoshida, F., 2010. Incremental Forming with Local Heating for Aluminum-Magnesium Alloy Sheet. Steel Research International. **81(9)**: pp. 946-949.
121. Ghiotti, A. and Bruschi, S., 2010. A Novel Experimental Set-Up for Warm Incremental Forming of AZ31B Magnesium Alloy Sheets. Steel Research International. **81(9)**: pp. 950-953.
122. Ambrogio, G., Cozza, V., Filice, L., and Micari, F., 2007. An analytical model for improving precision in single point incremental forming. Journal of Materials Processing Technology. **191(1-3)**: pp. 92-95.
123. Filice, L., 2006. A phenomenology-based approach for modelling material

thinning and formability in incremental forming of cylindrical parts. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture. **220(9)**: pp. 1449-1455.
124. Ambrogio, G., De Napoli, L., and Filice, L., 2009. A novel approach based on multiple back-drawing incremental forming to reduce geometry deviation. International Journal of Material Forming. **2**: pp. 9-12.
125. Кривошеин В.А., Анцифиров А.А., Майстров Ю.В. 2014. Перспективы использования технологий инкрементальной формовки в современном производстве
126. Рудман
127. Романовський