

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ
СІКОРСЬКОГО»**

**Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут кафедра
Технології виробництва літальних апаратів**

«На правах рукопису»
УДК 621.73.043

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ
«__» _____ 2024 р.

Магістерська дисертація

на здобуття ступеня магістра

**за освітньо-науковою програмою «Технологія виробництва літальних
апаратів»**

зі спеціальності 131 Прикладна механіка

на тему: _____

Розробка процесу гарячого формоутворення моноколеса з радіальним
розташуванням лопаток з титанових сплавів.

Виконав:

студент 2 курсу, групи АТ-21мн

Калугін Микита Анатолійович
(прізвище, ім'я, по батькові)

Керівник: д.т.н., проф. Тітов В.А.

(посада, науковий ступінь, вчене звання)
ініціали)

_____ (прізвище,

Рецензент: _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання)
ініціали)

_____ (прізвище,

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

Студент: Калугін М.А.

Київ – 2024 року

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

Інститут Навчально-науковий механіко-машинобудівний
кафедра Технології виробництва літальних апаратів
Рівень вищої освіти – другий (магістерський)
Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»
Освітньо-професійна програма «Технологія виробництва літальних апаратів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

____ Антон ЛАВРІНЕНКОВ

« ____ » _____ 2024 р.

ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту

____ Калугін Микита Анатолійович

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Розробка процесу гарячого формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток з титанових сплавів,

науковий керівник дисертації: Тітов Вячеслав Андрійович, д.т.н., проф.

(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:

4. Вихідні дані: Креслення моноколеса

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: Літературний огляд джерел ізотермічного формоутворення моноколів, чисельний розрахунок моноколеса методом скінчених елементів, розробка методу спрощеного розрахунку багатоканальних вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів, розрахунок представницького об'єму

6. Орієнтовний перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 90 сторінок записки

7. Орієнтовний перелік публікацій Пристрій для ізотермічного штампування _____

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	Провести літературний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколів	01.10.2023 – 31.12.2023	
2	Виконати чисельні розрахунки моноколеса з радіальним розташуванням лопаток	01.01.2024 – 28.02.2024	
3	<u>розробка методу спрощеного розрахунку багатоканальних вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів, розрахунок представницького об'єму</u>	01.03.2024 – 31.03.2024	
4	Розрахунок представницького об'єму	01.04.2024-01.06.2024	
5	Висновки по роботі	01.06.2024 -10.06.2024	

Студент

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Науковий керівник дисертації

(Власне ім'я, ПРІЗВИЩЕ)

Микита КАЛУГІН

Вячеслав Андрійович ТІТОВ

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

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 97 сторінок, в тексті зазначено 60 малюнків. В даній атестаційній роботі використано 66 найменувань бібліографічних посилань.

Метою роботи є оцінка енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану при формоутворенні моноколів із радіальними лопатками з титанових сплавів в умовах ізотермічного штампування.

В дисертаційній роботі проведено літературний огляд джерел процесів ізотермічного формоутворення моноколів, на основі чого сформульовані задачі досліджень

За допомогою методу скінчених елементів проведено моделювання гарячого ізотермічного формоутворення монолеса з титанового сплаву ВТ6.

Розроблений метод спрощеного розрахунку вісесиметричних багатоканальних виробів

ABSTRACT

The master's thesis consists of 97 pages, with 60 figures in the text. This certification work uses 66 bibliographic references.

The aim of the work is to evaluate the power and force parameters and stress-strain state during the formation of monowheels with radial blades made of titanium alloys under isothermal stamping conditions.

In the dissertation, a literature review of the sources of isothermal forming processes of unicycle wheels was conducted, on the basis of which the following research tasks were formulated

Using the finite element method, we modeled the hot isothermal forming of a monowheel made of Ti6Al4V titanium alloy.

A method for simplified calculation of axisymmetric multi-channel products

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ГТД – газотурбінний двигун
ДВЗ – двигун внутрішнього згоряння
ЕХО – електрохімічна обробка
ЕЕО – електроерозійна обробка
ЧПУ – чисельне програмне управління
КП – керуюча програма
ГП – гаряче ізостатичне пресування
ГПД – гаряча пластина деформація
МСЕ – метод скінченних елементів
ОМТ – обробка металів тиском
НДС – напружено-деформований стан
САПР – система автоматизованого проектування
 P_d – зусилля деформування
 V_d – швидкість деформування
 μ – коефіцієнт тертя
 σ_i – інтенсивність напружень
 ε_i – інтенсивність деформацій
 T – температура

ЗМІСТ

ВСТУП.....	9
РОЗДІЛ 1	
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛІС.....	12
1.1 Конструкція деталей типу моноколесо у авіаційних двигунах.....	12
1.2 Існуючі технології виготовлення моноколіс.....	18
1.3 Особливості ізотермічного формоутворення моноколіс при температурах ГПД.....	29
1.4 Висновки до розділу 1.....	31
РОЗДІЛ 2	
ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛЕСА.....	33
2.1 Розрахункова схема процесу ізотермічного формоутворення моноколеса.....	33
2.2 Результати моделювання гарячого ізотермічного деформування моноколеса.....	37
2.3 Висновки до розділу 2.....	39
РОЗДІЛ 3	
РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ВІСЬСИМЕТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛІС.....	40
3.1 Розробка методу течії металу заготовки при формоутворенні моноколеса з радіальним розташуванням лопаток в багатоканальних штампах.....	40

3.2 Висновки до розділу 3.....	46
РОЗДІЛ 4	
ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО ЕЛЕМЕНТУ	47
4.1 Дослідження формоутворення тонкостінного елемента у випадку коли вектор сили співпадає з напрямом течії матеріалу.....	47
4.2 Аналітичний розрахунок МВО.....	60
4.3 Дослідження формоутворення тонкостінного елемента у випадку коли вектор сили направлений перпендикулярно до напрямку течії металу.....	80
РОЗДІЛ 5	
ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ.....	89
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	90

ВСТУП

Актуальність теми. Ефективність і довговічність сучасних літаків значною мірою залежать від продуктивності їхніх двигунів і компонентів. Компоненти авіаційних двигунів, зокрема моноколесо, повинні відповідати високим стандартам з точки зору механічних властивостей і точності. Моноколеса складаються з дисків, повністю виготовлених з лопаток аеродинамічної форми, і мають суворі вимоги до якості та експлуатації відповідно до їх функціонального призначення.

В даний час моноколеса зазвичай виготовляються з використанням методів механічної обробки, які призводять до значних втрат металу, що коливаються в межах 50-80%. Крім того, складно досягти рівномірного розподілу металу під час механічної обробки, що має вирішальне значення для забезпечення максимальної стійкості до різних навантажень та вібрацій під час експлуатації.

Перспективним методом виробництва компонентів є гаряче штампування, яке дозволяє безпечно маніпулювати текстурою матеріалу в корпусі диска і лопаток, тим самим підвищуючи стійкість до експлуатаційних навантажень. Такий підхід збільшує термін служби компонента, зменшує витрату матеріалу та скорочує трудомісткість виробництва на 50-60%. Гаряче штампування дозволяє отримувати деталі з робочими поверхнями (лопатками), які або потребують мінімальної подальшої обробки, або взагалі не потребують обробки, зберігаючи механічні властивості матеріалу за рахунок заповнення порожнини штампа.

Метою дисертаційної роботи є комплексне вирішення питання оцінки енергетичних і силових параметрів, а також деформовано-напруженого стану при формоутворенні деталей моноколес з радіальними тонкостінними елементами з титанового сплаву. **Мета дисертаційної роботи**

Розробка та обґрунтування процесу гарячого формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток з титанового сплаву системи Ti-6Al-4V на основі чисельного моделювання

Задачі дослідження:

- 1) Виконати аналітичний огляд науково-технічних публікацій щодо сучасних процесів виготовлення моноколів з титанових сплавів
- 2) Виконання чисельного розрахунку моноколеса та постановка задачі у програмному комплексі Deform 2D
- 3) Розробка методу спрощеного методу розрахунку багатоканальних вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів
- 4) Виконання розрахунку моноколеса на основі представницького об'єму

Об'єкт дослідження. Процес ізотермічного формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток

Предмет дослідження. Закономірності течії матеріалу, енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану в залежності від режимів деформування

Методи дослідження. Чисельне моделювання у програмному пакеті Deform 2D

Наукова новизна одержаних результатів: Розроблений метод, який значно спрощує розрахунки багатоканальні вісьсиметричні деталі

Ключові слова: ізотермічне штампування, моноколесо, метод скінченних елементів, газотурбінний двигун, силові режими, напружено-деформований стан, титанові сплави, гаряче штампування.

РОЗДІЛ 1
ЛІТЕРАТУРНИЙ ОГЛЯД ДЖЕРЕЛ ІЗОТЕРМІЧНОГО
ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛІС

**1.1 Конструкція деталей типу моноколесо у авіаційних
двигунах**

Було створено безліч різноманітних різновидів двигунів, які використовуються на сьогоднішній день в авіаційній промисловості. Основна увага приділяється авіаційним газотурбінним двигунам (ГТД). Газотурбінний двигун функціонує як тепловий двигун, в якому газ стискається, нагрівається і перетворюється в механічну роботу на валу газової турбіни. На рисунку 1.1 зображено типовий газотурбінний двигун.

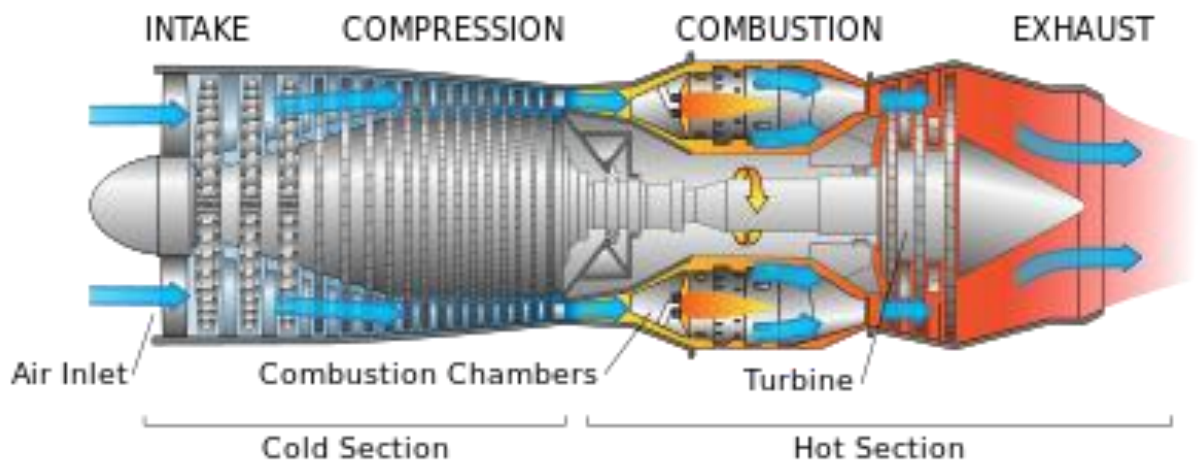


Рис 1.1 Газотурбінний двигун

Газотурбінні двигуни мають широке застосування в авіації (наприклад, в літаках, гелікоптерах, крилатих ракетах і безпілотної), а також в наземному обладнанні (включаючи промислове обладнання і транспортні засоби) і морському обладнанні (наприклад, в кораблях, військових кораблях, електролітаках і морських нафто- і газодобувних платформах). Наразі авіаційні двигуни складають 70% від загального світового виробництва газотурбінних двигунів, тоді як наземні та

морські двигуни - близько 30%.

Газотурбінні двигуни здебільшого замінили поршневі двигуни в сучасній цивільній та військовій авіації і стали домінуючими. Їх широке використання в енергетиці, промисловості та транспорті стало можливим завдяки вищій енергоефективності, компактності та малій вазі. Конструкція і характеристики термодинамічного циклу забезпечують високі питомі параметри газової турбіни. Хоча цикл ГТД має ті ж самі основні процеси, що і поршковий двигун внутрішнього згоряння (ДВЗ), існують суттєві відмінності. У поршковому двигуні ці процеси відбуваються один за одним в одному і тому ж компоненті двигуна - циліндрі. Однак у газотурбінному двигуні ці процеси відбуваються одночасно і послідовно в різних елементах двигуна. В результаті умови роботи елементів двигуна в газотурбінному двигуні не такі нерівномірні, як в поршковому, а середня швидкість і масова витрата робочого тіла в 50-100 разів вищі, ніж в поршковому двигуні. Це дозволяє зосередитися на невеликих газових турбінах з високою потужністю.

У сучасній авіаційній техніці якість компонентів авіаційних двигунів визначає термін їхньої служби та надійність. Як наслідок, існують жорсткі вимоги до їх механічних властивостей і точності. Проектування роторів для авіаційних турбовентиляторних двигунів передбачає досягнення балансу між мінімальною вагою, надійністю та тривалим терміном служби. [1,2]

У газотурбінному двигуні енергія газу передається з метою його стиснення або вилучення енергії з газу для створення корисної роботи на валу турбіни шляхом взаємодії газу зі спеціально розробленими лопатками, які розташовані на окремих дисках або сумісними з ними. Корпус лопатки має аеродинамічну форму з високою точністю (див. рис. 1.2).

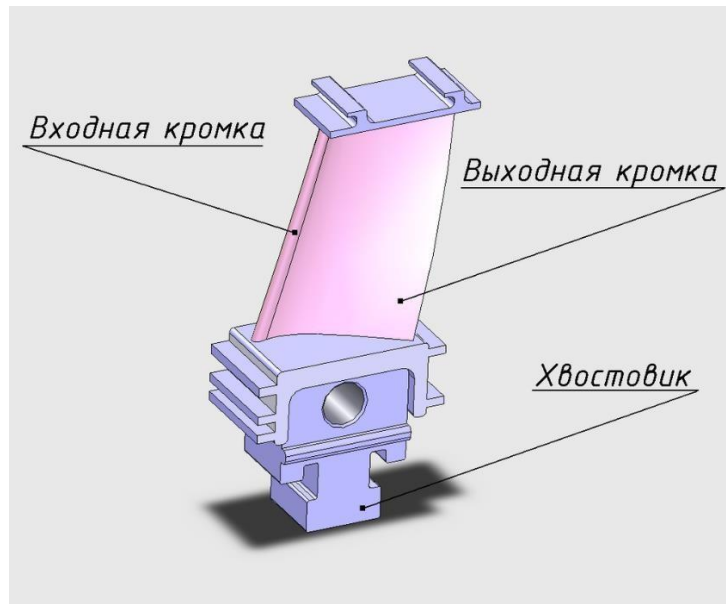


Рисунок 1.2 – Турбінна лопатка.

Лопатки - це тонкі елементи, які конструктивно сумісні з більшими компонентами. Моноколесо (спалах), як правило, використовується для складних деталей, що містять тонкі елементи з високими вимогами до якості та керованості. Моноколесо (див. рис. 1.3) діє як початкова стадія компресора (робоче колесо), де лопаті аеродинамічної форми інтегруються з диском ротора, утворюючи єдине ціле.

У будь-якому типі ротора застосування моноколеса може призвести до зниження ваги до 25% і збільшення критичної швидкості за рахунок відсутності фіксуючого з'єднання між лопатками і диском. Титанові сплави ВТ3-1, ВТ5-1, ВТ6, ВТ8, ВТ25 та алюмінієві сплави АК4-1, АК6, ВД-17 є основними матеріалами, що використовуються у виробництві одноколісних коліс електромобілів.



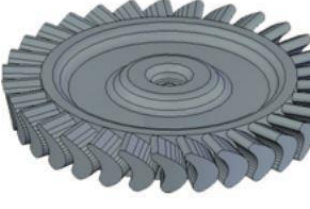
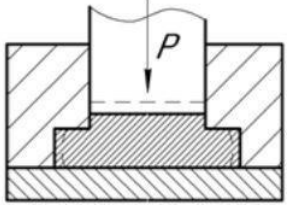
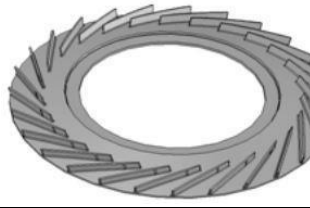
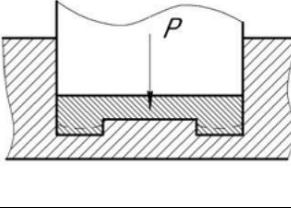
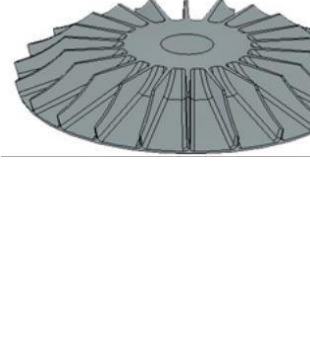
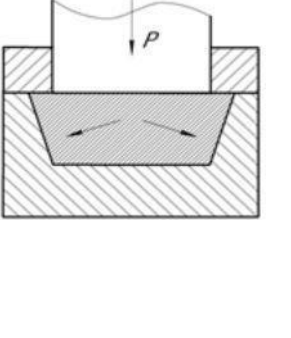
Рисунок 1.3 – Монолітне колесо.

При виготовленні суцільноштампованих коліс для пластинчастих машин аеродинамічна форма поверхонь елементів варіанту відіграє вирішальну роль в конструктивно-технічних характеристиках в рамках його класифікації. Ця класифікація пропонує методичний підхід до дослідження і розробки технологічного процесу створення багатощілинних (багатоканальних) прес-форм для робочих коліс лопатевих машин. За своїм функціональним призначенням лопатеві машини поділяються на різні типи на основі конструктивних характеристик, які, в першу чергу, відрізняються взаємним розташуванням лопаті та диска [3,4].

Конструктивно-технічна класифікація тачок за функціональним призначенням поділяє їх на різні типи з різним розташуванням відвалів і дисків відносно один одного (табл. 1.1). У статті окреслено основні класи одноколісних рушіїв, які відрізняються за розташуванням лопатевого елемента відносно осі обертання конструкції деталі: співвісні осі, радіально розташовані та під кутом до осі. Кожен клас одноколісних елементів має окремі підкласи, які додатково класифікують їх на основі форми поверхні їхніх одинарних або подвійних криволінійних лопатей.

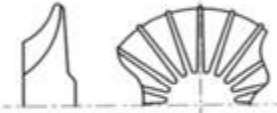
Таблиця 1.1

Конструкторсько-технологічний класифікатор моноколів

Конструктивна ознака (розташування пера)	Типовий представник	Технологічна ознака	Схема процесу формоутворення
Перпендикулярно осі обертання		Радіальне пресування пера лопатки	
Співвісно з віссю обертання		Аксіальне пресування пера лопатки	
Під кутом до осі (змішаний тип)		Пресування пера лопатки при комбінованій течії металу	

Таблиця 1.2

Класифікація моноштампованих робочих коліс

Тип	Вид	Група Форма аеродинамічної поверхні	Ескіз типового представника
Конструктивні ознаки	Технологічні особливості		
А. Радіальні (дифузори)	1. Міждопаточні канали відкриті. Пряме видавлювання	1. Поверхня лопаток лінійна	
Б. Осьові (заборники)	2. Міждопаточні канали відкриті. Бокове видавлювання	2. Поверхня ступінці лінійна	
		3. Поверхня ступінці складнофасонна	
В. Радіальні крильчатки	3. Міждопаточні канали напівзакриті. Комбіноване видавлювання	4. Поверхня лопатки плоска	
		5. Поверхня лопаток просторова складнофасонна	
		6. Із проміжними лопатками	
Г. Направляючі апарати	4. Міждопаточні канали напіввідкриті. Комбіноване видавлювання	7. Поверхня лопатки лінійна	
Д. Направляючі апарати	5. Міждопаточні канали закриті. Аксіальне видавлювання	8. Поверхня лопатки складнофасонна	

1.2 Існуючі технології виготовлення моноколів

Виробництво моноколів зазвичай передбачає використання п'ятикоординатного високошвидкісного фрезерного верстата, керованого програмним забезпеченням з ЧПК (наприклад, Liechti, Strarrag тощо), прикладом чого є високотехнологічні компанії, такі як ВАТ «Мотор Січ», ЗМКБ «Прогрес» та «Салют». Процес виготовлення цих деталей вимагає значних трудовитрат і призводить до низького коефіцієнта використання металу.[3]

Застосування методів точного штампування може значно підвищити технічну та економічну ефективність виробництва електровелосипедів. Спираючись на досвід академічних інститутів США, Німеччини, а також на дослідження таких відомих вчених, як К. Н. Богоявленський, А. П. Атрощенко, В. Т. Мещерін, В. М. Воробйов та ін., можна виділити основні недоліки застосування статичного методу штампування, який дає великі припуски на матеріал із застосуванням потужного штампувального устаткування. Реалізація динамічного підходу потребує значних капітальних інвестицій, використання унікального спеціалізованого обладнання та збільшення операційних витрат. Крім того, бракує теорій, що точно описують деформаційний стан багатоканальної прес-форми, а також недостатньо даних про механічні, структурні та фізичні властивості металу прес-форми.

Перспективною технологією виготовлення моноколеса є ізотермічне термічне 3D-штампування, яке дозволяє отримати сприятливу текстуру матеріалу в корпусі диска та лопаток. Це призводить до підвищення стійкості до навантажень під час експлуатації, збільшення терміну служби деталей, зменшення матеріаломісткості та значного зниження трудомісткості під час виготовлення. Гаряче штампування колів для моноколів дозволяє створювати деталі з робочими поверхнями

(вставками), які не потребують подальшої обробки, або з мінімальним припуском на подальшу обробку. При подачі матеріалу в проточну порожнину прес-форми [4, 5] можна зберегти механічні властивості матеріалу, а використання штампованого колеса в конструкції МДП дозволить значно підвищити транспортно-вагові характеристики виробу.

Виготовлення деталей складної форми з розвиненою поверхнею, таких як тонкі перегородки, ребра, лопатки зі складним аеродинамічним профілем і диски, дозволяє досягти найбільш ефективного процесу прецизійного штампування. В процесі штампування забезпечується високий ступінь рівномірності деформації і однорідна структура необхідного дисперсного матеріалу, в результаті чого підвищується рівень стабільності механічних властивостей і надійності виробів.

Розвиток безповітряних і малозабірних технологій забезпечується ізотермічним штампуванням лопаток, дисків і дисків з лопатками (моноколіс). Це дозволяє знизити металоємність у 2,0-3,5 рази та мінімізувати об'єм різальної та фінішної обробки

У світі існує понад 10 000 існуючих, розроблюваних і перспективних процесів виробництва лопатей. Порівняльний аналіз ефективності цих альтернативних процесів досить складний через несумісність різного лопатевого обладнання у виробничій економіці окремих підприємств, неоднакові умови металопостачання та багато інших факторів. Загальновизнано [6-8], що найбільш ефективними альтернативними технологіями виготовлення поковок лопаток є ізотермічне штампування, штампування на гвинтових пресах та високошвидкісне молотове штампування.

У роботах детально описано метод і переваги виготовлення моноколеса замість складеного, що призводить до значного зменшення

ваги, трудомісткості та виробничих витрат компресора. Канали між лопатками вирізаються на багатокоординатному фрезерному верстаті Turboblisk в Лехті, Бретань (рис. 1.4).

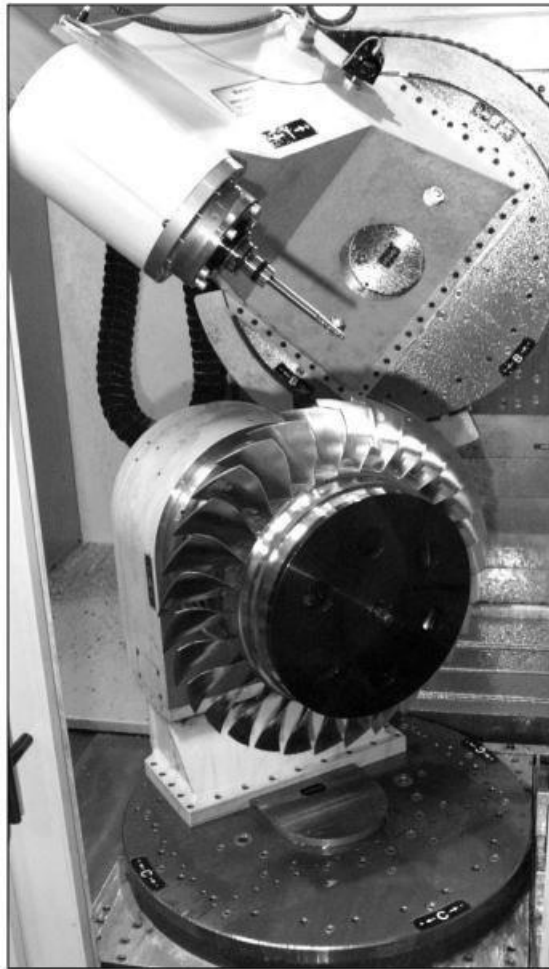


Рис 1.4. – Виготовлення моноколеса на фрезерному станку по типу Turboblisk.

Обробка зазвичай відбувається в два етапи, після чого обробляються контури, кромки і радіуси переходів. Консольна конструкція тонкостінного леза з низькою жорсткістю робить обробку ріжучої поверхні проточної частини леза складним завданням, що вимагає спеціальних технологічних процесів та інструментів для обробки. Для підвищення жорсткості лопаті під час обробки та мінімізації відповідних похибок обробки застосовують швидкотверднучі компаунди для заповнення міжлопатних каналів, а

також спеціальні схеми та стратегії для усунення припуску на обробку. Ці процеси мають високу трудомісткість і пов'язані з високими витратами.

У публікації [8] автор зазначають, що підвищення техніко-економічної ефективності виготовлення окремого колеса можна досягти шляхом формування міжлопатевого каналу на початковому етапі створення заготовки. Однак, через технічні вимоги виробництва, ці методи або відсутні, або мають суттєві недоліки. Тому цікаво дослідити процес виготовлення клинка, який включає в себе наступні основні операції:

- Початкове видалення основної частини матеріалу з міжлопатєвого простору суцільної дискової заготовки з високою ефективністю;

- Регулювання припуску і досягнення заданої точності за один-два проходи;

- точне налаштування пера, вістря і радіуса переходу.

Одним з найбільш потенційних підходів для шліфування міжлопатєвого каналу є гідравлічне шліфування (див. рис. 1.5).

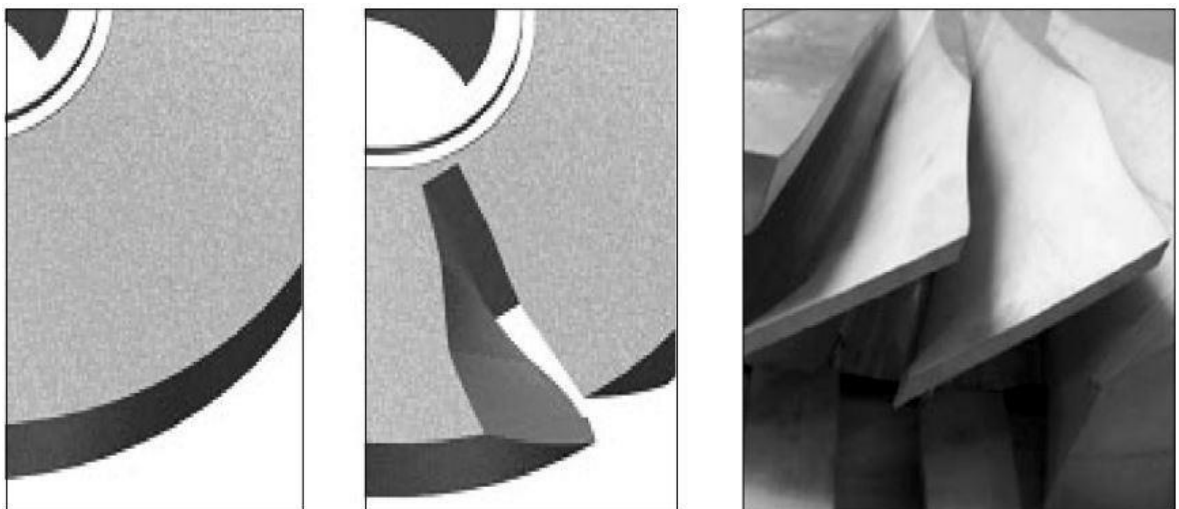


Рисунок 1.5 – Двохперехідне гідроабразивне різання міжлопаточного каналу.

Виготовлення поверхні обтікання осевого колеса і лопатевих фасонних поверхонь становить значну проблему в будівництві сучасних авіаційних двигунів. Складність геометрії деталі, необхідність високої точності, складність оброблюваного матеріалу і вимога до якості опорної поверхні роблять процес обробки надзвичайно складним. Якість круга у виробничому напрямку безпосередньо пов'язана з продовженням терміну служби і надійністю газотурбінної установки. В роботах [9-13] високошвидкісне фрезерування згадується як перспективний метод формування осевої проточної поверхні одиночного колеса.

В роботі [14] автором проведено аналіз характеристик, переваг та недоліків існуючих методів обробки. Автор також окреслив майбутній напрямок досліджень шляхом інтеграції промислового досвіду в обробці одноколісних лопаток для газотурбінних двигунів. Важливо зазначити, що електрохімічна обробка (ЕХО) є одним з найбільш поширених методів обробки тачок. Цей метод передбачає розчинення металів в електроліті під впливом електричного струму. За допомогою ЕГТ можна виготовляти пластини малої товщини з мінімальним радіусом кромки приблизно 0,04 мм, тим самим усуваючи необхідність подальшого ручного полірування. Підготовка, яка передбачає видалення значної кількості металу в каналі між пластинами перед електроіскровою обробкою, може бути виконана за допомогою фрезерування або водяного шліфування. Оскільки в процесі електроерозійної обробки на деталь не діють сили, в її поверхневому шарі не створюється додаткове напруження, що дозволяє підготувати поверхню леза до подальших операцій загартування та/або нанесення покриття. Експериментальні дослідження показали, що при реалізації технології ЕХТ (див. рис. 1.6 і рис. 1.7) монополісти стикаються з численними труднощами при виборі необхідного електроліту. Можливості вибору обмежені досить вузьким спектром водних галогенідів і нітратів, а також параметрами процесу

(температура електроліту, густина струму, міжполюсний проміжок тощо).

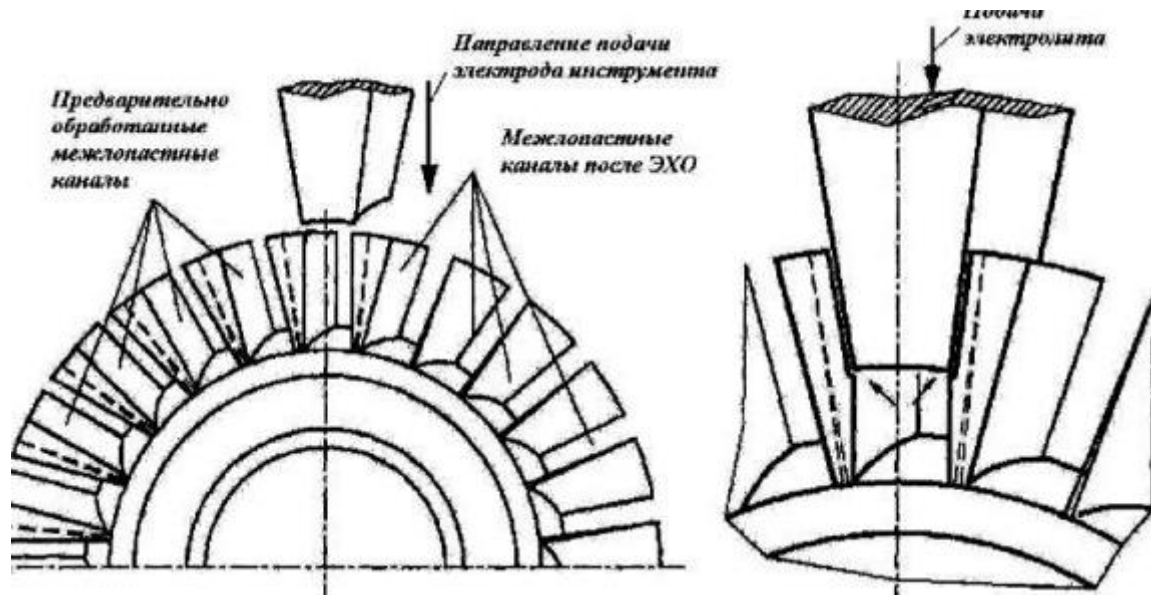


Рисунок 1.6 – Схема формування міжлопаточного каналу моноколеса методом ЕХО одним електродом для одночасної обробки двох поверхонь.

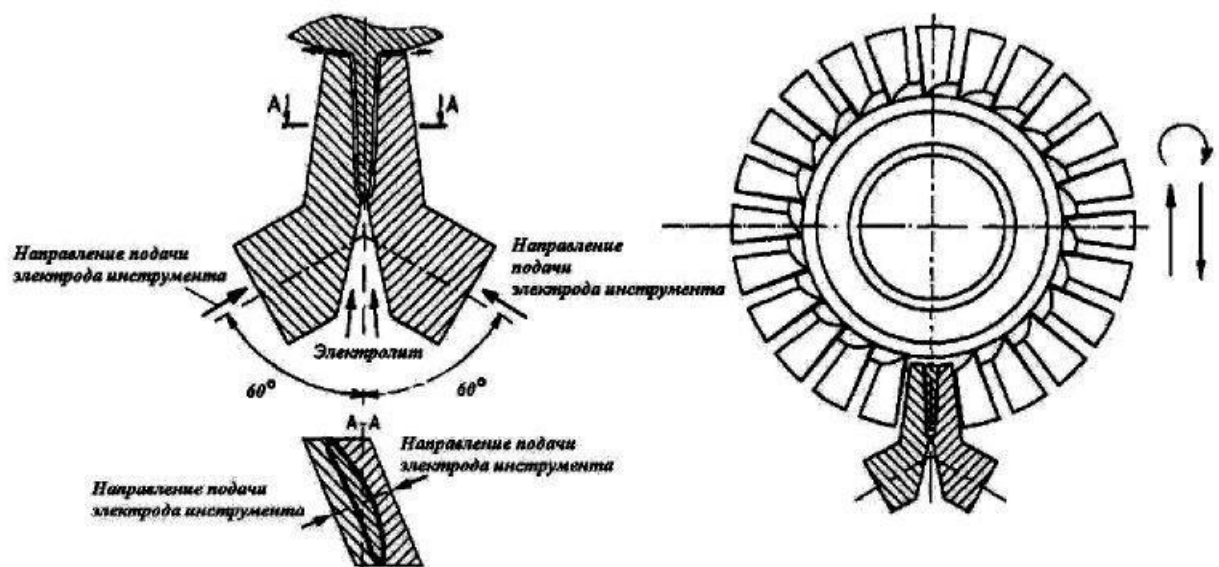


Рисунок 1.7 – Схема формування лопатки моноколеса методом ЕХО із використанням двох електродів для одночасної обробки однієї лопатки.

Вимоги до якості та точності виготовлених деталей зростають через ускладнення основних вузлів ГТД, таких як використання поверхонь подвійної кривизни та ажурних тонкостінних і порожнистих конструктивних елементів.

Методи обробки, в тому числі електроерозійна обробка (ЕО), все частіше використовуються для таких деталей з кількох причин: сучасні конструкційні жароміцні матеріали мають фізико-механічні властивості, подібні до інструментальних матеріалів; інструменти для обробки деталей з цих матеріалів мають низьку стійкість; ЕО дозволяє виготовляти елементи конструкцій, які не можуть бути виготовлені іншими методами обробки, наприклад, прошивні деталі.

Сучасні технології ЕЕО дозволяють ефективно виконувати кастомізацію для вирішення широкого спектру технічних завдань, наприклад, виготовлення одиночних коліс з невеликими міжлопатевими каналами методом електроерозійної обробки (див. рис. 1.8, рис. 1.9).

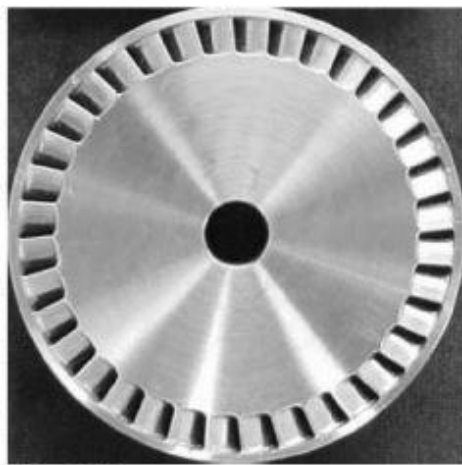


Рисунок 1.8 – Моноколесо із міжлопаточними каналами, отриманими методом ЕЕО.

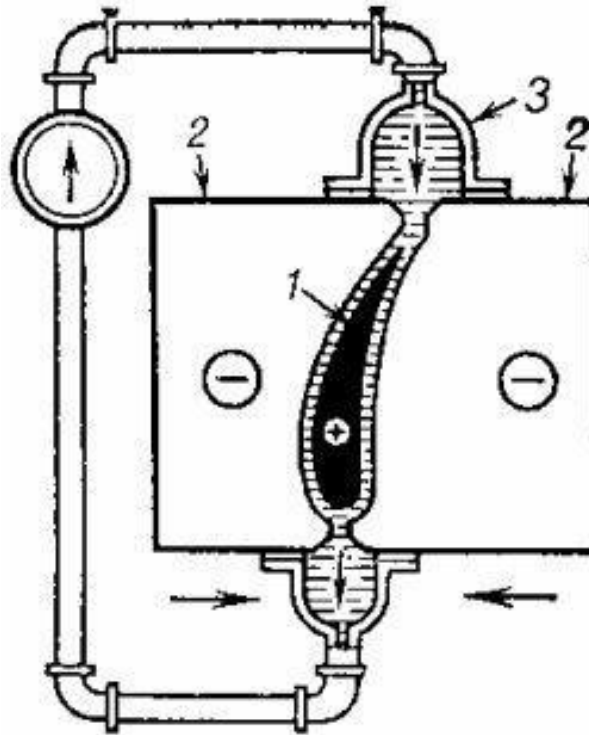


Рисунок 1.9 – Схема процесу обробки лопатки ГТД методом ЕЕО:
1 – лопатка ГТД; 2 – електроди; 3 – електроліт.

Перевагами цього методу обробки є

- Можливість роботи з будь-яким електропровідним матеріалом, незалежно від його фізико-хімічних властивостей, твердості, в'язкості та крихкості.
- Відсутність необхідності в ріжучих інструментах або абразивах з більш високими механічними властивостями, ніж у оброблюваного матеріалу.
- Поступове переміщення електродного інструменту забезпечує одночасну обробку заготовки з найменшою шириною різання по всій складній поверхні, в результаті чого досягається необхідний профіль поверхні. Крім того, один і той же інструмент може використовуватися для фінішної обробки і волочіння.
- Можливість обробки глибоких отворів і пазів, в тому числі зі змінним перетином по валу.

- Технологічні операції виконуються без силового впливу інструменту на заготовку, що дозволяє обробляти поверхні нежорстких і тонкостінних деталей.

- Один оператор може обслуговувати кілька верстатів одночасно, оскільки електроерозійні верстати, як правило, бувають напівавтоматичними і автоматичними.

- Можливість автоматизації.

Крім перерахованих вище переваг, метод ЕЕО має і деякі недоліки:

- Низька продуктивність обробки і високе питоме енергоспоживання при обробці деталей в режимі чистової обробки.

- Вимагає використання робочих рідин з високими діелектричними властивостями.

- Ускладнюється конструкція верстата та ускладнюється його обслуговування.

Точність обробки і чистота оброблюваних поверхонь під час процесів ЕЕО залежать від багатьох факторів, які не завжди можна врахувати. Електродний інструмент сильно зношується під час обробки, а аналітичних залежностей, які б враховували всі різноманітні фактори розрахункових розмірів ЕЕО, не існує.

У світовій практиці традиційним методом виготовлення фрезерних наконечників та однокінцевих коліс є багатокоординатний фрезерний верстат з ЧПК (NC-програма), який може бути використаний на всіх етапах його виробництва (чорнова, напівчистова та чистова обробка).

Наприклад, типова технологія фрезерування електричного моноколеса складається з наступних операцій:

- Чорнова обробка зазору між лопатями.

- Напівчистова обробка маточини.
- Обробка радіусів з'єднання маточини та леза.

Однак, як показує практика, фрезерування коліс електровелосипедів, виготовлених з високоміцних сталей і нікелевих сплавів, є неефективним через низьку оброблюваність цих матеріалів. Крім того, цим методом неможливо виготовити дуже тонкі та довгі пластини, оскільки сили різання, що виникають при цьому, виштовхують пластини, знижуючи якість та точність обробки.

Для вирішення цих питань багатьма дослідниками були запропоновані різні рішення, які можна узагальнити наступним чином:

- розробка математичних моделей для виробу (створення 3D математичної моделі тачки з відвалами);
- навчання операторів з управління (ОУ);
- обробка та перевірка помилок у програмі візуального контролю (див. рис. 1.10);
- фрезерування на багатокоординатних фрезерних центрах;
- перевірка профілю обробки пластин і маточин за допомогою контрольно-вимірювальних машин;
- поліпшення властивостей полірування поверхні.

Важливо зазначити, що ці конкретні пропозиції вже відомі і використовуються провідними виробниками авіаційних двигунів. Однак забезпечення необхідної якості та підвищення точності обробки залишається однією з найактуальніших проблем сучасного машинобудування.

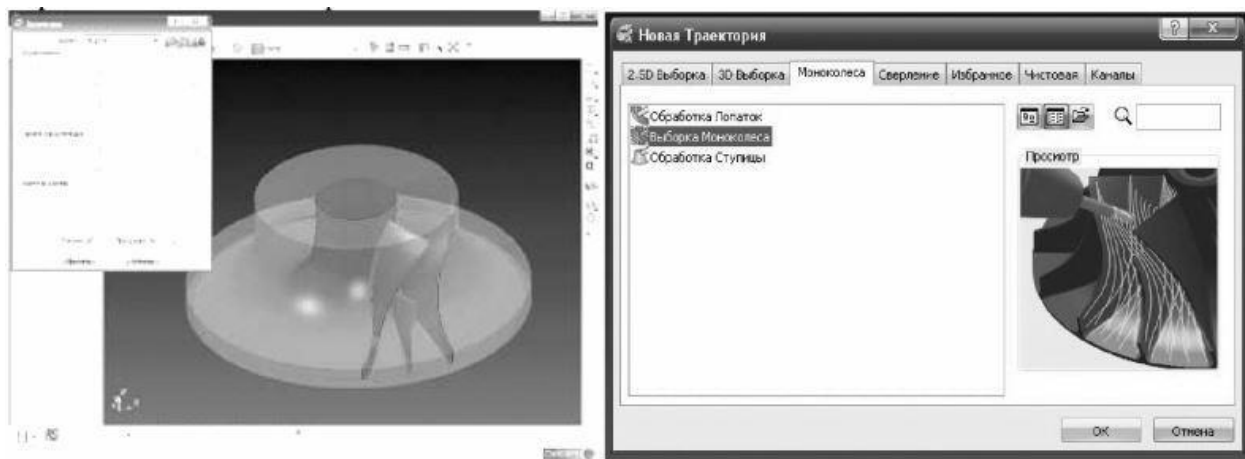


Рисунок 1.10 – 3D математична модель моноколеса та виконання візуалізації обробки.

Для вирішення питань, що розглядаються в роботі, необхідно застосовувати різні підходи, в залежності від автора. Основною метою є виявлення динамічних факторів та їх впливу на процес обробки, а також підвищення якості та точності обробки шляхом усунення негативних факторів. Досягнення цієї мети вимагало детального дослідження процесу фрезерування, зокрема однопрохідного фрезерування, з використанням математичного моделювання.

Авторами статті розроблено комплексну математичну модель процесу фрезерування, яка включає математичну модель процесу формоутворення з урахуванням пружного деформування технічної системи, а також математичну модель динамічної стійкості. Ця модель дозволяє прогнозувати і контролювати якість і точність обробки.

У роботах [14-17] автори досліджували технологію високошвидкісного фрезерування для обробки одного кола. Основна увага в цих роботах була приділена сучасним технологіям обробки букс вагонів з використанням високошвидкісного фрезерування (рис. 1.11), які активно застосовуються на АТ «Мотор Січ». Основна увага була

приділена підготовці виробничого інструменту. У доповідях також обговорювалося програмне середовище для підготовки та контролю керуючої програми 5-координатного верстата для високошвидкісного фрезерування одноколісних лопаток та впровадження мережі DNC на підприємстві. В одноколісній галузі обраний напрямок є перспективним і потребує подальшого розвитку, враховуючи тенденцію високошвидкісного фрезерування складних профільних деталей для газових турбін, виходячи з проведених досліджень та отриманих результатів.



Рисунок 1.11 – Осьове моноколесо, яке виготовлене високошвидкісним фрезеруванням.

1.3 Особливості ізотермічного формоутворення моноколіс при температурах ГПД

При виробництві коліс для моноколес багатообіцяючою є ізотермічна гаряча штамповка. Воно дозволяє успішно формувати матеріал в тілі диска і леза, що призводить до підвищення стійкості до навантажень, збільшення терміну служби деталей, зменшення використання матеріалу і зниження трудомісткості виробництва. При

гарячому штампуванні лопатей для моноколів можна виготовляти деталі з робочими поверхнями (перами лопатей), які не потребують подальшої механічної обробки або потребують мінімальної подальшої механічної обробки. При цьому зберігаються механічні властивості матеріалу за рахунок його перетікання в порожнину матриці [46-49]. Використання штампованих моноколів в конструкції газотурбінних двигунів значно покращує експлуатаційні та масогабаритні характеристики виробу. Процеси прецизійного штампування найбільш ефективні при створенні деталей складної форми з тонкими перетинками, ребрами, аеродинамічними профілями лопаток і дисків. Ці процеси забезпечують рівномірну деформацію і структуру матеріалу, що призводить до підвищення стабільності механічних властивостей і надійності виробу. Ізотермічне штампування лопаток, дисків і дисків з лопатками (моноколів) дозволяє знизити металоємність в 2-3,5 рази і мінімізувати різальні та оздоблювальні роботи. Автори роботи [50] досліджують особливості ізотермічного штампування прецизійних деталей з тонкостінними елементами. Метою роботи є розуміння особливостей процесу ізотермічного штампування в електричних уніціклах шляхом аналізу типових конструктивно-технологічних схем та чисельних розрахунків. Для типових електровелосипедів з радіальним та коаксіальним розташуванням лопатей визначено силові параметри та напружено-деформований стан в осередку деформації за допомогою чисельних методів та CAD/CAE Deform-3D для матеріалу АК 4-1. Встановлено, що найбільші деформації та інтенсивність напружень при формоутворенні виникають в зонах переходу деформованої заготовки від монолітного диска колеса до лопаток. Інтенсивність напружень є найвищою під час формування пір'я лопатки, тоді як середні напруження є стискаючими. При температурі 420°C і швидкості деформації 1 мм/с інтенсивність напружень у перехідній зоні від диска колеса до лопаток становить 115 МПа, а середні стискаючі напруження по об'єму металу -

528 МПа. Ця тенденція спостерігається і для моноколів з осьовим розташуванням лопаток. У дослідженні запропоновано враховувати використання ресурсу пластичності в критичних зонах штампування та контролювати початкову форму заготовки для зменшення використання ресурсу пластичності. Зниження швидкості деформації може значно зменшити технологічні зусилля процесу, що призведе до більш стабільного заповнення тонкостінних елементів. Нарешті, перспективні процеси формування при ізотермічному штампуванні включають низькі швидкості деформації, короткочасну повзучість або надпластичність, а також формування у твердому та рідкому стані.

1.4 Висновки до розділу та постановка задачі дослідження

В даному розділі проведено літературний огляд наукових джерел процесів формоутворення моноколів, наведені типові конструкції моноколів, які використовуються в авіаційних двигунах, розглянуті технології виготовлення моноколів, які існують на сьогоднішній день та наведені особливості ізотермічного формоутворення при ГПД.

На основі цього поставлені наступні мета та задачі дослідження

Мета дисертаційної роботи

Розробка та обґрунтування процесу гарячого формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток з титанового сплаву системи Ti-6Al-4V на основі чисельного моделювання

Задачі дослідження:

Виконати аналітичний огляд науково-технічних публікацій щодо сучасних процесів виготовлення моноколів з титанових сплавів

Виконання чисельного розрахунку моноколеса та постановка задачі у програмному комплексі Deform 2D

Розробка методу спрощеного методу розрахунку багатоканальних

вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів

Виконання розрахунку моноколеса на основі представницького об'єму

РОЗДІЛ 2

ЧИСЕЛЬНІ РОЗРАХУНКИ ІЗОТЕРМІЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛЕСА

2.1 Розрахункова схема процесу ізотермічного формоутворення моноколеса

Основна задача цього розділу є проведення чисельного моделювання моноколеса з радіальним розташуванням лопаток для оцінки енергосилових параметрів та напружено-деформованого стану заготовки. Для виконання цієї задачі, буде використовуватись програмний комплекс для моделювання методом скінчених елементів Deform 3D

При моделюванні процесу ізотермічного моделювання моноколеса був використаний матеріал з бази даних Deform 3D Ti-6Al-4V, який є закордонним аналогом ВТ6

Діаграма істинних напружень $\sigma_s = \sigma_s(\varepsilon_i, \bar{\varepsilon}, T)$ матеріалу Ti-6Al-4V з бази даних деформ при температурі 950 С та різних швидкостях деформування зображена на рисунку 2.1

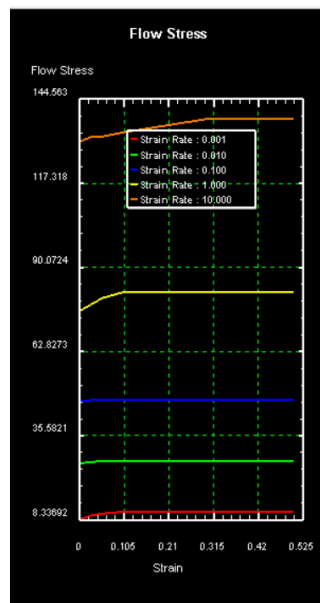


Рис 2.1 Діаграма істинних напружень матеріалу Ti-6Al-4V при різних швидкостях деформацій

Розрахункова схема у програмному комплексі Deform 3D для моделювання процесу гарячого ізотермічного формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток показана на рисунках 2.2 (початок процесу) та 2.3 (кінець процесу)

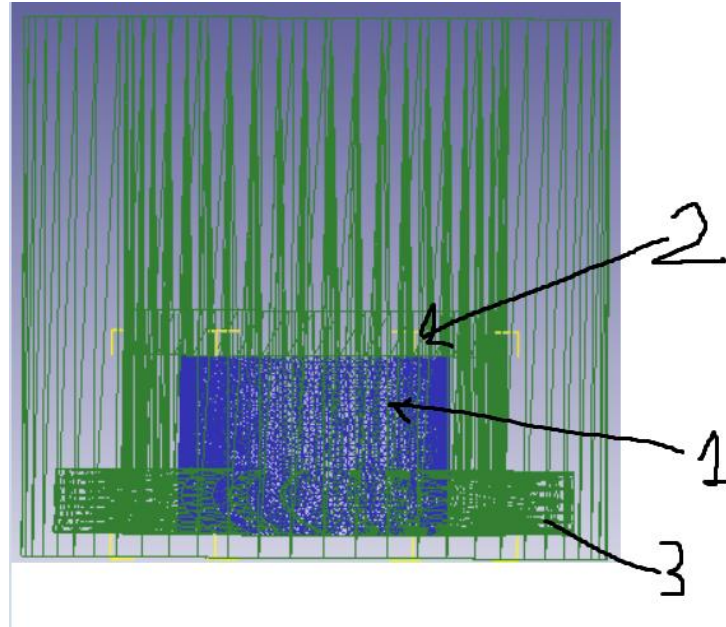


Рис 2.2 Початок процесу ізотермічного формоутворення моноколеса

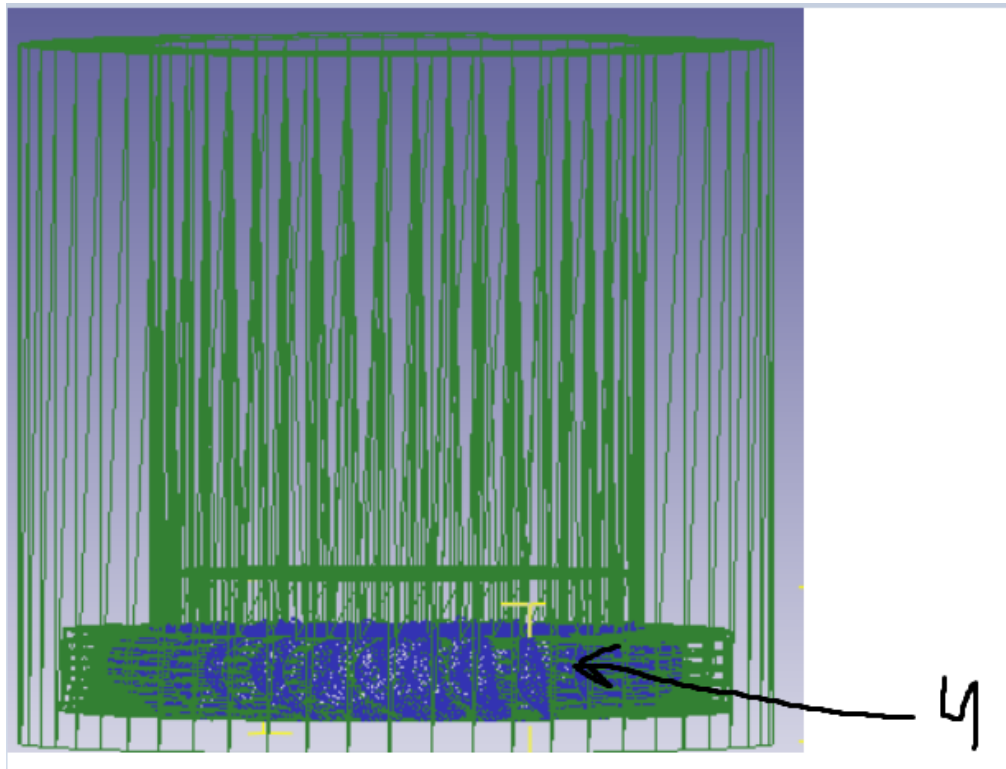


Рис 2.3 Кінець процесу ізотермічного формоутворення моноколеса

На рис 2.4, 2.5, 2.6 показані робочі елементи, які задіяні у процесі штампування

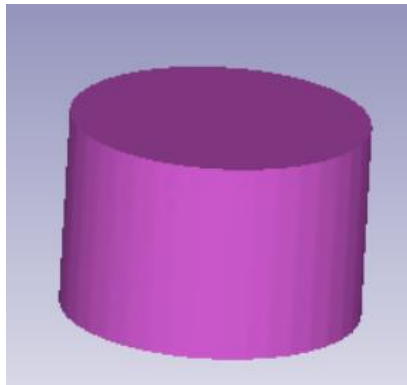


Рис 2.4 Модель заготовки

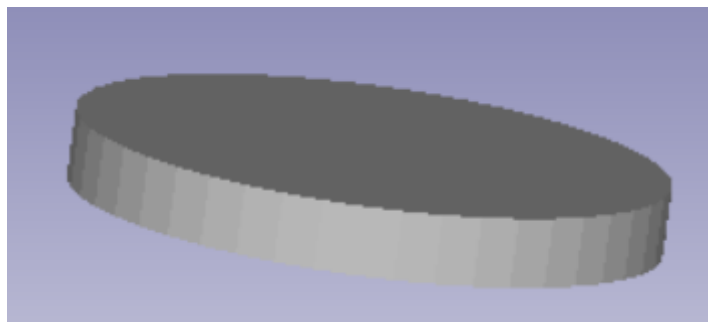
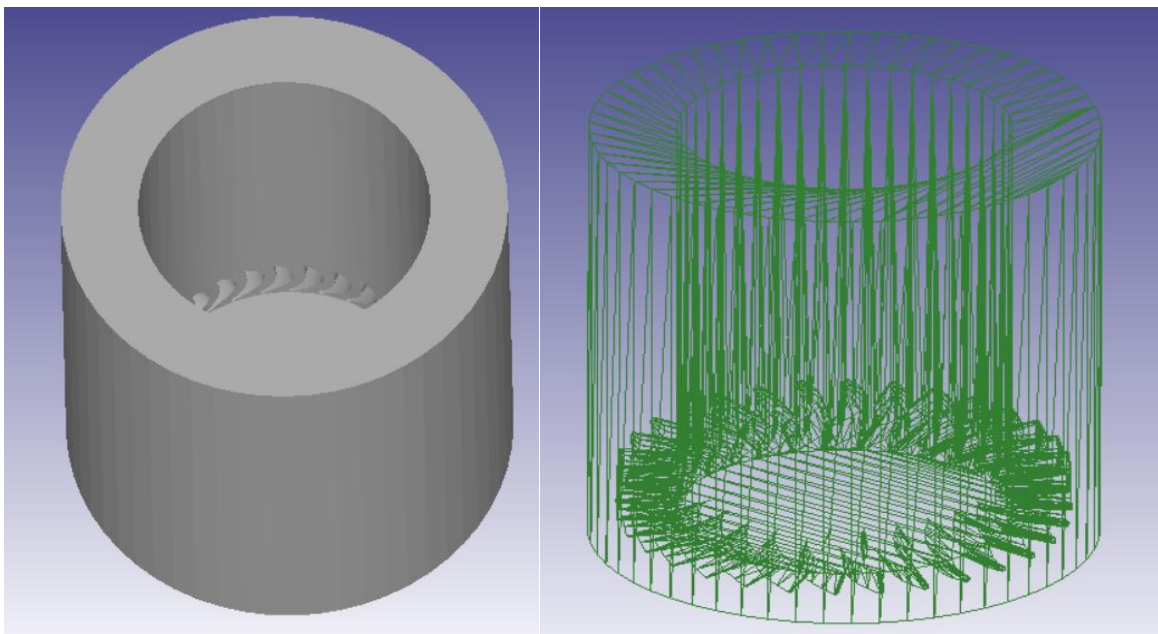


Рис 2.5 Модель пуансона



а

б

Рис 2.6 Модель матриці

При постановці задачі у програмному пакеті Deform 3D була побудована сітка з 100000 скінчених елементів, зовнішній вигляд сітки показаний на рис. 2.7

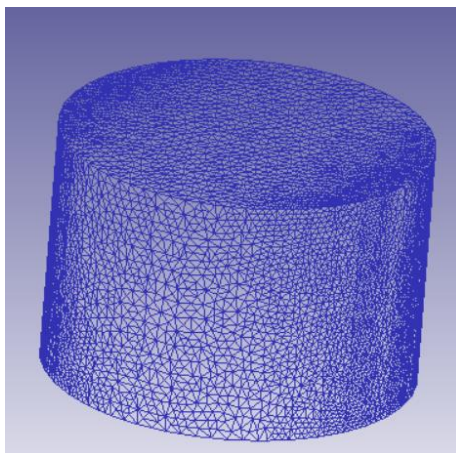


Рис 2.7 Заготовка, поділена на 100000 скінчених елементів

Параметри моделювання процесу ізотермічного штампування моноколеса з радіальними розташуваннями лопаток, показані у таблиці 2.1

Таблица 2.1

Параметри моделювання процесу ізотермічного штампування моноколеса з радіальними розташуваннями лопаток

№	Параметр процесу	Значення
1	Матеріал заготовки	Ti6Al4V(Ti64, VT6)
2	Температура заготовки, С	950
3	Температура оснащення, С	950
4	Матеріал інструменту	Абсолютно жорсткий
5	Коефіцієнт тертя	0,3 по Зібелю
6	Кількість скінчених елементів	100 000
7	Швидкість пуансона	0.01 мм/с

2.2 Результати моделювання гарячого ізотермічного деформування моноколеса

Як результат чисельного моделювання ізотермічного формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток методом скінчених елементів у програмному пакеті Deform, були отримані енергосилові параметри, такі як графік зусилля в залежності від дистанції переміщення пуансону, графік зображений на рисунку 2.8

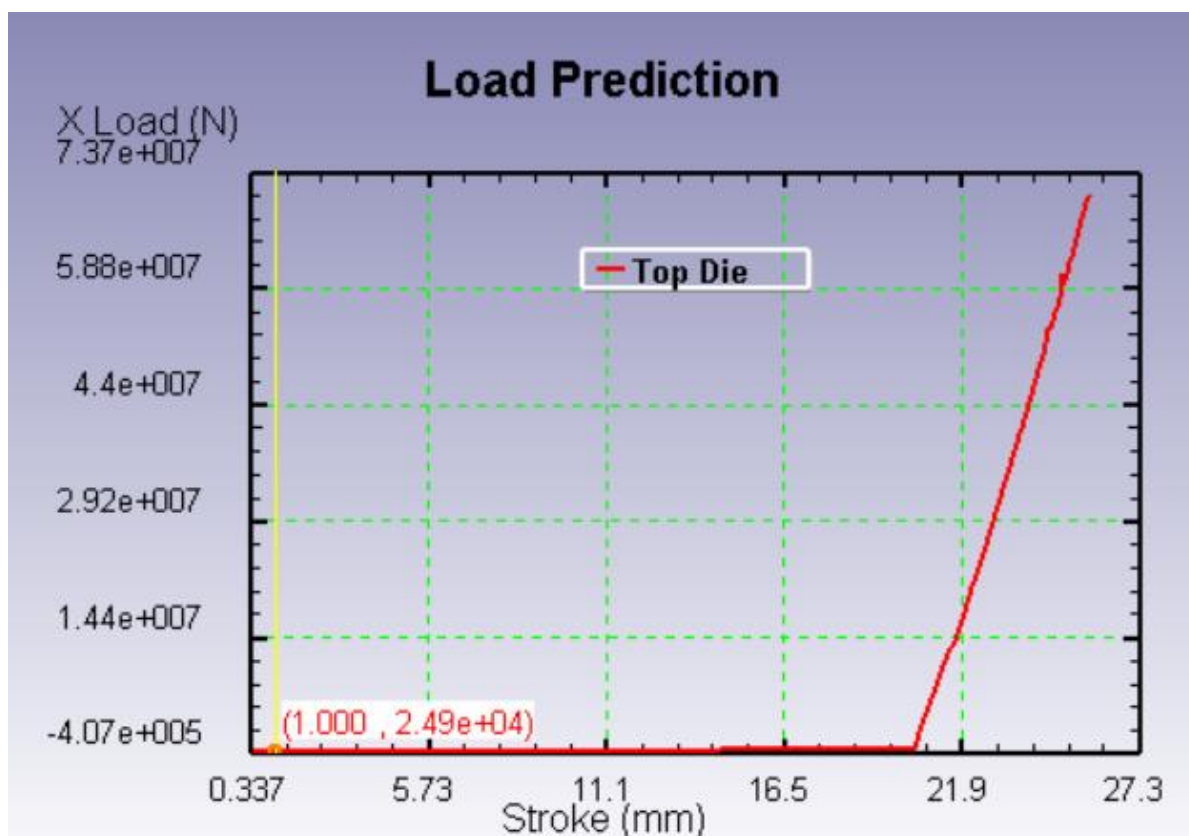


Рис 2.8 Графік залежності зусилля від переміщення пуансону

Прямолинійна частина графіку, переміщення пуансону від 0 мм до 20 мм, зусилля поступово збільшується з 0 Н до 160 кН, це як раз перший етап деформування заготовки, а саме осадження, друга частина графіку, переміщення пуансону від 20 мм до 26 мм, бачимо різке збільшення зусилля до 70 МН, це пояснюється тим що бокові стінки заготовки торкнулися внутрішніх матриці, та пластична течія матеріалу направлена у внутрішні канали матриці

На рисунку 2.9 зображений розподіл інтенсивності деформацій у zdeформованому викові моноколеса, як бачимо найбільша інтенсивність деформацій на верхній частині моноколеса, це пояснюється контактом з бічною поверхнею матриці та перетіканням матеріалу у внутрішні канали матриці. Також спостерігається відносно середня інтенсивність деформацій на бічній поверхні лопаток та зона заготовки, яка торкається міжканальних стінок, пояснюється наявністю напружень тим, що у цій області є контакт з матрицею та перетікання матеріалу у канал формуутворення пера лопатки

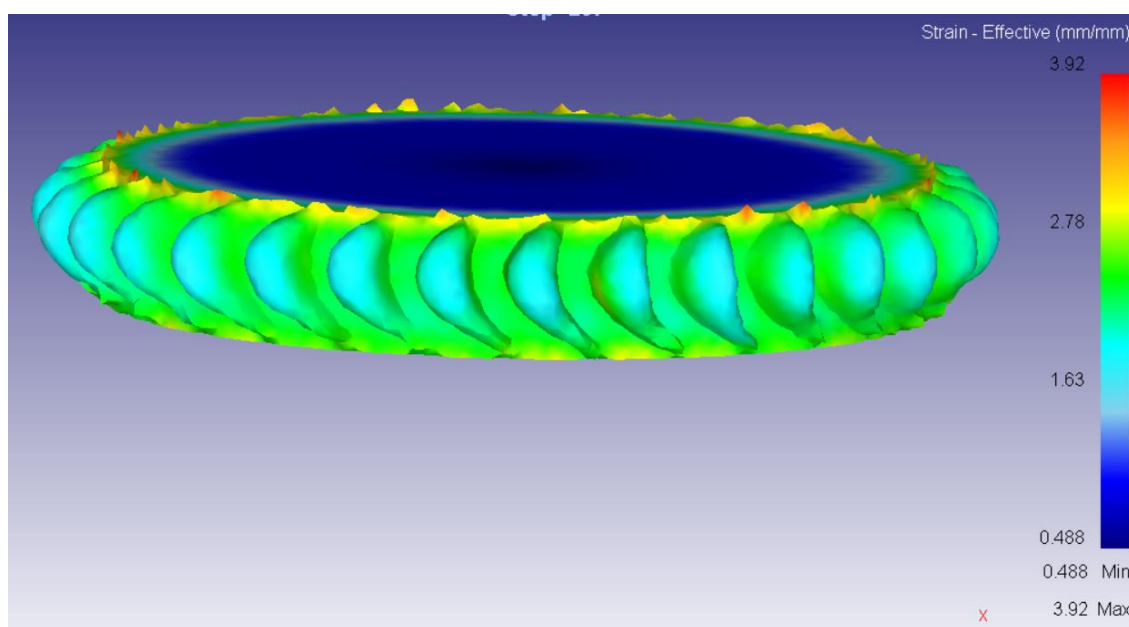


Рис 2.9 Розподіл інтенсивності деформацій у моноколесі

На рисунку 2.10 зображений розподіл інтенсивності напружень всередині zdeформованого моноколеса, як можна помітити найбільша інтенсивність напружень знаходиться у зоні переходу з циліндричної частини заготовки у перо лопатки, це пояснюється затіканням матеріалу у внутрішній канал матриці, у якому формується перо лопатки

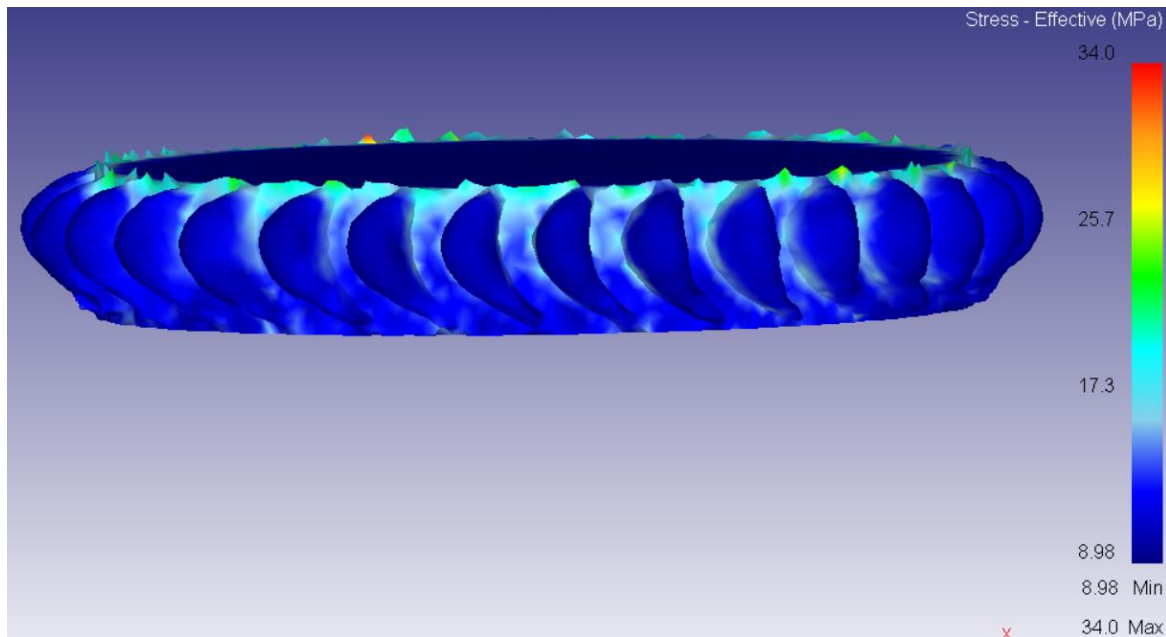


Рис 2.10 Розподіл напружень у моноколесі

2.3 Висновки до розділу 2

Процес ізотермічного формоутворення моноколеса досить тривалий та трудомісткий, займає приблизно 72 години на комп'ютерах середньої потужності. Таким чином будь яка зміна граничних умов, форми заготовки, температури займає багато ресурсів

Наступний розділ буде присвячений створенню методу який дозволить скорити час розрахунку та трудомісткість ізотермічного формоутворення моноколеса.

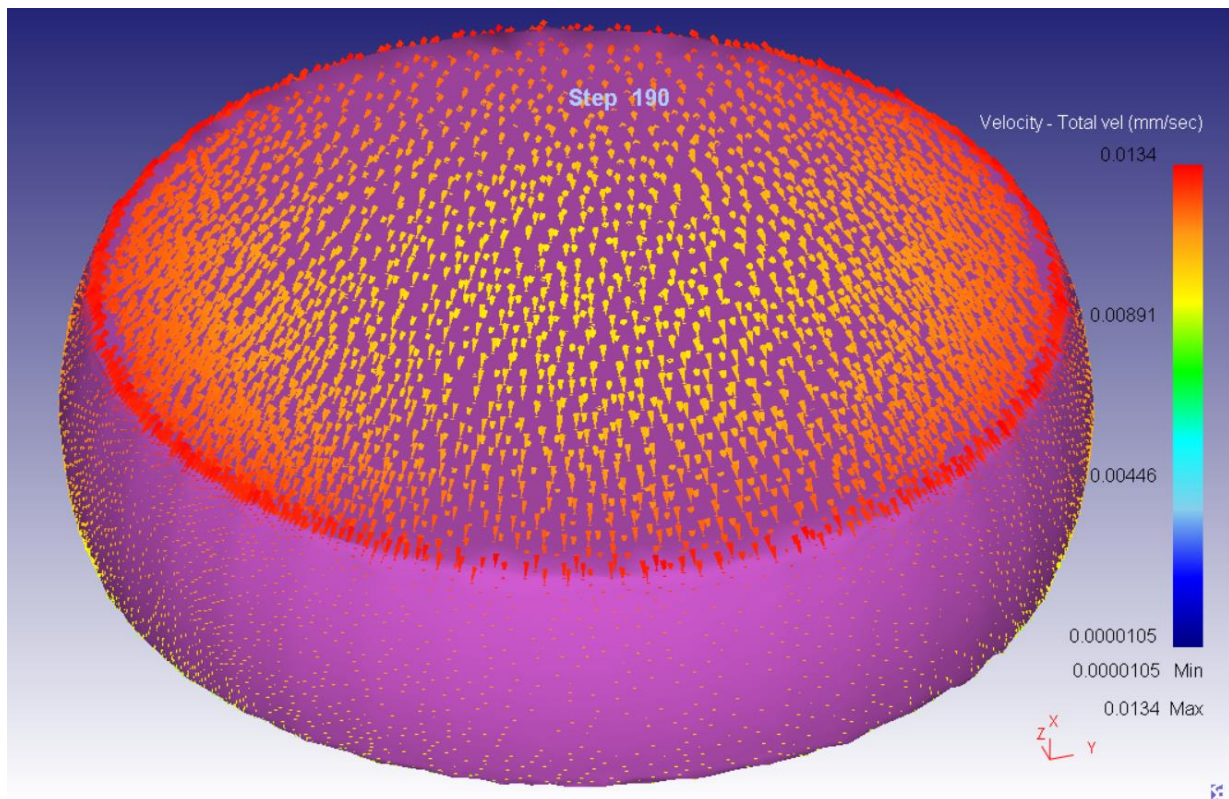
РОЗДІЛ 3

РОЗРОБКА МЕТОДУ РОЗРАХУНКУ БАГАТОКАНАЛЬНИХ ВІСЬСИМЕТРИЧНИХ ПРОЦЕСІВ ПЛАСТИЧНОГО ФОРМОУТВОРЕННЯ МОНОКОЛІС

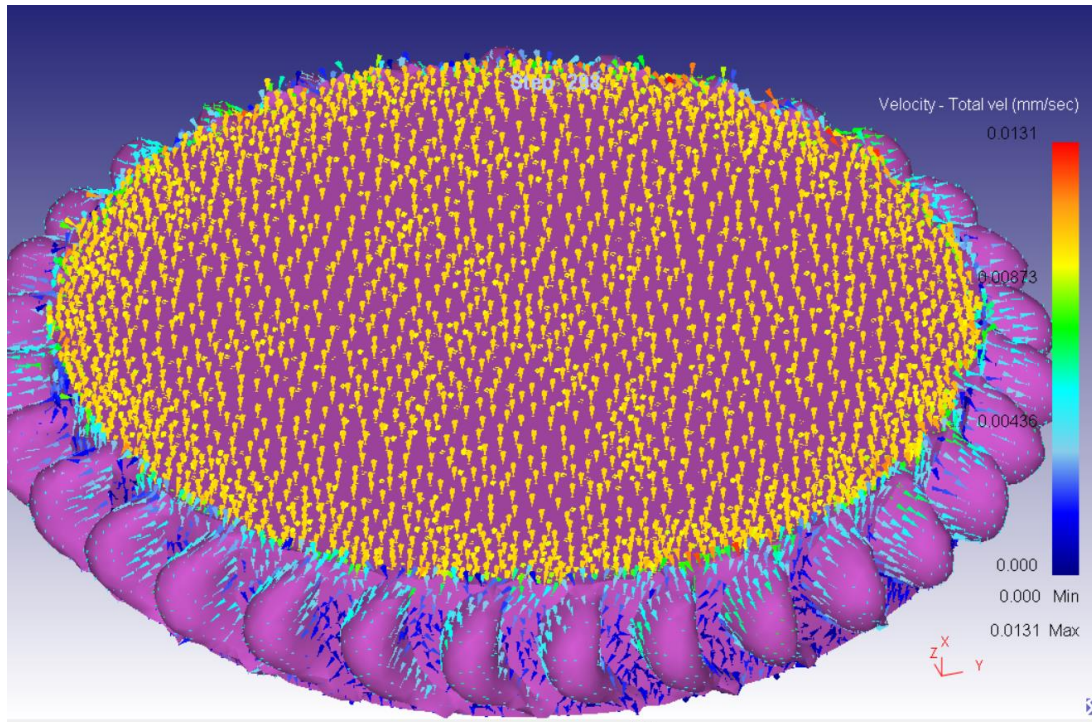
3.1 Розробка методу течії металу заготовки при формоутворенні моноколеса з радіальним розташуванням лопаток в багатоканальних штампах

Враховуючи трудомісткість чисельного розрахунку формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток в багатоканальних штампах було виконано аналіз особливостей течії металу з урахуванням конструктивних особливостей моноколіс.

На рис 3.1 представлено розподіл швидкостей переміщення матеріальних точок(об'ємів) заготовки в процесі пластичного формоутворення моноколеса на різних етапах деформування



a



б

Рис 3.1 Розподіл швидкостей переміщення матеріальних точок металу заготовки на різних етапах: а – осадка циліндричної заготовки, б – видавлювання пера лопатки в порожнину багатоканального штампу

Кінематичний аналіз показує, що на першому етапі осаджування заготовки матеріальні точки рухаються в суто радіальному напрямку в площині поперечного перерізу заготовки (Z0Y). Поле швидкостей заготовки в циліндричній системі координат описується, як для процесу осаджування наступними залежностями

$$V_r = -\frac{V_0}{2l} * r$$

$$V_z = \frac{V_0}{l} * z$$

$$V_{\theta} = 0 \quad (3.1)$$

Де V_0 – швидкість переміщення матеріальних точок на поверхні заготовки, яка задається швидкістю пуансона штампу

l – висота заготовки

Тоді розподіл компоненти тензора швидкості деформацій мають наступний вигляд

$$\begin{aligned} \varepsilon_{rr} &= -\frac{V_0}{2 * l}; \quad \varepsilon_{r\theta} = 0 \\ \varepsilon_{\theta\theta} &= -\frac{V_0}{2 * l}; \quad \varepsilon_{\theta z} = 0 \\ \varepsilon_{zz} &= \frac{V_0}{l}; \quad \varepsilon_{zr} = 0 \end{aligned} \quad (3.2)$$

Враховуючи (3.1) та кінематичну картину руху матеріальних точок видно, що радіальна складова вектору переміщень V_r залежить тільки від координати r , та має кругову симетрію швидкості переміщення матеріальних часток металу будуть направлені в радіальному напрямку.

На другому етапі формоутворення після торкання бічної поверхні заготовки циліндричної поверхні матриці, починається видавлювання металу заготовки в бічні порожнини з формоутворенням пера лопатки.

В зонах, які прилягають до формуючих порожнин кожного пера лопаток течія металу змінюється, напрямки складових вектору переміщень матеріальних часток змінюється, вони повертаються в напрямі осі пера лопатки, що заповнюється.

Виникає симетрична зона зміни напрямку течії матеріалу в порожнину штампа для кожної лопатки. Кількість таких зон відповідає кількості лопаток в моноколесі – N

Таким чином при формоутворенні моноколеса можна розглядати N зон, характерної пластичної течії, які ідентичні між собою. Ці зони відокремлюються одна від одної лініями розділу течії матеріалу, як це показано на рис. 3.2

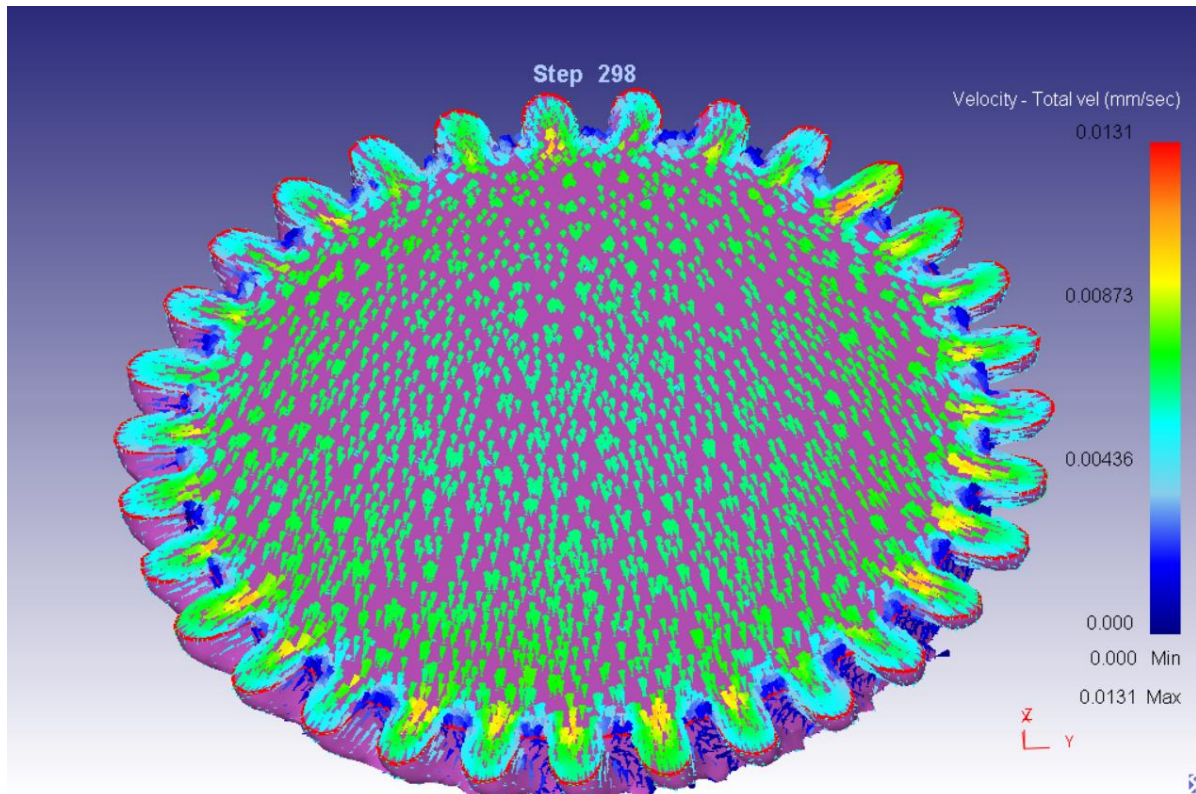


Рис 3.2 До визначення зон з однотипною характерною течією маталу

Ці зони стискаються по граничним поверхням для яких виконуються граничні умови

- 1) Суцільності заготовки в цілому
- 2) Умови рівноваги матеріальних точок на граничній поверхні

Частина заготовки обмежена границями характерної пластичної течії в подальшому будемо називати представницьким об'ємом, який відповідає по деформаційним та силовим характеристикам пластичного формоутворення, всій деталі в цілому рис 3.3.

Кількість представницьких об'ємів відповідає кількості лопаток моноколеса

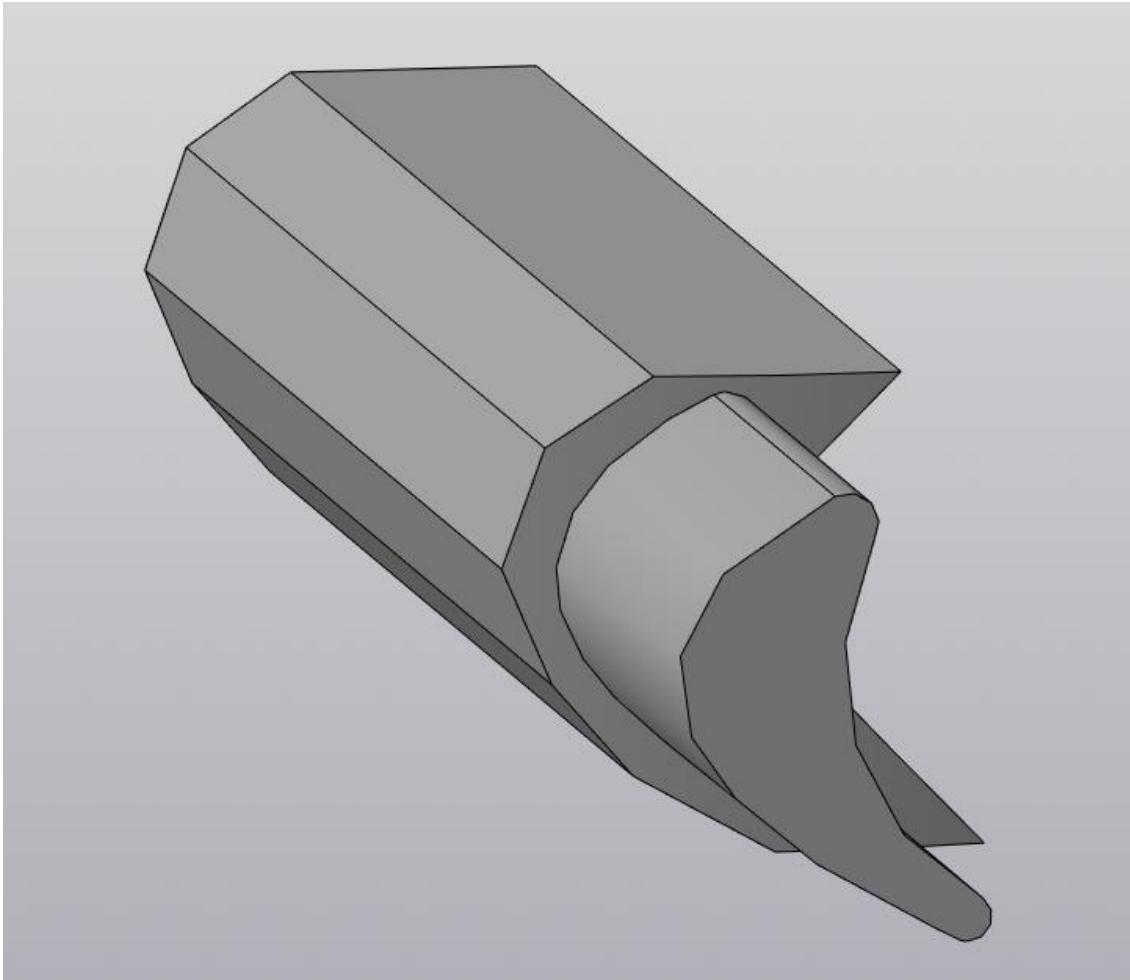


Рис 3.3 Форма представницького об'єму

Спрощений метод розрахунку багатоканальних вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів полягає у тому щоб значно скоротити час для розрахунків деталей типу моноколесо. Метод заключається в отриманні властивостей пластичної деформації моноколів на спрощеній моделі елемента моноколеса, який має ефективні характеристики з подальшим розповсюдженням цих властивостей на цілу деталь(моноколесо).

При цьому приймається основна гіпотеза властивостей адитивності елементів моноколеса які відповідають властивостям моноколеса в цілому.

Загальний метод складається з наступних розділів

1) Декомпозиція деталі, яка ґрунтується на дотриманні властивостей ідентичних для кожного елемента окремо, з урахуванням форми деталі та напрямом пластичної течії матеріалу. При декомпозиції важливо щоб зберігалось правило адитивності, для можливості реалізувати цей метод для розрахунків

2) Вибір форми типового елементу. Деталь ділиться на n кількість типових елементів. Вибір форми залежить від форми деталі, характеру навантаження, пластичної течії. Типовий елемент має мати властивості, які будуть ідентичні з іншими типовими елементами, а отже і моноколеса в цілому, схожий метод широко використовується для композитних матеріалів.

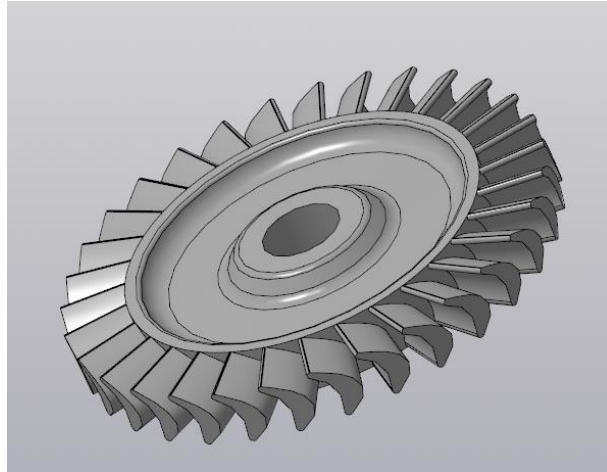


Рис 3.4 Моноколесо з радіальним розташуванням лопаток

На прикладі деталі вище, кількість типових елементів буде дорівнювати кількості лопаток на моноколесі, при формоутворенні кожної окремої лопатки буде утворюватись нейтральний шар у якому не будуть діяти радіальні деформації. Розділення типових елементів мають відбуватися саме по цим нейтральним поверхням для суттєвого зменшення похибок при розрахунку.

3) Призначення граничних умов

Коли типовий елемент вже обраний, необхідно призначити граничні умови при формоутворенні окремого елемента.

При моделюванні формоутворення типового елемента, по площинах розрізу або ж нейтрального шару, треба обмежити рух у радіальному напрямку, для створення ідентичних умов як і при знаходженні типового елемента всередині колеса.

Також при заданні граничних умов треба врахувати, що на площинах розрізу не має виникати зусиль, які не виникають у цілому колесі, наприклад задати коефіцієнт тертя 0 на площинах розрізу.

Коли інструменти налаштовані, можна задавати різні режими деформації зі зміною температури, швидкістю переміщення інструменту тощо.

4) Вивчення властивостей типового елемента

Досліджується напрям пластичної течії під час формоутворення типового елемента, енергосилові параметри, НДС всередині zdeформованого елемента

5) Синтез

В залежності від кількості типових елементів, які були поділені на етапі “декомпозиція”, складається ціла деталь з типових елементів. Особливість цієї складеної деталі, що НДС типового окремого елемента буде таким самим як і при моделюванні моноколеса, а енергосилові параметри, як наприклад зусилля множиться на кількість типових елементів, поділених при декомпозиції

3.2 Висновки до розділу 3

Розроблений метод розрахунку багатоканальних вісьсиметричних процесів пластичного формоутворення моноколів та виділений представницький об'єм для подальшого розрахунку

РОЗДІЛ 4

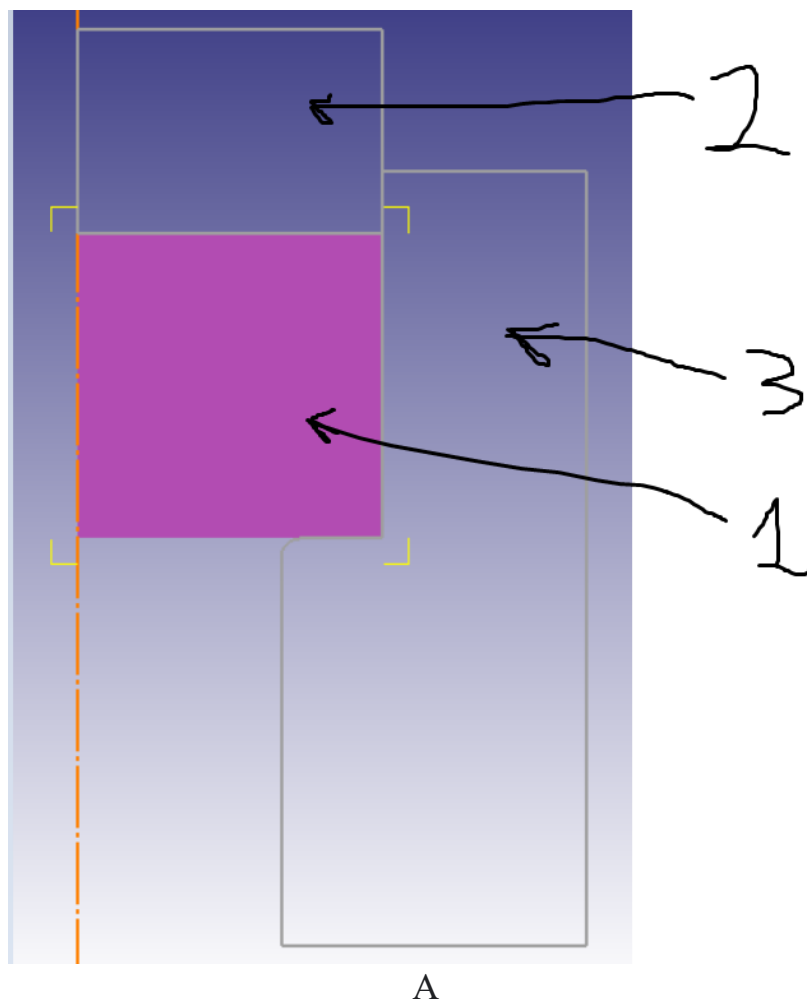
ЧИСЕЛЬНИЙ РОЗРАХУНОК ПРЕДСТАВНИЦЬКОГО ЕЛЕМЕНТУ

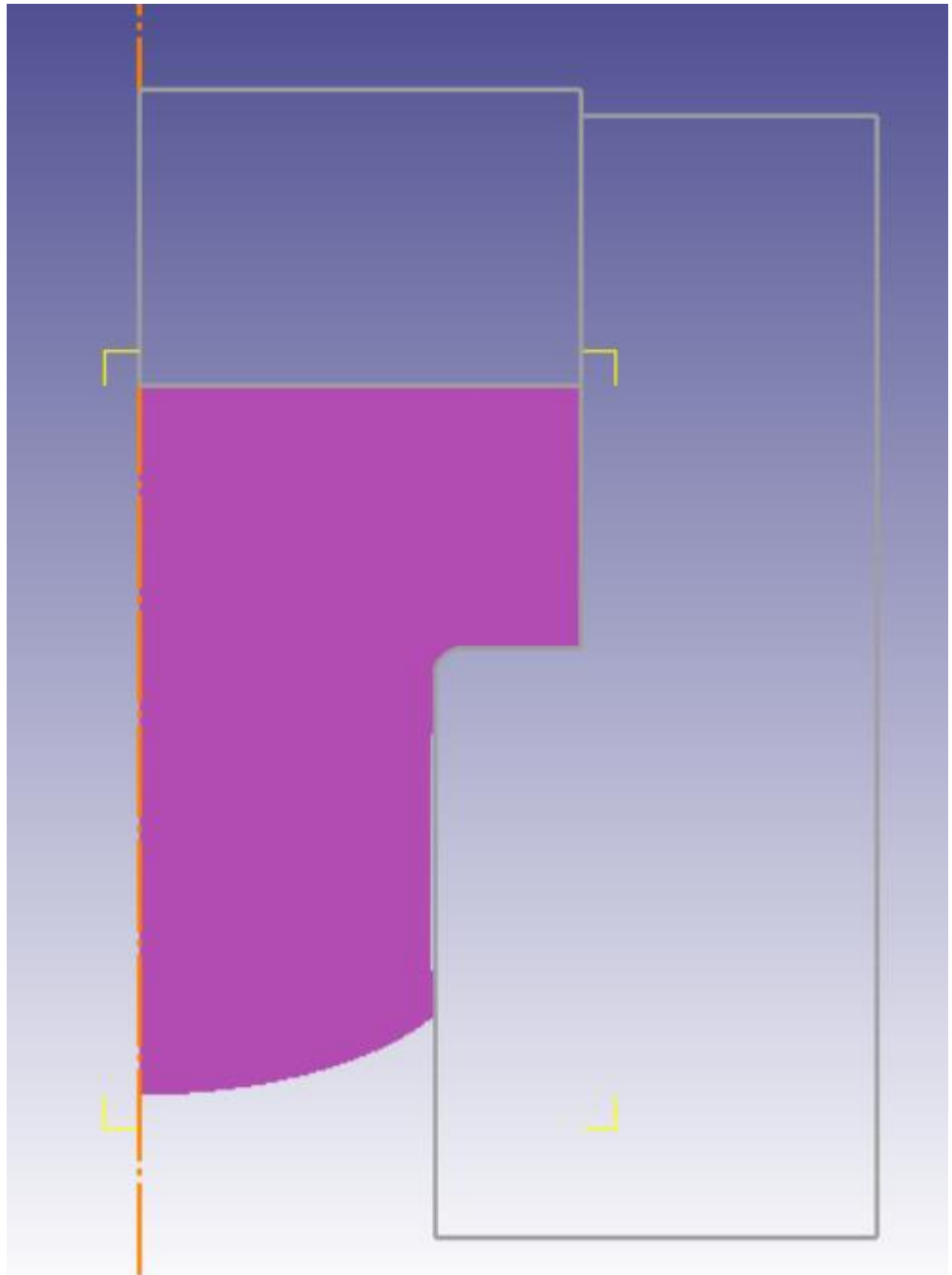
4.1 Дослідження формоутворення тонкостінного елементу у випадку коли вектор сили співпадає з напрямом течії матеріалу

4.1.1 Ізотермічне деформування при швидкості переміщення пуансону 0.01 мм/с

Моделювання проводилось у програмному пакеті для чисельного моделювання Deform 2D з матеріалом Ti6Al4V при температурі 950 °C в ізотермічних умовах при різних швидкостях переміщення інструменту, а саме 1 мм/с, 0.1 мм/с, 0.01 мм/с

Схема процесу зображена на рис 4.1, 1 – заготовка, 2 – пуансон, 3 - матриця





Б

Рис. 4.1 Схема процесу формоутворення представницького об'єму для аксіального типу лопатки у 2Д (а – початок процесу, б – кінець процесу)

На рис 4.2 показаний графік залежності зусиль від часу процесу, при швидкості переміщення пуансону 1 мм/с

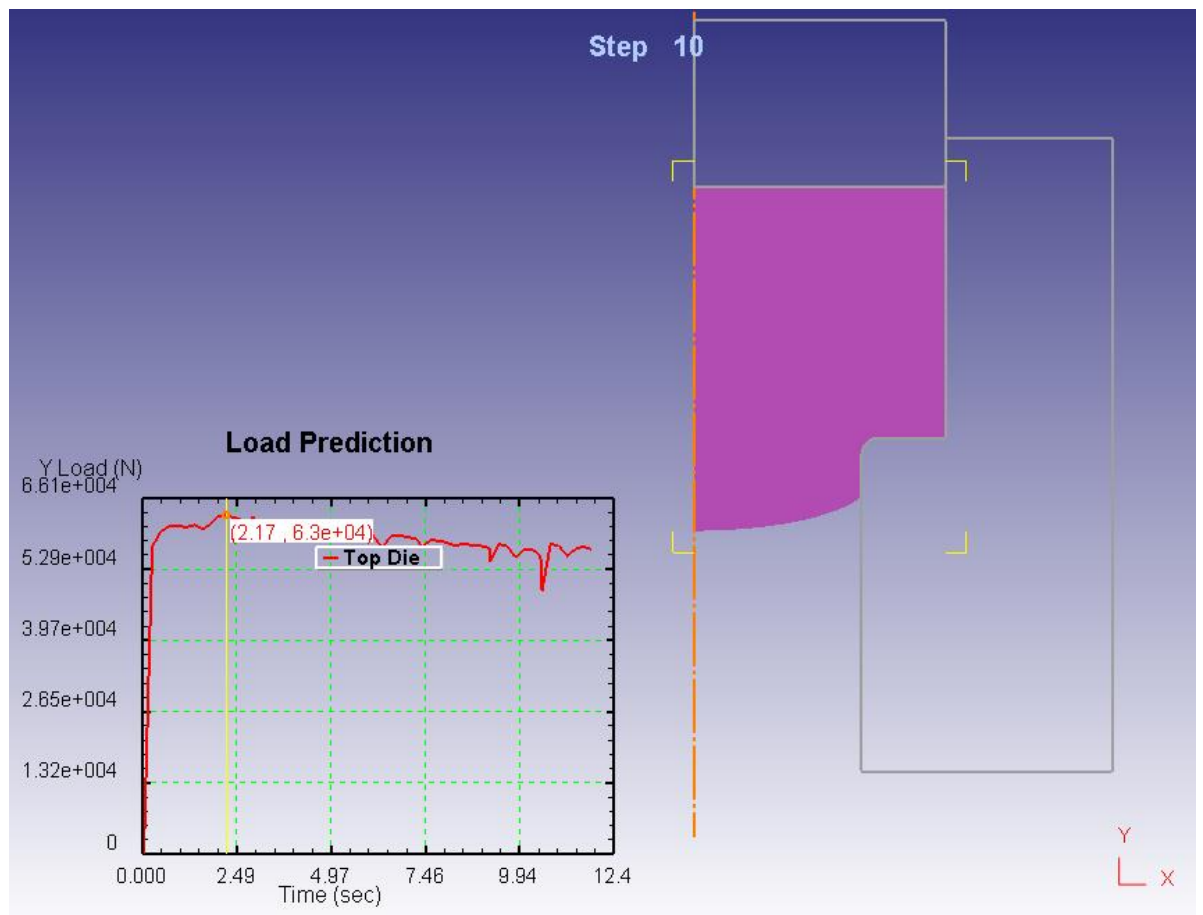


Рис 4.2 Графік залежності зусиль від часу

З графіку можемо зафіксувати, що перші 0.2 секунди зусилля зростає лінійно, що зумовлено пружними деформаціями, максимальне зусилля процесу становить 63 кН що зумовлено формуванням пера лопатки та тертям заготовки з бічною поверхнею матриці.

На рис 4.3 зображена інтенсивність деформації по об'єму заготовки

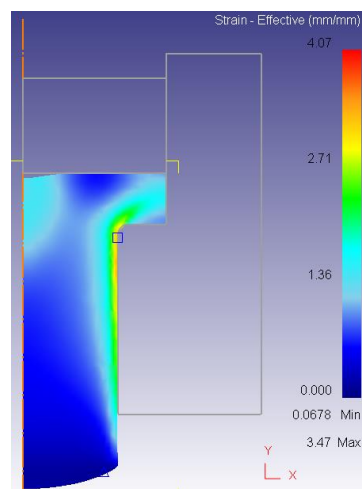


Рис 4.3 Деформації всередині заготовки

З рис. 4.3 видно, що найбільш інтенсивні деформації утворюються у зоні контакту з бічною поверхнею матриці, в тому числі біля заокругленої частини матриці

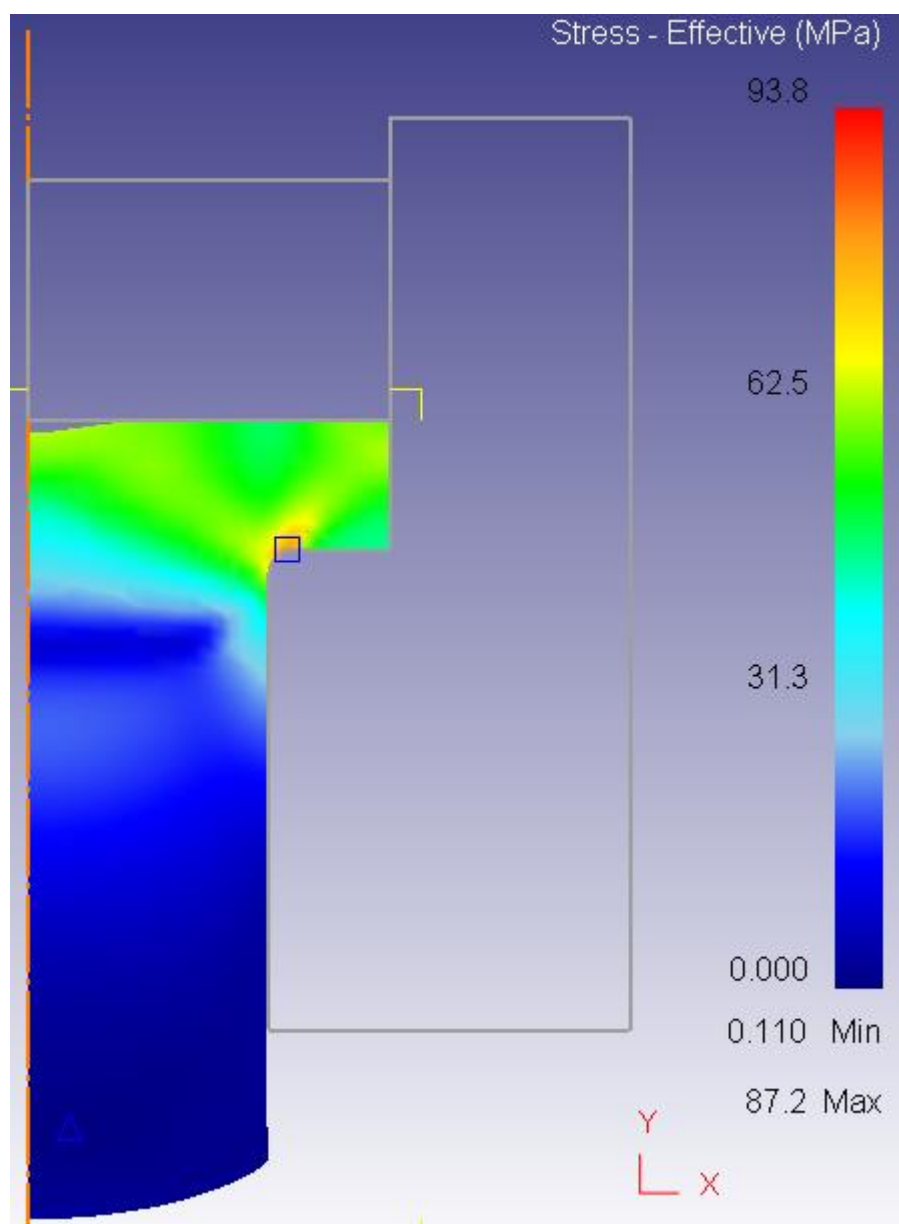


Рис 4.4 Напруження всередині заготовки

З розподілу напружень помітно, що найбільше напруження виникає у зоні початку деформацій, тобто заокруглена частина матриці.

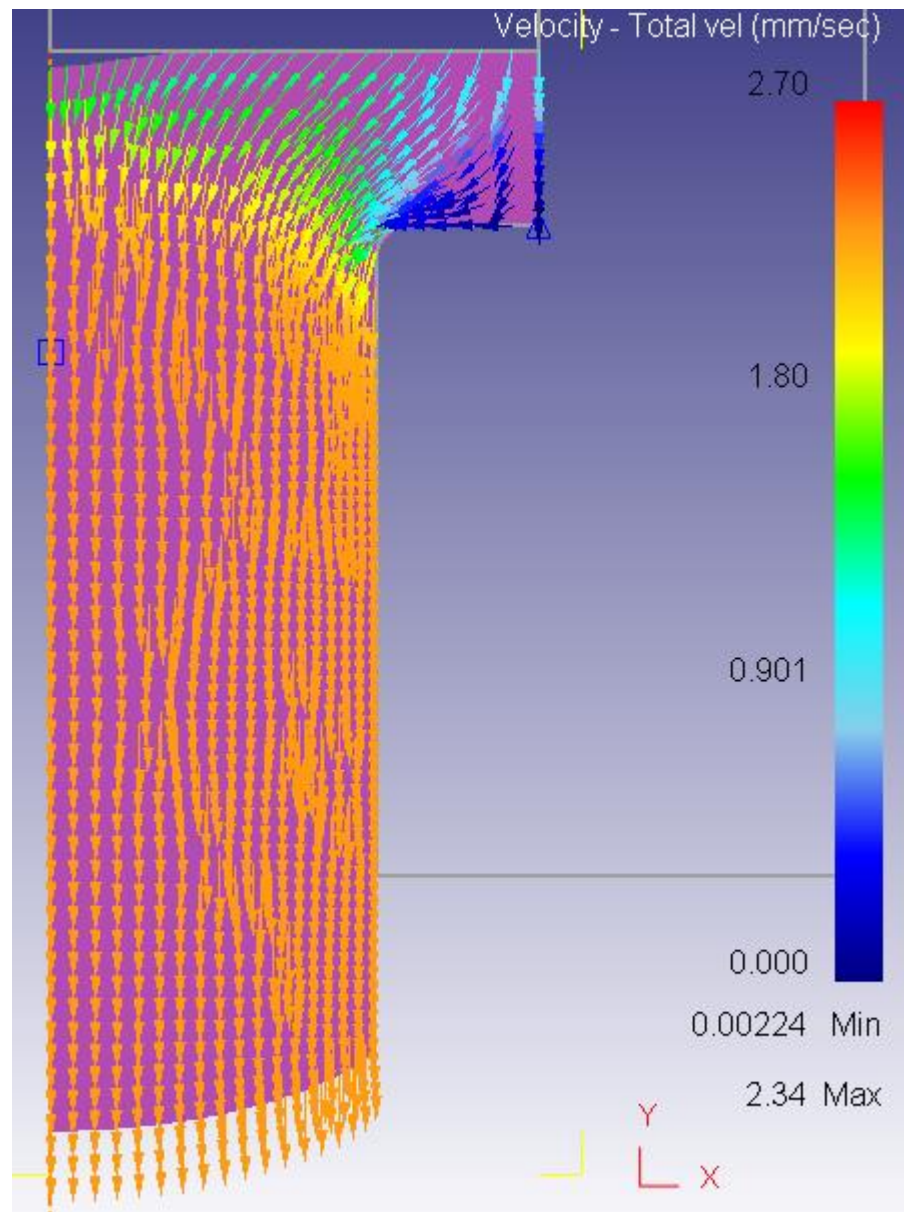


Рис 4.5 Поле швидкостей під час деформації заготовки

Проаналізувавши рис 4.5, можна помітити що під час деформації утворюється зона де матеріал не деформується (сині стрілки на рис 4.5)

4.1.2 Ізотермічне деформування при швидкості деформування 0.1 мм/с

На рис 4.6 показаний графік залежності зусиль від часу процесу, при швидкості переміщення пуансону 0.1 мм/с

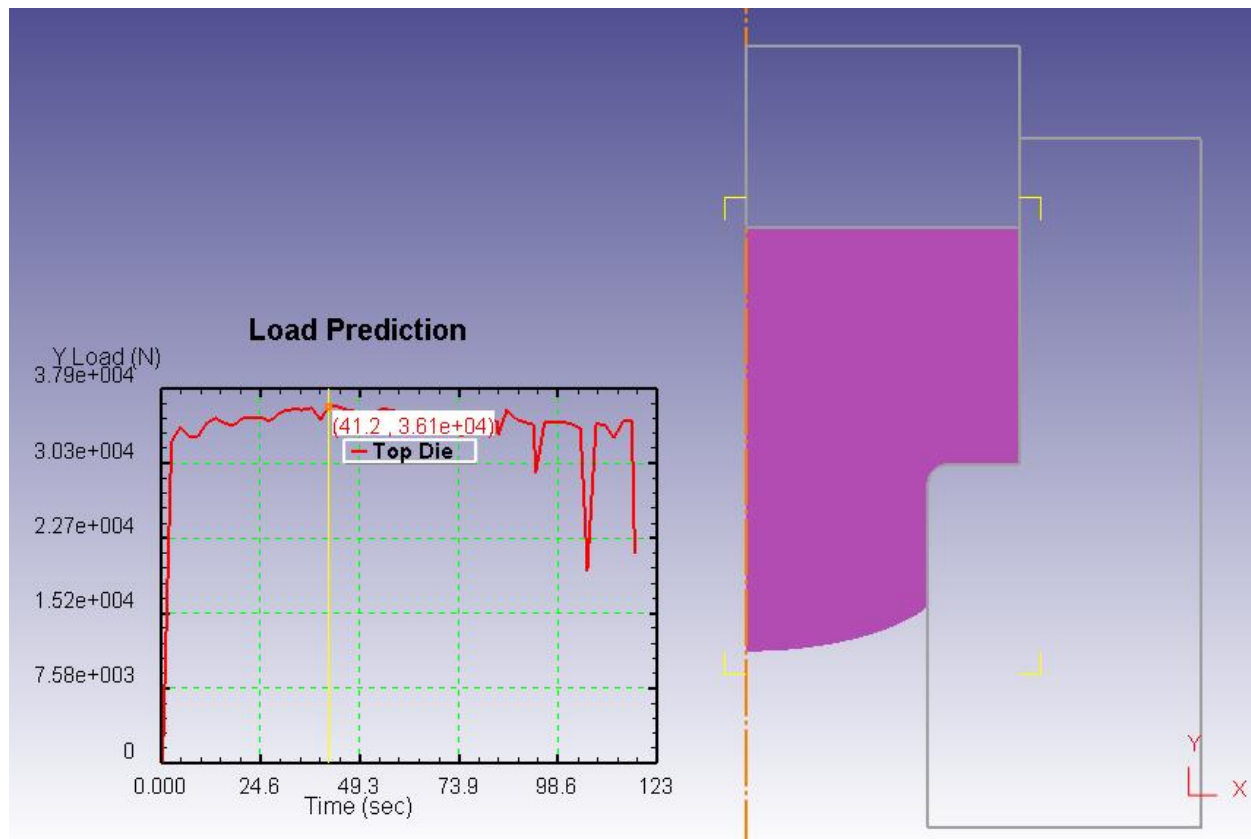


Рис 4.6 Графік залежності зусиль від часу

З графіку можемо зафіксувати, що перші 0.2 секунди зусилля зростає лінійно, що зумовлено пружними деформаціями, максимальне зусилля процесу становить 41 кН що зумовлено формуванням пера лопатки та тертям заготовки з бічною поверхнею матриці.

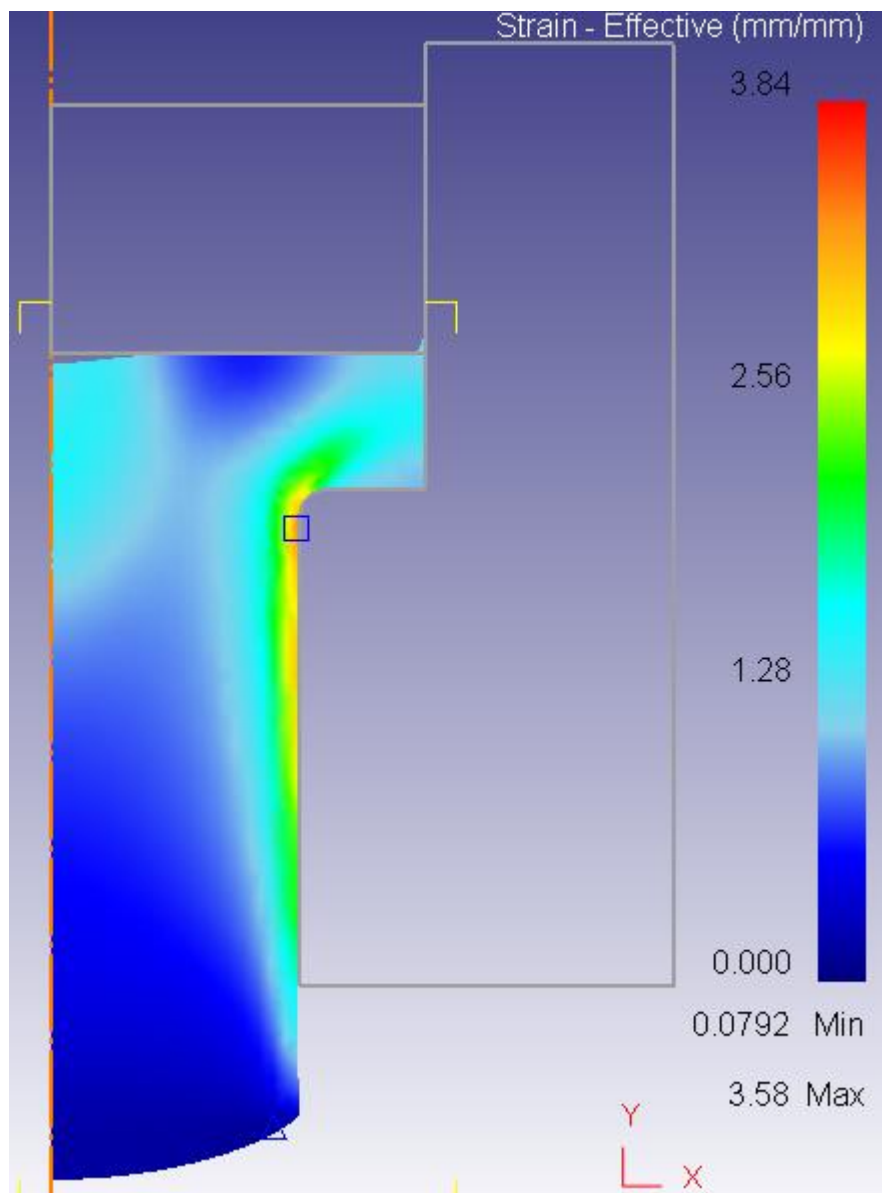


Рис 4.7 Деформації всередині заготовки

З рис. 4.7 видно, що найбільш інтенсивні деформації утворюються у зоні контакту з бічною поверхнею матриці, в тому числі біля заокругленої частини матриці

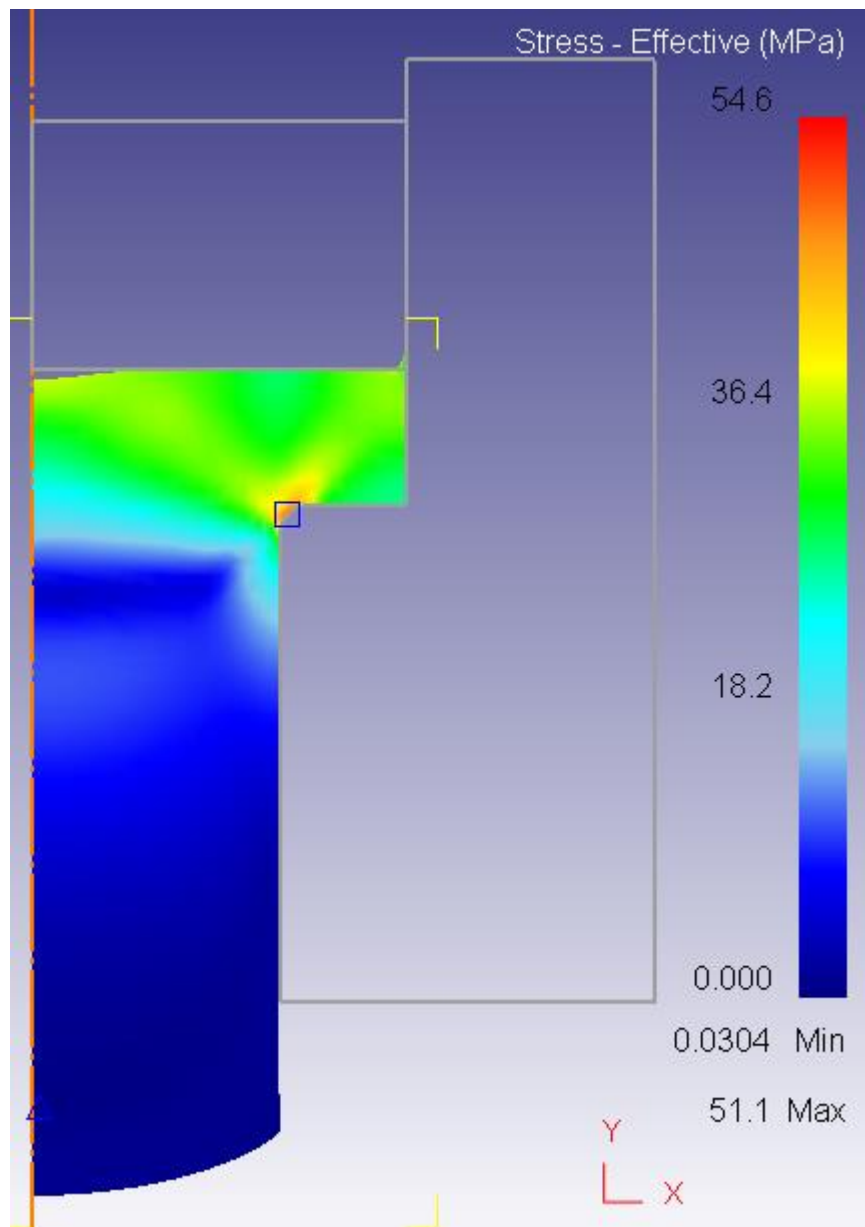


Рис 4.8 Напруження всередині заготовки

З розподілу напружень помітно, що найбільше напруження виникає у зоні початку деформацій, тобто заокруглена частина матриці, але вона знаходиться трішки далі від початку заокруглення матриці у порівнянні з рис 2.3.

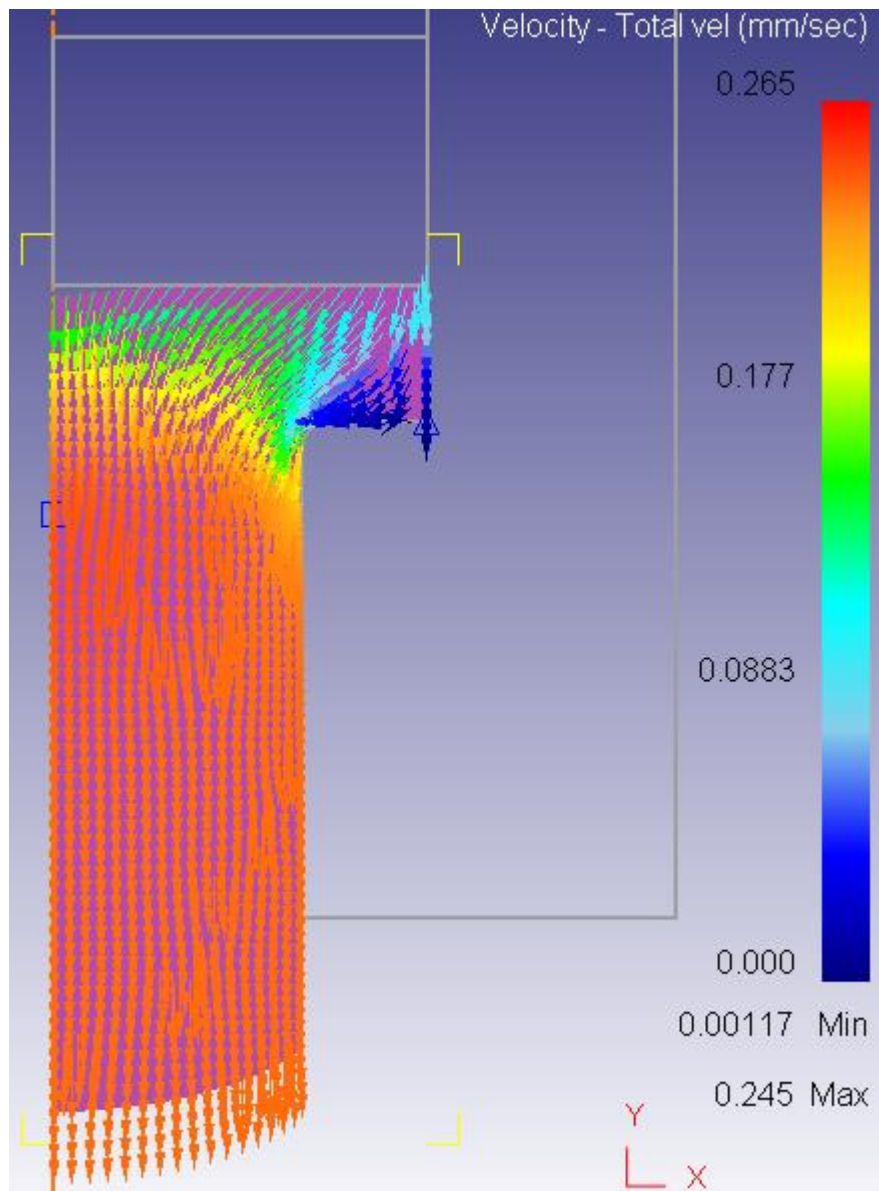


Рис 4.9 Поле швидкостей під час деформації заготовки

Проаналізувавши рис 4.9, можна помітити що під час деформації утворюється зона де матеріал не деформується (сині стрілочки на рис 4.9)

2.1.3 Ізотермічне деформування при швидкості деформування 0.01 мм/с

На рис 4.6 показаний графік залежності зусиль від часу процесу, при швидкості переміщення пуансону 0.01 мм/с

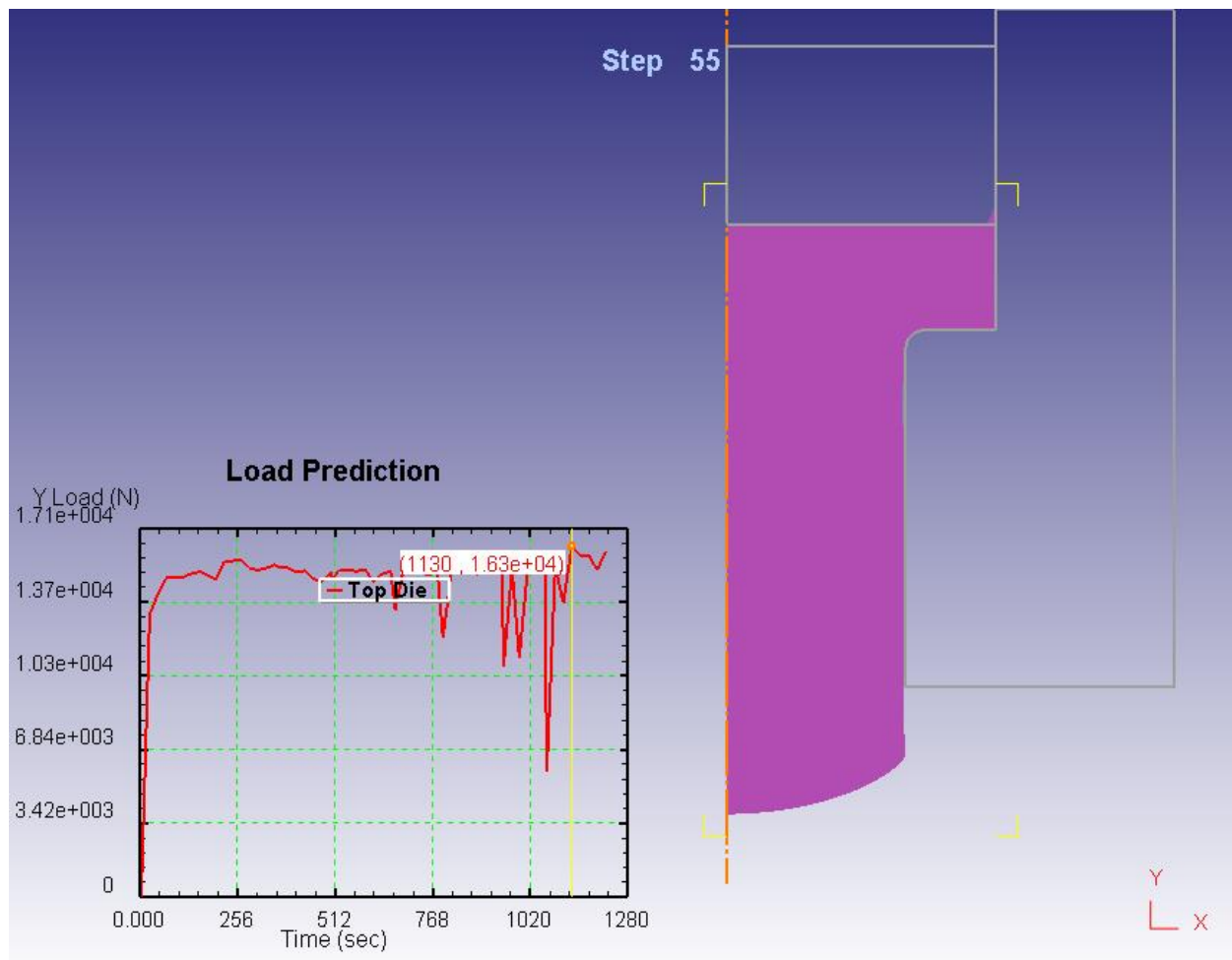


Рис 4.10 Графік залежності зусиль від часу

З графіку можемо зафіксувати, що перші 0.2 секунди зусилля зростає лінійно, що зумовлено пружними деформаціями, максимальне зусилля процесу становить 16,3 кН що зумовлено формуванням пера лопатки та тертям заготовки з бічною поверхнею матриці.

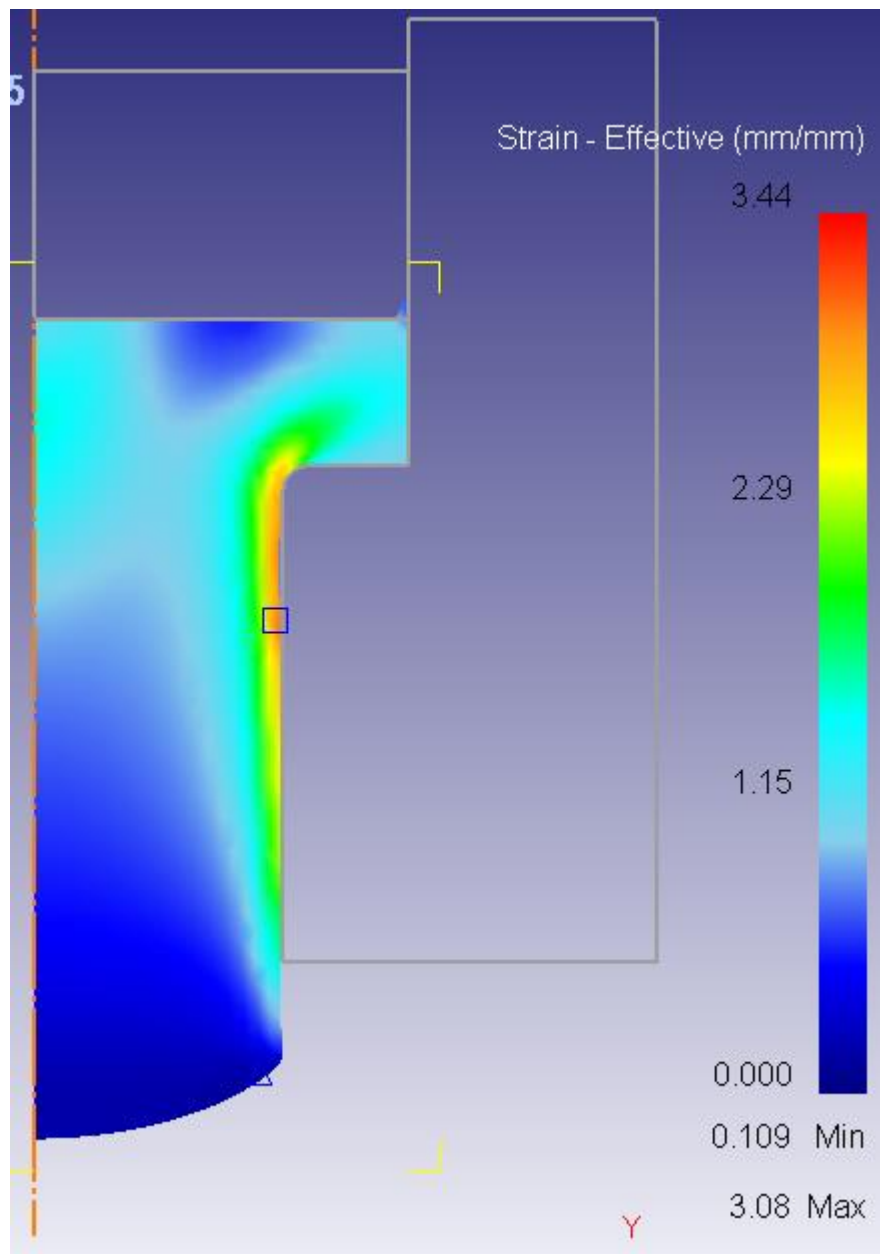


Рис 4.11 Деформації всередині заготовки

З рис. 4.11 видно, що найбільш інтенсивні деформації утворюються у зоні контакту з бічною поверхнею матриці, в тому числі біля заокругленої частини матриці

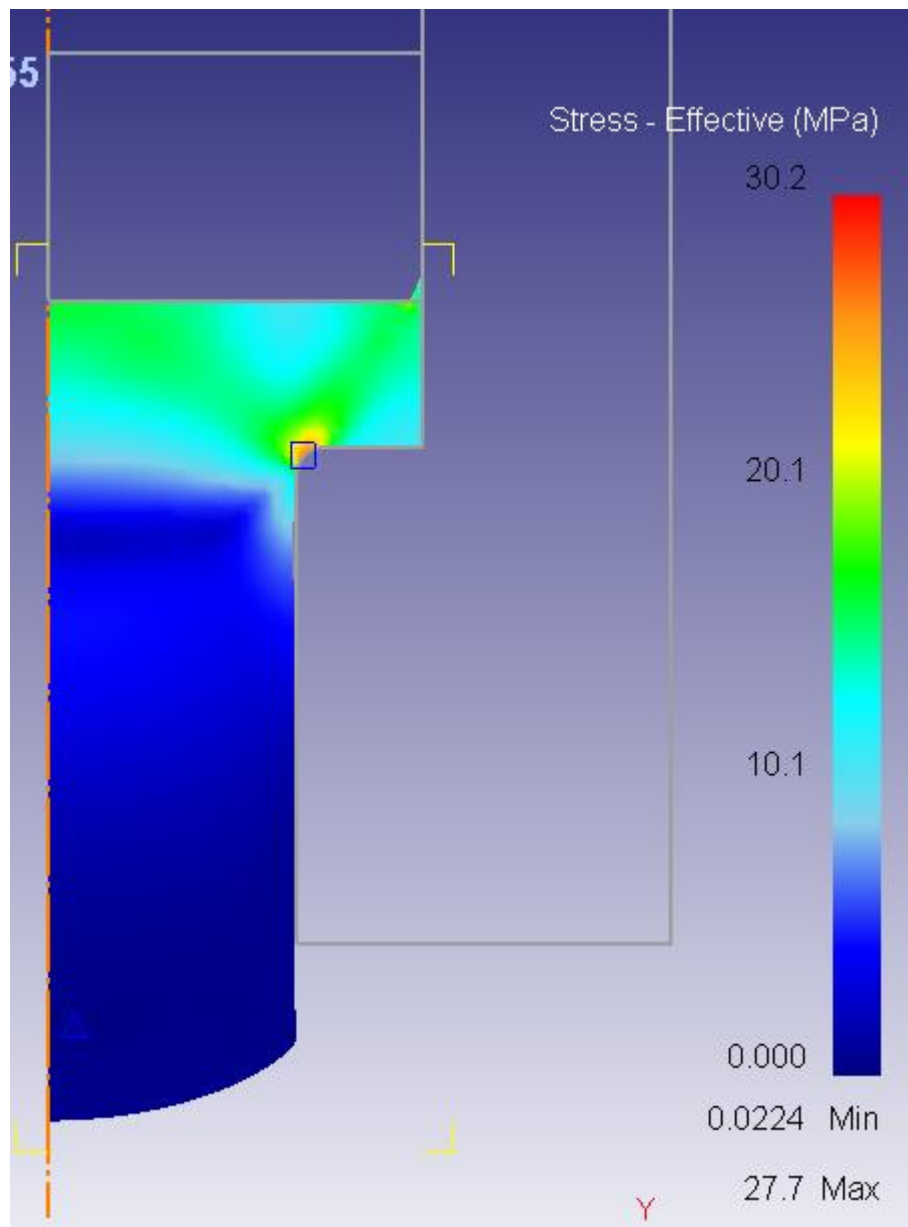


Рис 4.12 Напруження всередині заготовки

З розподілу напружень помітно, що найбільше напруження виникає у зоні початку деформацій, тобто заокруглена частина матриці, але вона знаходиться трішки далі від початку заокруглення матриці у порівнянні з рис 2.3.

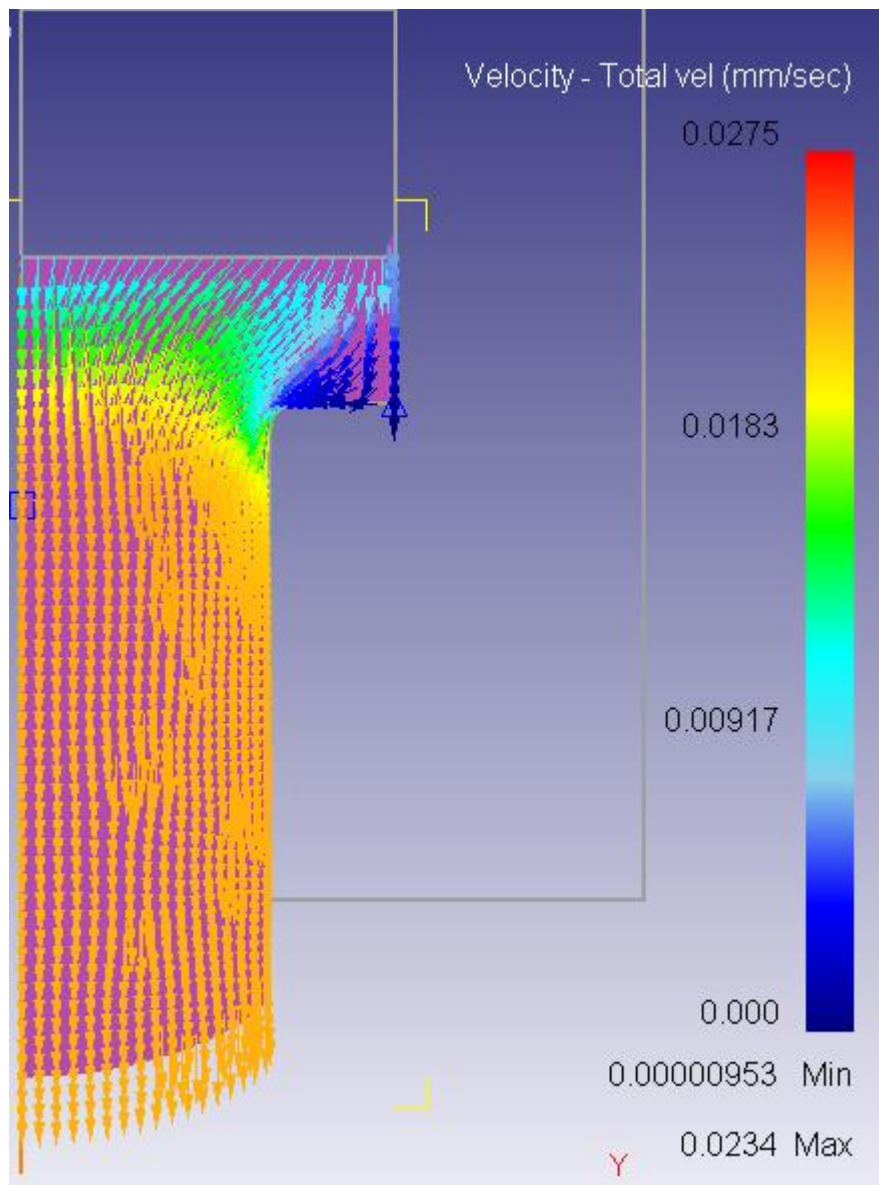


Рис 4.13 Поле швидкостей під час деформації заготовки

На основі цих даних побудуємо залежність зусилля від швидкості деформації

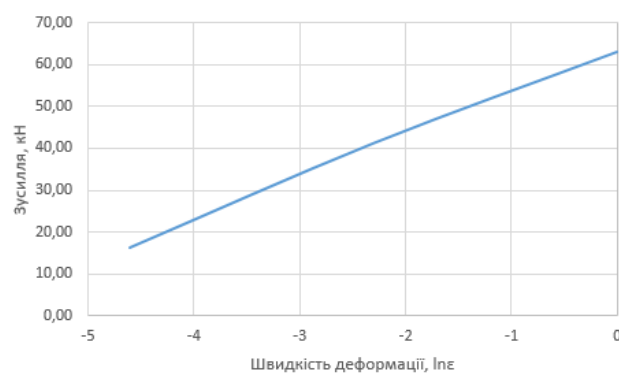


Рис 4.14 Графік залежності зусилля процесу від швидкості переміщення інструменту

За отриманими даними можемо зробити висновок, що збільшення температури деформації впливає на розмір застійної зони та на кут нахилу, тим самим зменшуючи зусилля процесу. Зменшення швидкості переміщення деформуючого інструменту також впливає на розмір застійної зони та на кут нахилу, тим самим зменшуючи зусилля процесу.

4.2 Аналітичний розрахунок МВО

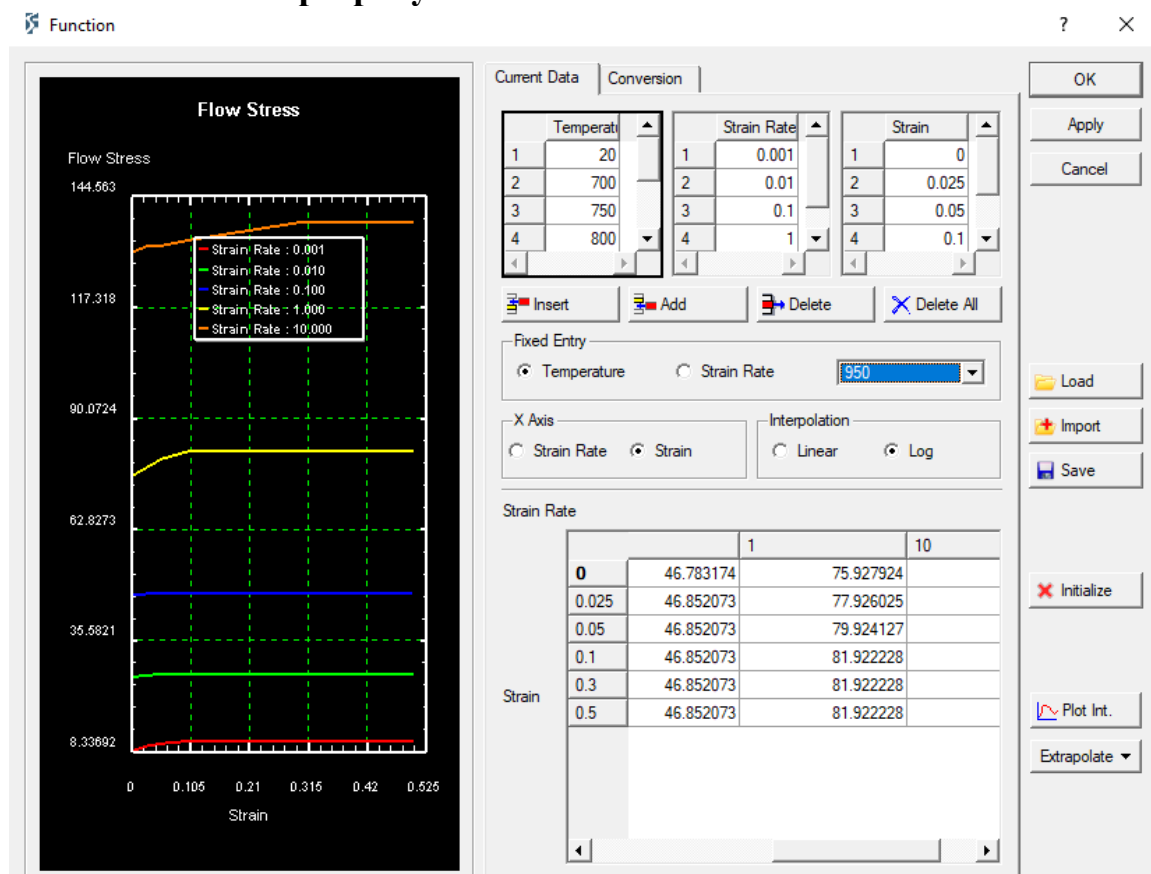


Рис 4.15 Графіки зусиль деформування при температурі 950 °C в залежності від швидкості деформування матеріалу Ti6Al4V

Візьмемо з рис 4.15 значення для подальших розрахунків

$$\sigma_s = 46,85 \text{ МПа}$$

Для розрахунку мінімального зусилля скористаємось методом верхньої оцінки. Метод верхньої оцінки належить до енергетичних методів ОМТ та ґрунтується на законі збереженні енергії. Суть цього методу полягає у тому, що zdeформовану заготовку ми ділимо на прості жорські об'єми, які не деформуються, а рухаються один відносно одного. Для цього зробимо 6 розрахункових схем.

4.2.1 Розрахункова схема 1

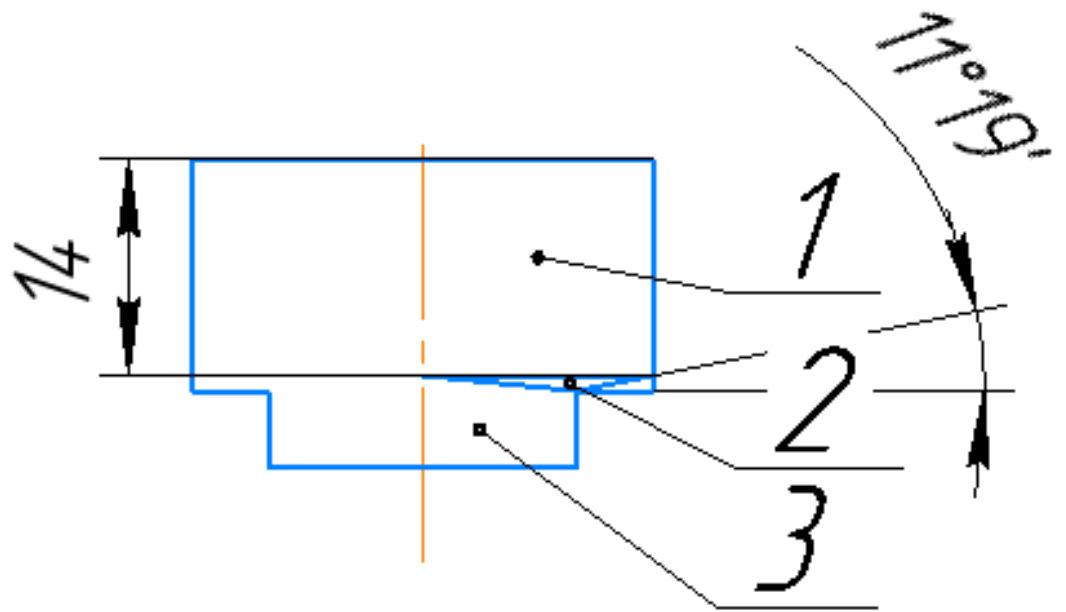


Рис 4.16 Розрахункова схема 1 (відстань 14 мм, кут 11°)

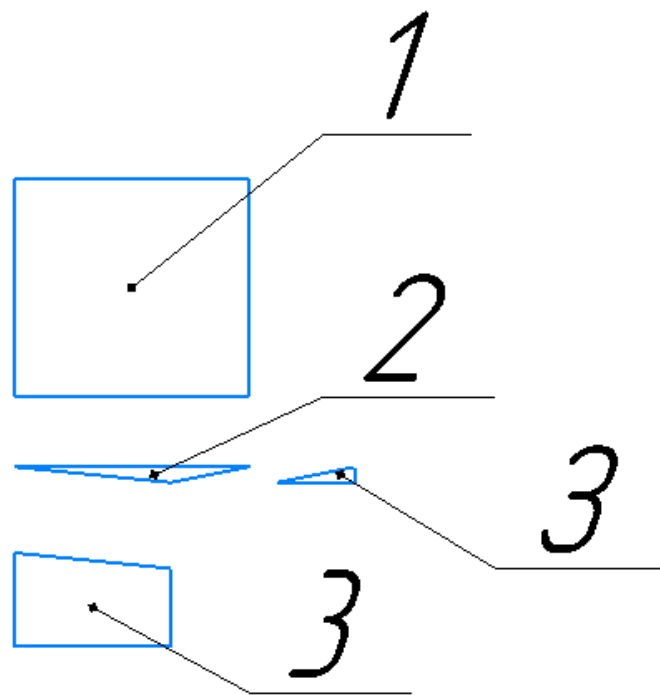


Рис 4.17 Жорсткі об'єми (1,2,3) та застійна зона (3)

Поділимо zdeформовану заготовку на жорсткі об'єми (1,2,3)

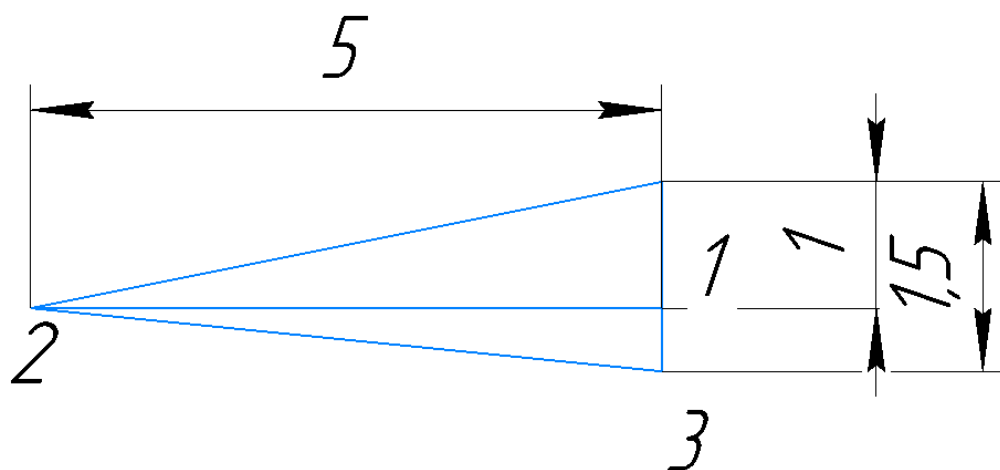


Рис 4.18 План швидкостей до розрахункової схеми 1

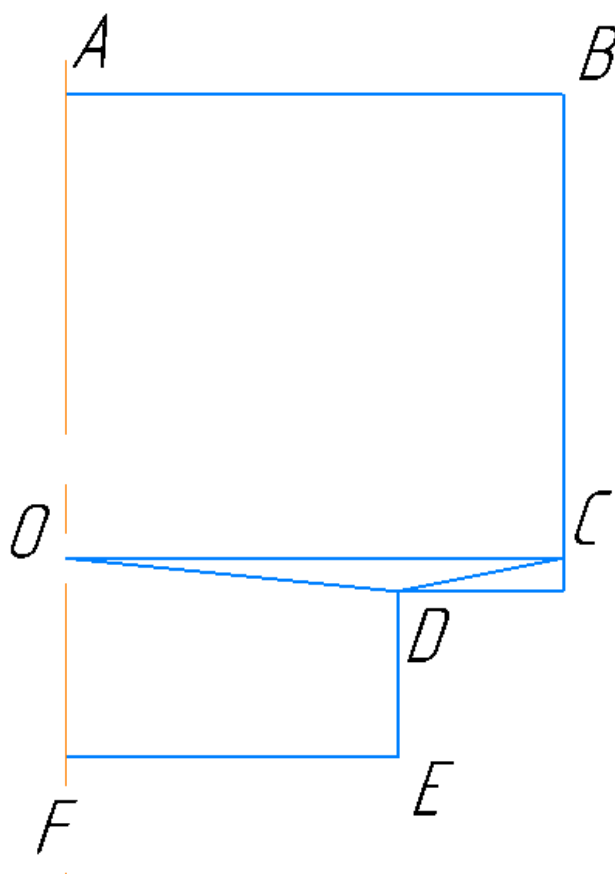


Рис 4.19 Розрахункова схема 1 з назвами точок

У методі верхньої оцінки вважається що пластична деформація проходить за рахунок зміщення та зсуву жорстких об'єктів.

Тоді запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

де $N_{\text{пр}}$ – потужність пресу для виконання операції

N_T – потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами, що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента

N_3 – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між жорсткими об'ємами

Розпишемо рівняння потужності що необхідна для подолання сил тертя

$$N_T = N_T^{BC} + N_T^{DE}$$

Де N_T^{BC} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні BC

N_T^{DE} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні DE

Розпишемо рівняння потужності що необхідна на зсув між об'ємами

$$N_3 = N_3^{OC} + N_3^{CD} + N_3^{OD}$$

Де N_3^{OC} – потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні OC

N_3^{CD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні CD

N_3^{OD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні OD

$$N_T^{BC} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_1 = 0,3 * 46,85 * 1 * 2 * 3,14 * 15 * 14 = 18,53 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_1 – швидкість першого об'єму

F_1 – площа поверхні BC

$$N_T^{DE} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_3 = 0,3 * 46,85 * 1,5 * 2 * 3,14 * 10 * 5 = 6,62 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_3 – швидкість третього об'єму

F_3 – площа поверхні DE

$$N_3^{OC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{12} * F_{OC} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 5 * \frac{3,14 * 30^2}{4} = 95,66 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість першого відносно другого об'єму

F_{OC} – площа поверхні OC

$$N_3^{CD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_2 * F_{CD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 5,1 * 3,14 * 5 * 25 = 54,21 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість другого об'єму

F_{CD} – площа поверхні CD

$$N_3^{OD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{23} * F_{OD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 5 * 3,14 * 10 * 10 = 42,52 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{23} – швидкість третього відносно другого об'єму

F_{OD} – площа поверхні OD

$$P = \frac{N_{\text{пр}}}{V_0} = 217,54 \text{ кН}$$

4.2.2 Розрахункова схема 2

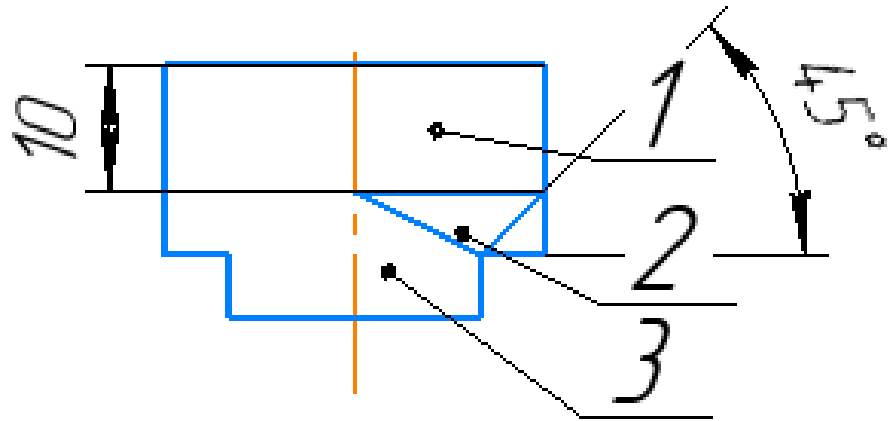


Рис 4.20 Розрахункова схема 2 (кут 45°)

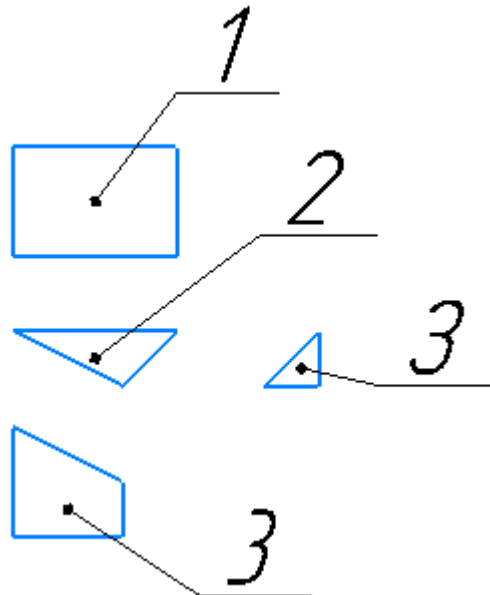


Рис 4.21 Жорсткі об'єми (1,2,3) та застійна зона (3)

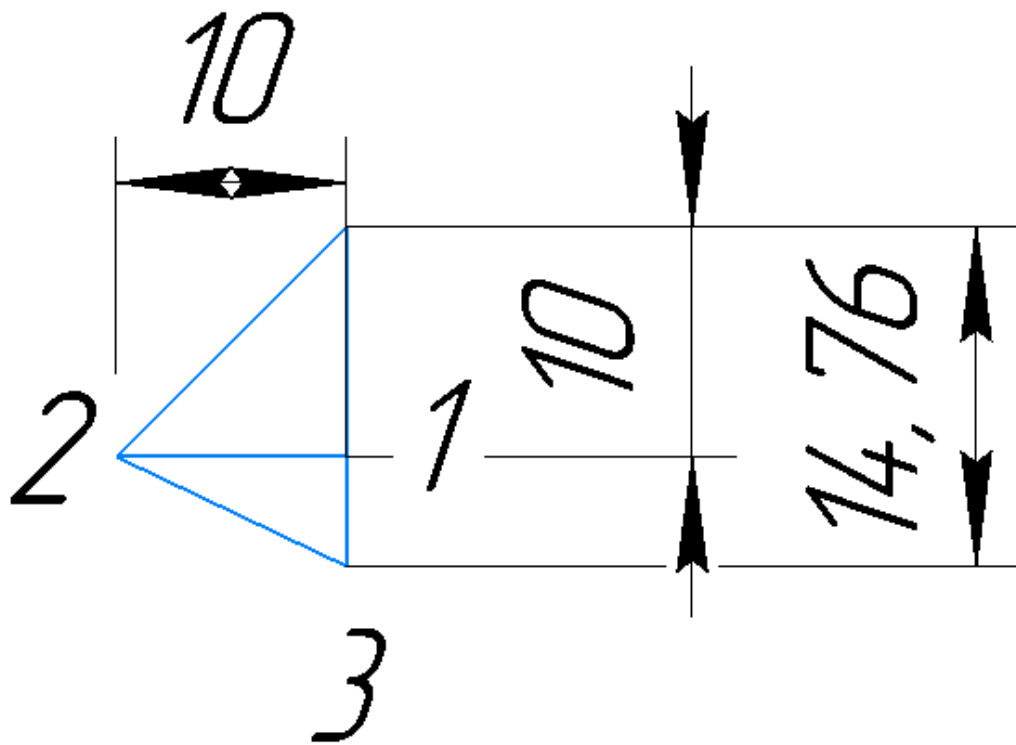


Рис 4.22 План швидкостей до розрахункової схеми 2

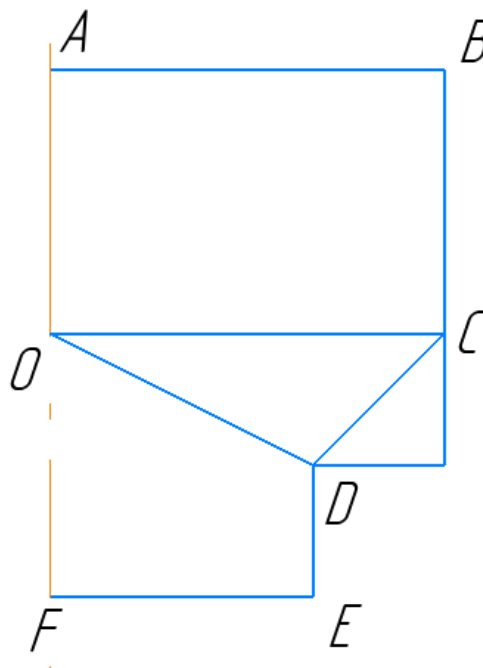


Рис 4.23 Розрахункова схема 2 з назвами точок

Тоді запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

де $N_{\text{пр}}$ – потужність пресу для виконання операції

$N_{\text{т}}$ – потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами,

що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента

N_3 – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між жорсткими об'ємами

Розпишемо рівняння потужності що необхідна для подолання сил тертя

$$N_T = N_T^{BC} + N_T^{DE}$$

Де N_T^{BC} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні BC

N_T^{DE} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні DE

Розпишемо рівняння потужності що необхідна на зсув між об'ємами

$$N_3 = N_3^{OC} + N_3^{CD} + N_3^{OD}$$

Де N_3^{OC} – потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні OC

N_3^{CD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні CD

N_3^{OD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні OD

$$N_T^{BC} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_1 = 0,3 * 46,85 * 1 * 2 * 3,14 * 15 * 10 = 13,24 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_1 – швидкість першого об'єму

F_1 – площа поверхні BC

$$N_T^{DE} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_3 = 0,3 * 46,85 * 1,48 * 2 * 3,14 * 10 * 5 = 6,53 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_3 – швидкість третього об'єму

F_3 – площа поверхні DE

$$N_3^{OC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{12} * F_{OC} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1 * \frac{3,14 * 30^2}{4} = 19,13 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість першого відносно другого об'єму

F_{OC} – площа поверхні OC

$$N_3^{CD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_2 * F_{CD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1,41 * 3,14 * 7,07 * 25 = 21,19 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість другого об'єму

F_{CD} – площа поверхні CD

$$N_3^{OD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{23} * F_{OD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1,1 * 3,14 * 10 * 11,1 = 10,38 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{23} – швидкість третього відносно другого об'єму

F_{OD} – площа поверхні OD

$$N_{\text{пр}} = 70,47 \text{ кН}$$

4.2.3 Розрахункова схема 3

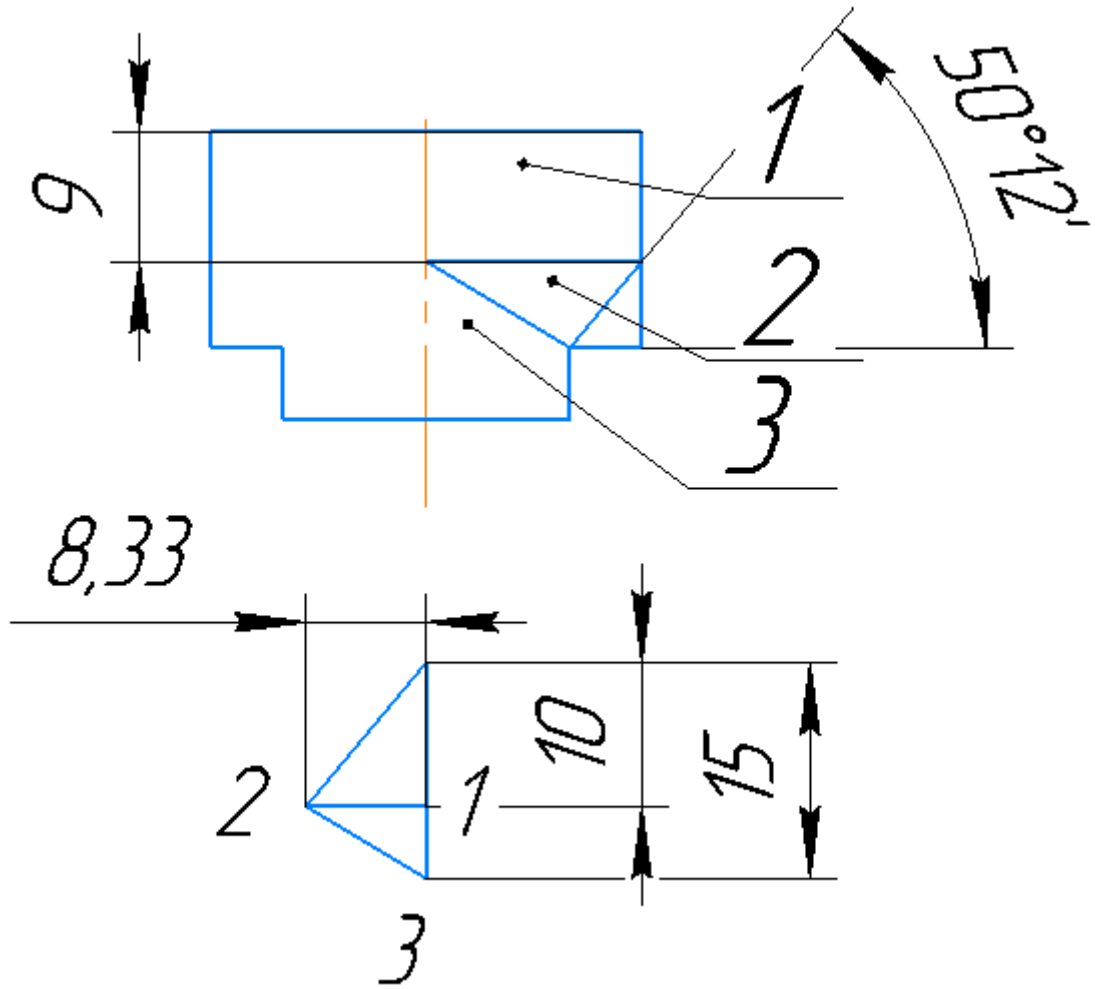


Рис 4.24 Розрахункова схема(кут 50) та план швидкостей

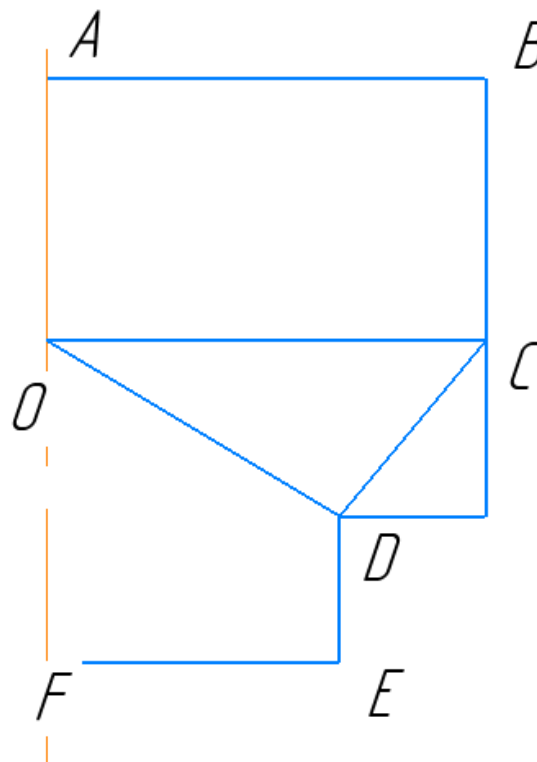


Рис 4.24 Розрахункова схема 3 з назвами точок

Тоді запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

де $N_{\text{пр}}$ – потужність пресу для виконання операції

$N_{\text{т}}$ – потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами, що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента

$N_{\text{з}}$ – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між жорсткими об'ємами

Розпишемо рівняння потужності що необхідна для подолання сил тертя

$$N_{\text{т}} = N_{\text{т}}^{\text{BC}} + N_{\text{т}}^{\text{DE}}$$

Де $N_{\text{т}}^{\text{BC}}$ – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні
BC

$N_{\text{т}}^{\text{DE}}$ – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні
DE

Розпишемо рівняння потужності що необхідна на зсув між об'ємами

$$N_{\text{з}} = N_{\text{з}}^{\text{OC}} + N_{\text{з}}^{\text{CD}} + N_{\text{з}}^{\text{OD}}$$

Де $N_{\text{з}}^{\text{OC}}$ – потужність, що необхідна для подолання сил зсув по
поверхні OC

$N_{\text{з}}^{\text{CD}}$ - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні
CD

$N_{\text{з}}^{\text{OD}}$ - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні
OD

$$N_T^{BC} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_1 = 0,3 * 46,85 * 1 * 2 * 3,14 * 15 * 9 = 11,91 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_1 – швидкість першого об'єму

F_1 – площа поверхні BC

$$N_T^{DE} = \sigma_s * \mu * V_3 * F_3 = 0,3 * 46,85 * 1,5 * 2 * 3,14 * 10 * 5 = 6,62 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_3 – швидкість третього об'єму

F_3 – площа поверхні DE

$$N_3^{OC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{12} * F_{OC} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,83 * \frac{3,14 * 30^2}{4} = 15,88 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість першого відносно другого об'єму

F_{OC} – площа поверхні OC

$$N_3^{CD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_2 * F_{CD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1,3 * 3,14 * 7,8 * 25 = 21,56 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість другого об'єму

F_{CD} – площа поверхні CD

$$N_3^{OD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{23} * F_{OD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,97 * 3,14 * 10 * 11,6 = 9,57 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{23} – швидкість третього відносно другого об'єму

F_{OD} – площа поверхні OD

$$N_{\text{пр}} = 65,54 \text{ кН}$$

4.2.4 Розрахункова схема 4

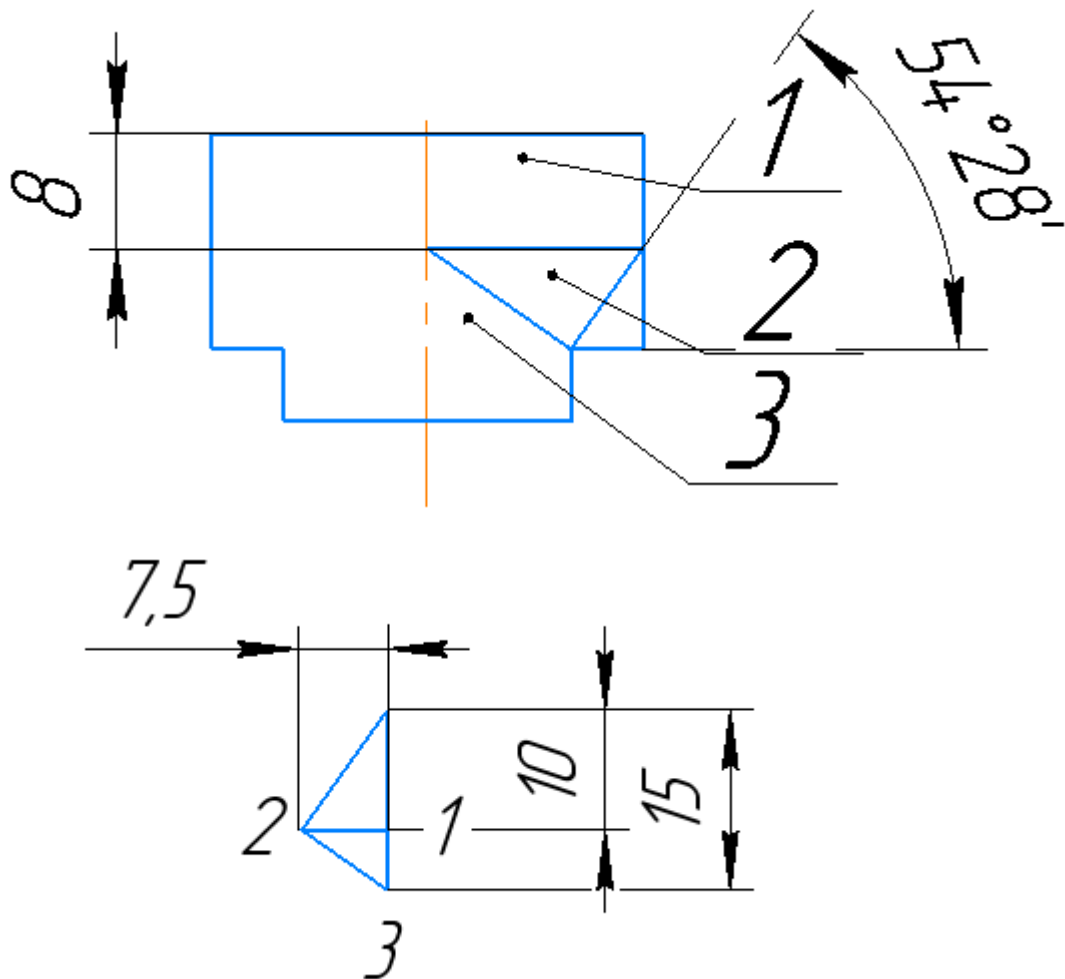


Рис 4.25 Розрахункова схема 4(кут 54) та план швидкостей

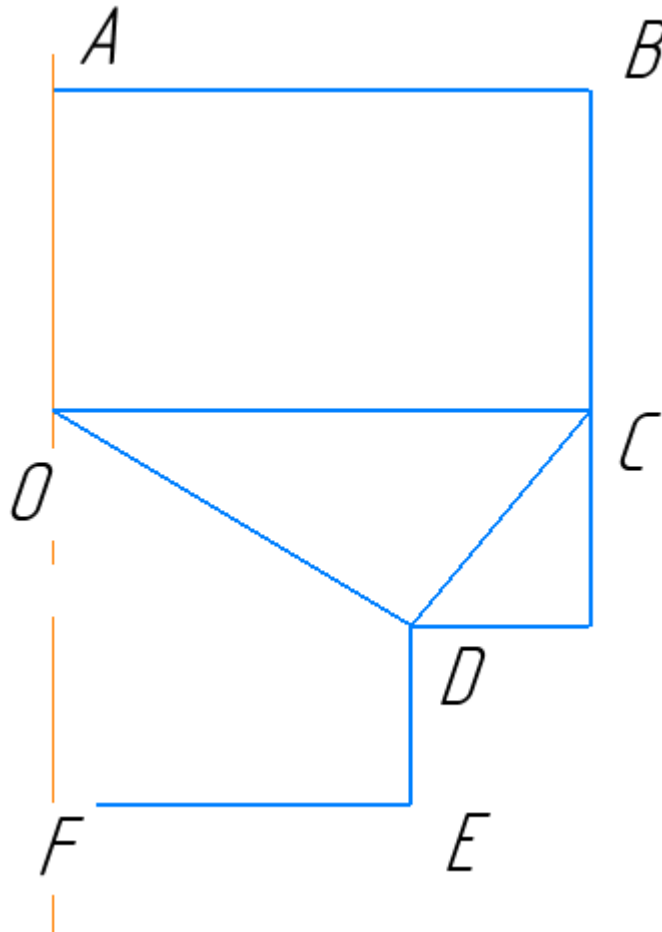


Рис 4.26 Позначення точок на розрахунковій схемі

Тоді запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

де $N_{\text{пр}}$ – потужність пресу для виконання операції

$N_{\text{т}}$ – потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами, що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента

$N_{\text{з}}$ – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між жорсткими об'ємами

Розпишемо рівняння потужності що необхідна для подолання сил тертя

$$N_{\text{т}} = N_{\text{т}}^{\text{BC}} + N_{\text{т}}^{\text{DE}}$$

Де $N_{\text{т}}^{\text{BC}}$ – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні

BC

N_T^{DE} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні

DE

Розпишемо рівняння потужності що необхідна на зсув між об'ємами

$$N_3 = N_3^{OC} + N_3^{CD} + N_3^{OD}$$

Де N_3^{OC} – потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні ОС

N_3^{CD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні

CD

N_3^{OD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні

OD

$$N_T^{BC} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_1 = 0,3 * 46,85 * 1 * 2 * 3,14 * 15 * 8 = 10,59 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_1 – швидкість першого об'єму

F_1 – площа поверхні BC

$$N_T^{DE} = \sigma_s * \mu * V_3 * F_3 = 0,3 * 46,85 * 1,5 * 2 * 3,14 * 10 * 5 = 6,62 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_3 – швидкість третього об'єму

F_3 – площа поверхні DE

$$N_3^{OC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{12} * F_{OC} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,75 * \frac{3,14 * 30^2}{4} = 14,35 \text{кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість першого відносно другого об'єму

F_{OC} – площа поверхні ОС

$$N_3^{CD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_2 * F_{CD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1,22 * 3,14 * 8,6 * 25 = 22,3 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість другого об'єму

F_{CD} – площа поверхні CD

$$N_3^{OD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{23} * F_{OD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,87 * 3,14 * 10 * 12,2 = 9,02 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{23} – швидкість третього відносно другого об'єму

F_{OD} – площа поверхні OD

$$N_{\text{пр}} = 62,88 \text{ кН}$$

4.2.5 Розрахункова схема 5

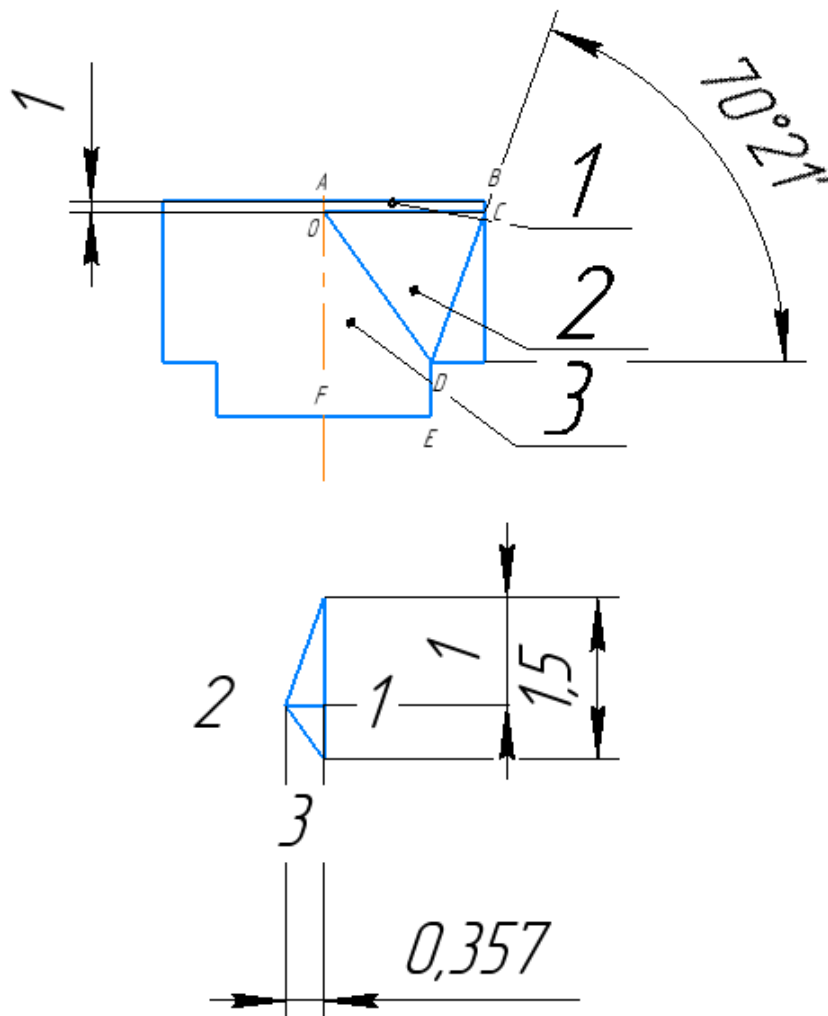


Рис 4.27 Розрахункова схема 5 (кут 70) та план швидкостей до розрахункової схеми

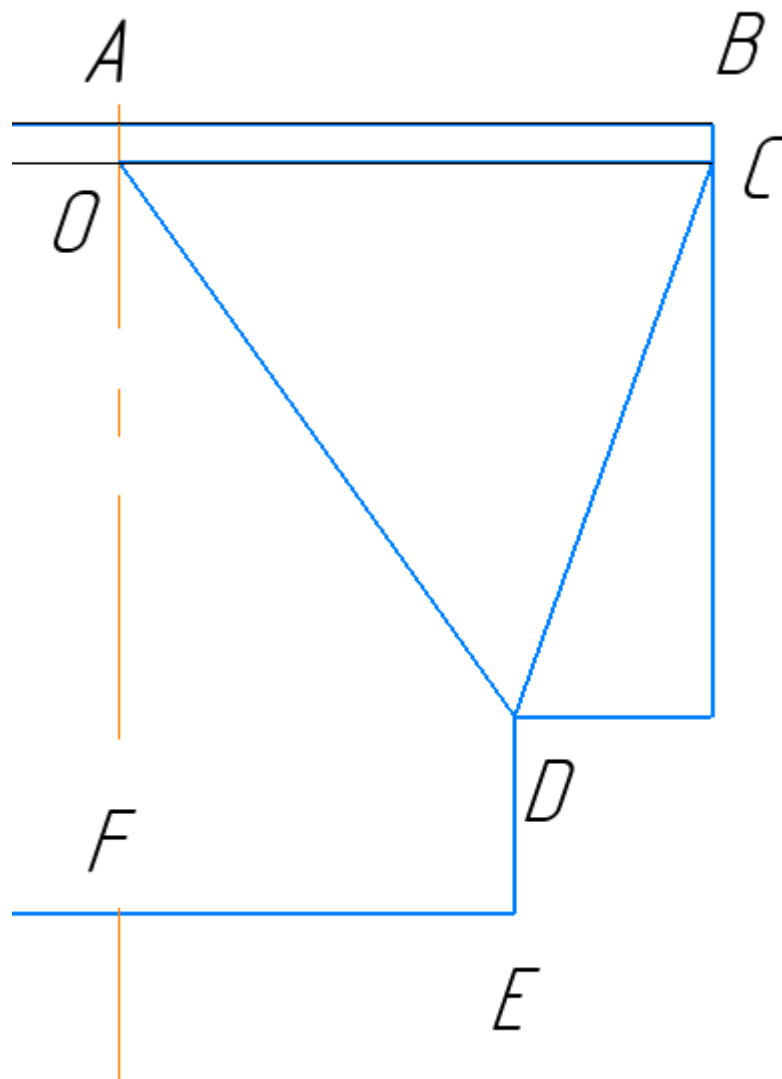


Рис 4.28 Позначення точок на розрахунковій схемі літерами

Тоді запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

де $N_{\text{пр}}$ – потужність пресу для виконання операції

$N_{\text{т}}$ – потужність, яка витрачається на подолання тертя між об'ємами, що зміщуються на контактуючих поверхнях заготовки та деформуючого інструмента

$N_{\text{з}}$ – потужність, яка витрачається на подолання сил зсуву між жорсткими об'ємами

Розпишемо рівняння потужності що необхідна для подолання сил тертя

$$N_T = N_T^{BC} + N_T^{DE}$$

Де N_T^{BC} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні

BC

N_T^{DE} – потужність, що необхідна для подолання тертя по поверхні

DE

Розпишемо рівняння потужності що необхідна на зсув між об'ємами

$$N_3 = N_3^{OC} + N_3^{CD} + N_3^{OD}$$

Де N_3^{OC} – потужність, що необхідна для подолання сил зсув по

поверхні OC

N_3^{CD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні

CD

N_3^{OD} - потужність, що необхідна для подолання сил зсув по поверхні

OD

$$N_T^{BC} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_1 * 2\pi R * H = 0,3 * 46,85 * 1 * 2 * 3,14 * 15 * 1 = 1,32 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_1 – швидкість першого об'єму

F_1 – площа поверхні BC

$$N_T^{DE} = \sigma_s * \mu * V_1 * F_3 * 2\pi R * H = 0,3 * 46,85 * 1,5 * 2 * 3,14 * 10 * 5 \\ = 6,62 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

μ – коефіцієнт тертя

V_3 – швидкість третього об'єму

F_3 – площа поверхні DE

$$N_3^{OC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{12} * \frac{\pi d^2}{4} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,357 * \frac{3,14 * 30^2}{4} = 6,83 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість першого відносно другого об'єму

F_{OC} – площа поверхні OC

$$N_3^{CD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_2 * F_{CD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1,06 * 3,14 * 14,62 * 25 = 32,95 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{12} – швидкість другого об'єму

F_{CD} – площа поверхні CD

$$N_3^{OD} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{23} * F_{OD} = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,62 * 3,14 * 10 * 17,2 = 9,1 \text{ кН}$$

Де σ_s – межа текучості металу, що деформується

V_{23} – швидкість третього відносно другого об'єму

F_{OD} – площа поверхні OD

$$N_{\text{пр}} = 56,62 \text{ кН}$$

4.2.6 Розрахункова схема 6

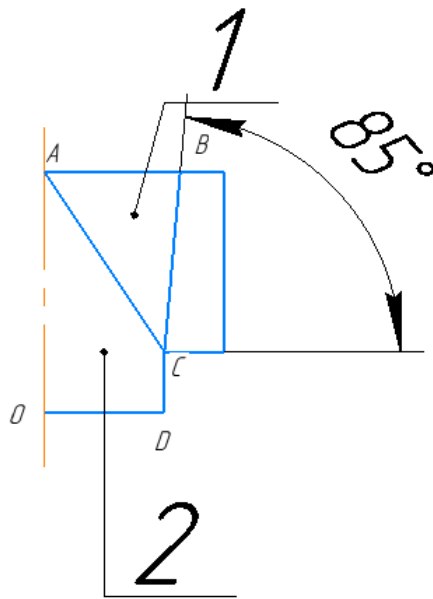


Рис 4.29 Розрахункова схема 6(кут 85)

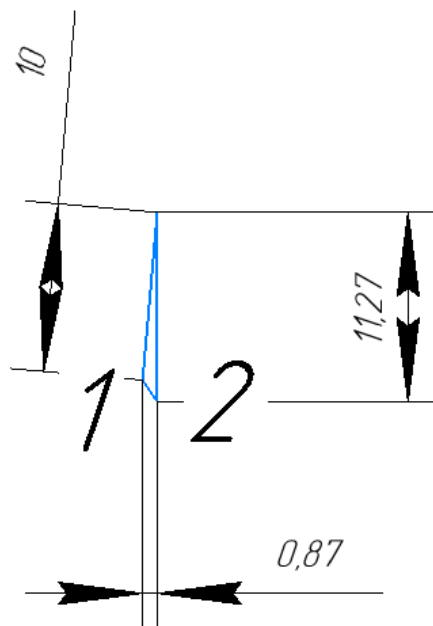


Рис 4.30 План швидкостей

Запишемо рівняння балансу потужностей

$$N_{\text{пр}} = N_{\text{т}} + N_{\text{з}}$$

$$N_{\text{т}} = N_{\text{т}}^{CD}$$

$$N_3 = N_3^{AC} + N_3^{BC}$$

$$N_3^{BC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_1 * \pi * l(R_1 + R_2) = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 1 * 3,14 * 15 * 21,3 = 27,17 \text{ кН}$$

$$N_3^{AC} = \frac{\sigma_s}{\sqrt{3}} * V_{21} * \pi * R * l = \frac{46,85}{\sqrt{3}} * 0,16 * 3,14 * 10 * 18,02 = 2,4 \text{ кН}$$

$$N_T^{CD} = \sigma_s * \mu * V_2 * F_3 * 2\pi R * H = 0,3 * 46,85 * 1,12 * 2 * 3,14 * 10 * 5 = 4,94 \text{ кН}$$

$$N_{пр} = 34,51 \text{ кН}$$

Виведемо графік залежності зусилля від кута ковзання

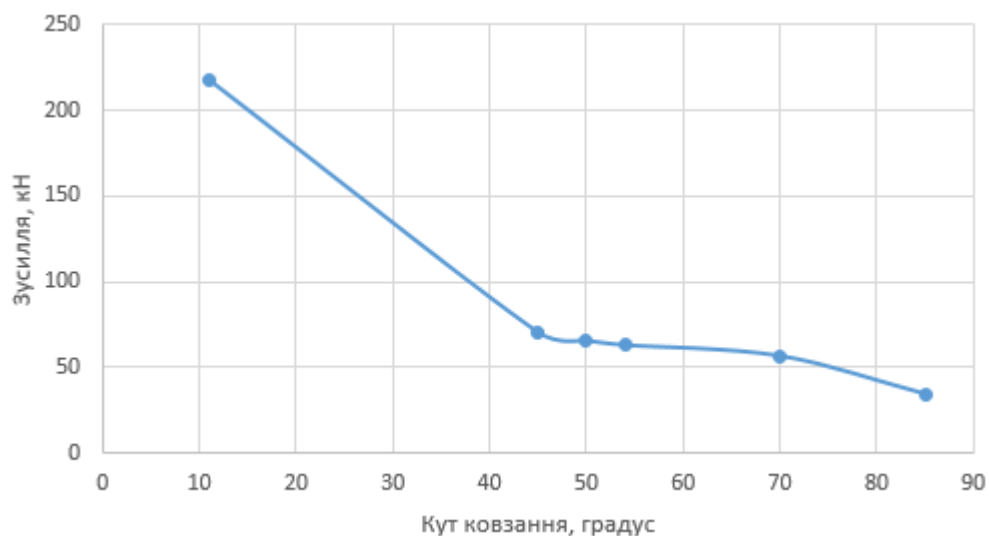


Рис 4.31 Графік залежності зусилля від кута ковзання

Таким чином прослідковується закономірність чим більше кут ковзання, тим менше зусилля. Висновки, які були зроблені у чисельних розрахунках підтверджуються ще і аналітично.

Зусилля деформування у моделюванні було 63 кН, зусилля обчислене аналітично з розрахунковою схемою 4 = 62,88 кН. Таким чином можна зробити висновок що застійна зона знаходиться під кутом приблизно 54°

4.3 Дослідження формоутворення тонкостінного елементу у випадку коли вектор сили направлений перпендикулярно до напрямку течії металу.

4.3.1 Розміщення кутового каналу варіант 1

Схема задачі у 2д буде зображена на рис. 4.32

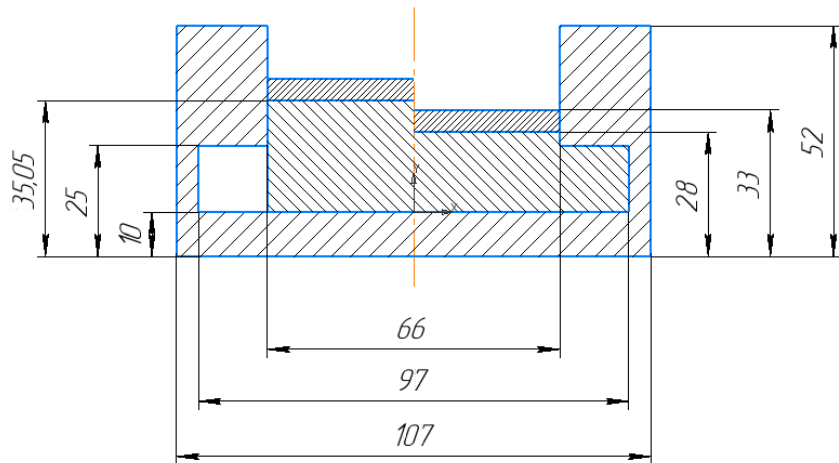


Рис. 4.32 Схема процесу пресування у кутовий канал
Ліворуч – до деформації, праворуч – після деформації

На рис 4.33 показні результати моделювання з режимом температура = 890 С, швидкість переміщення інструменту = 0.01 мм/с

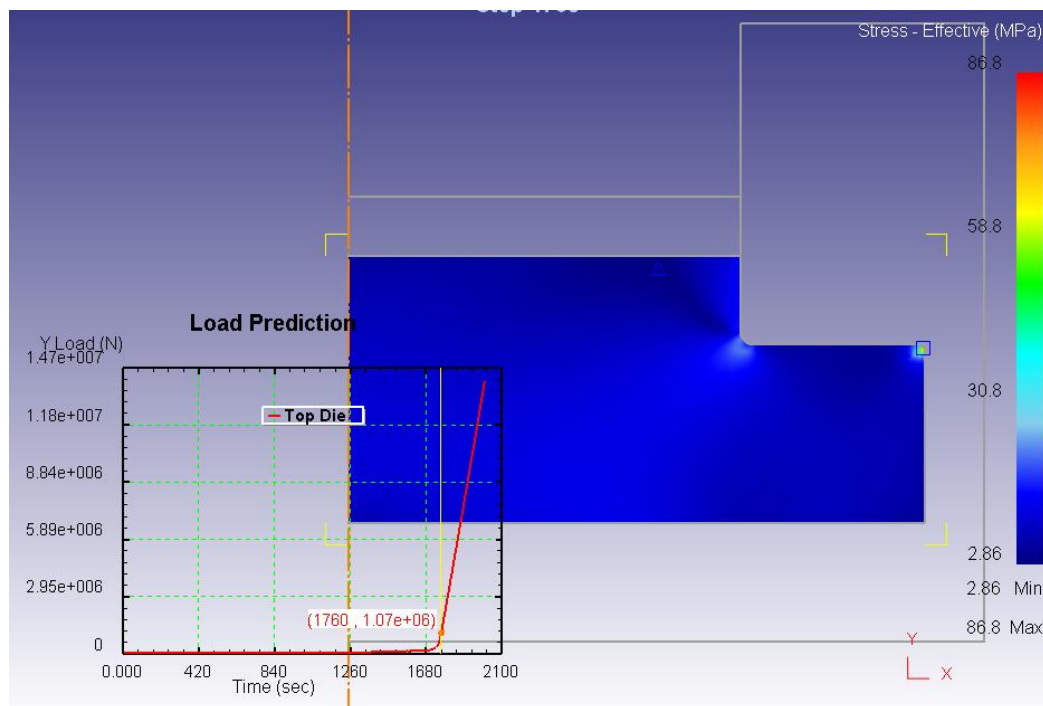


Рис 4.33 Графік залежності зусилля від часу процесу
З графіку можна виділити, що є відносно пряма лінія де зусилля зростає поступово, та область після 1680 секунди коли зусилля зростає більш інтенсивно. Цей різкий перехід графіка пояснюється тим що у точці переходу заготовка торкнулась бокової стінки каналу матриці

На рис 4.34 зображено поле швидкостей з 1 застійною зоною

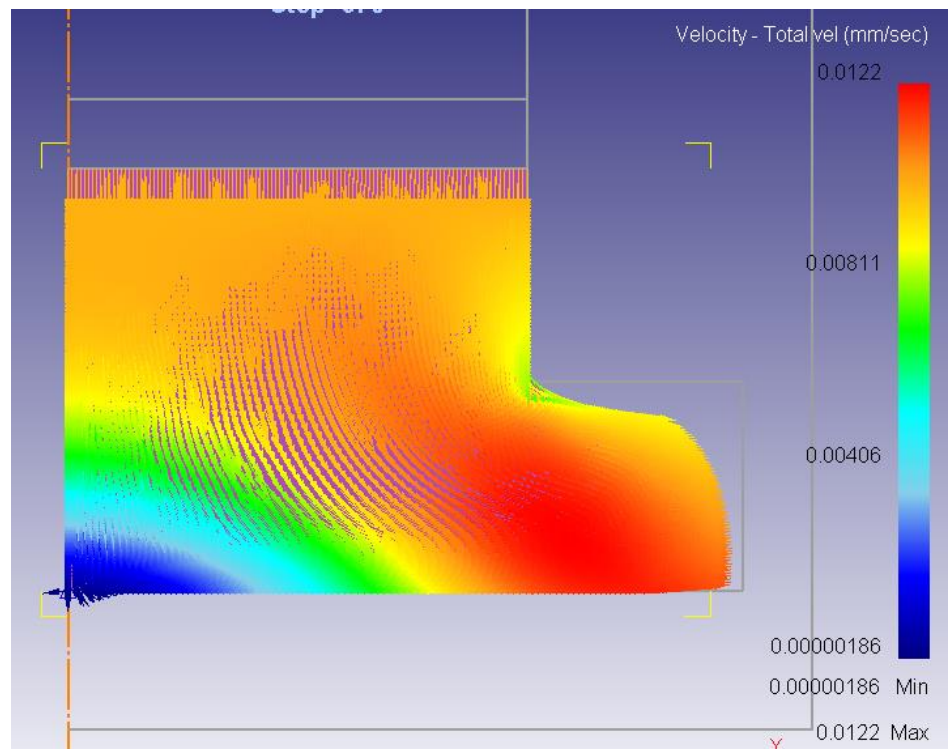


Рис 4.34 Поле швидкостей з 1 застійною зоною

Під час деформації, до моменту коли перо лопатки не торкнулось бокової стінки каналу, утворюється 1 застійна зона, позначена синім кольором

На рис 4.35 показано поле швидкостей заготовки після торкання заготовки бокової стінки каналу матриці

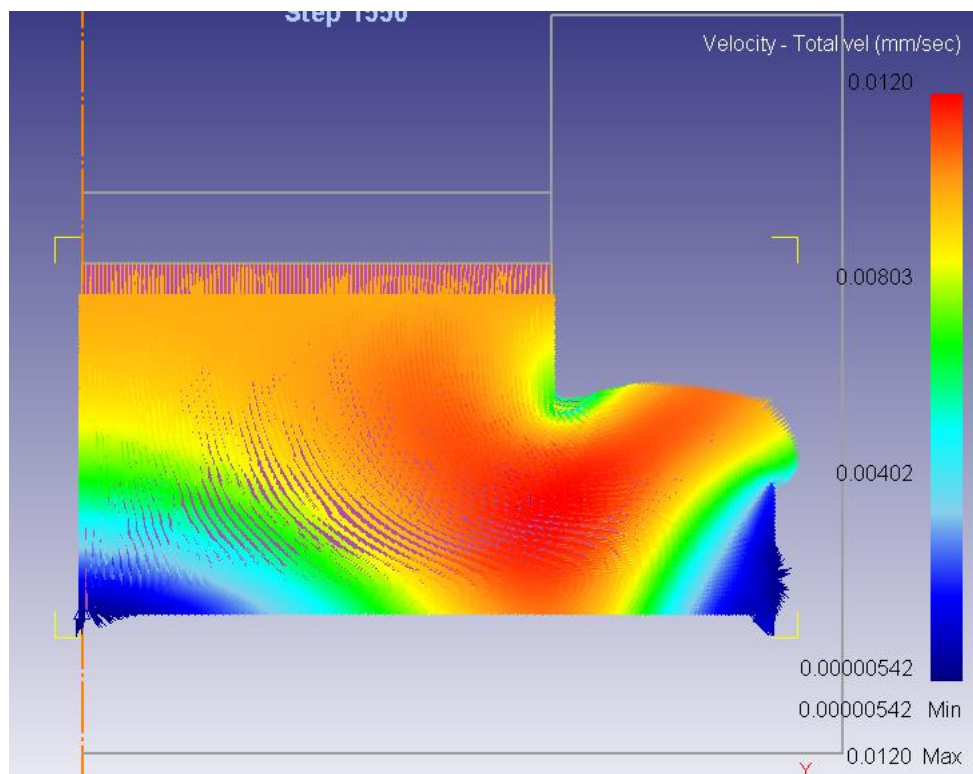


Рис 4.35 Поле швидкостей з 2 застійними зонами

Під час деформації, до моменту коли перо лопатки торкнулось бокової стінки каналу, утворюється 2 застійна зони, позначені синім кольором

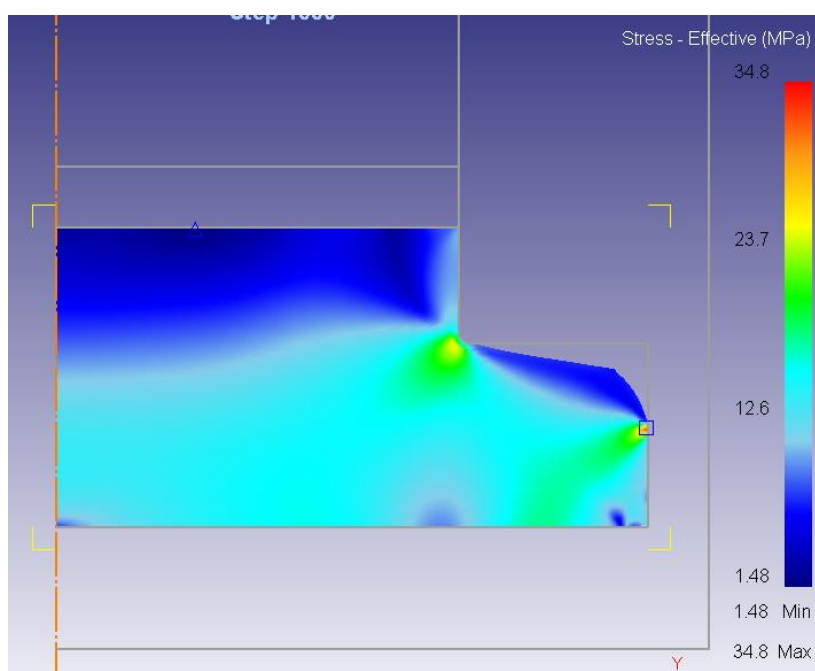


Рис 4.36 Розподіл напружень по заготовці

З рис 4.36 можемо побачити, що найбільші напруження знаходяться у зоні контакту з матрицею

Результати моделювання з режимом температура = 950 С, швидкість переміщення інструменту = 1 мм/с

На рис 4.37 зображено поле швидкостей з 1 застійною зоною

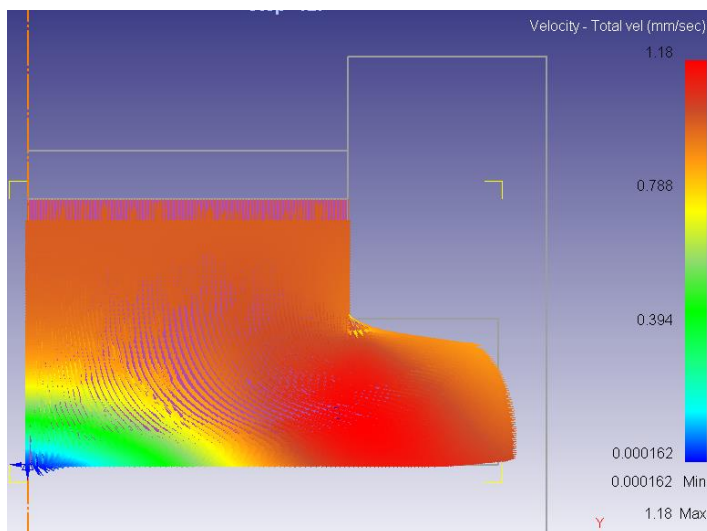


Рис 4.37 Поле швидкостей з 1 застійною зоною

Поле швидкостей, на якому показана течія матеріалу

На 4.37 рисунку видно, яка маленька застійна зона відносно першого режиму деформації, що і суттєво впливає на зусилля процесу

На рис. 4.38 показаний графік зусилля в залежності від часу процесу

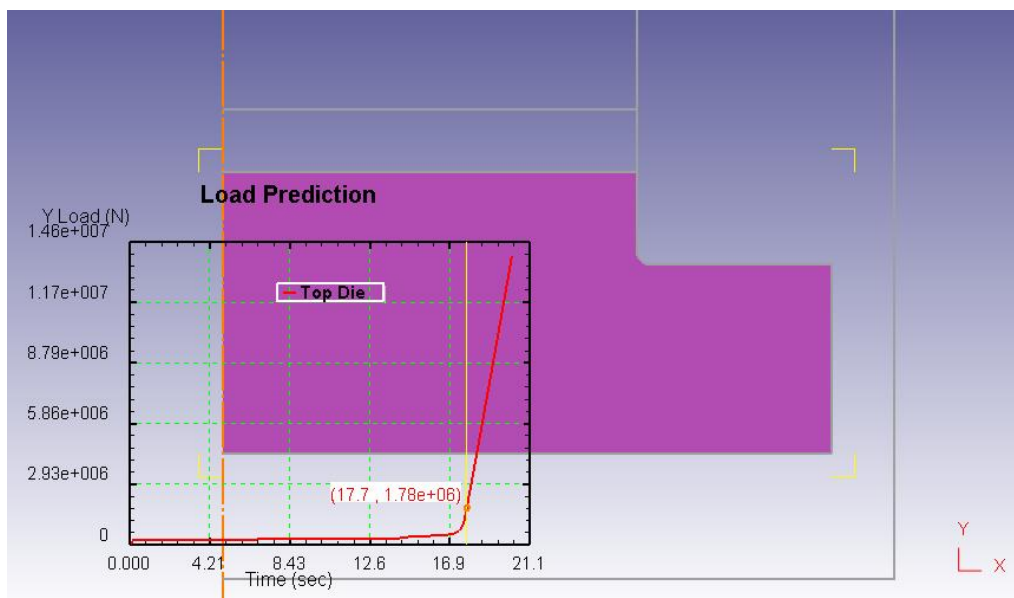


Рис 4.38 Графік залежності зусилля від часу процесу

На рис 4.39 зображений розподіл напружень по заготовці

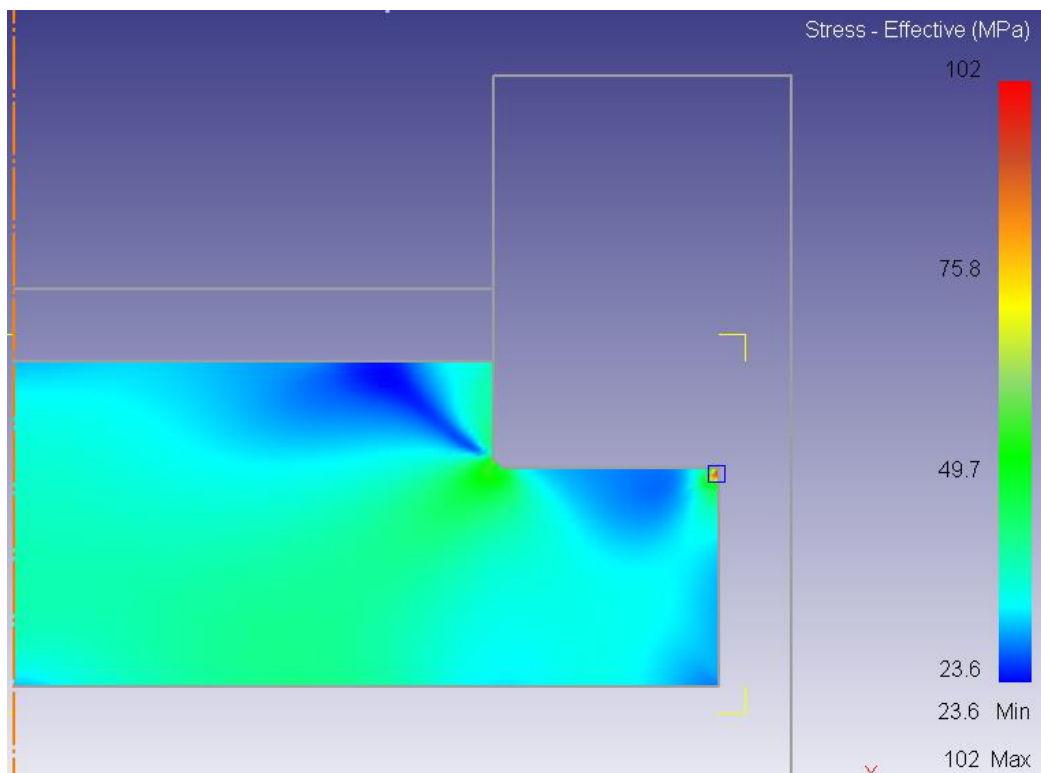


Рис 4.39 Розподіл напружень по заготовці

Як бачимо на рисунку найбільші напруження утворюються у зонах контакту з матрицею

Результати моделювання з режимом температура = 950 C, швидкість переміщення інструменту = 0.01 мм/с

На рис 4.40 зображено графік залежності зусилля

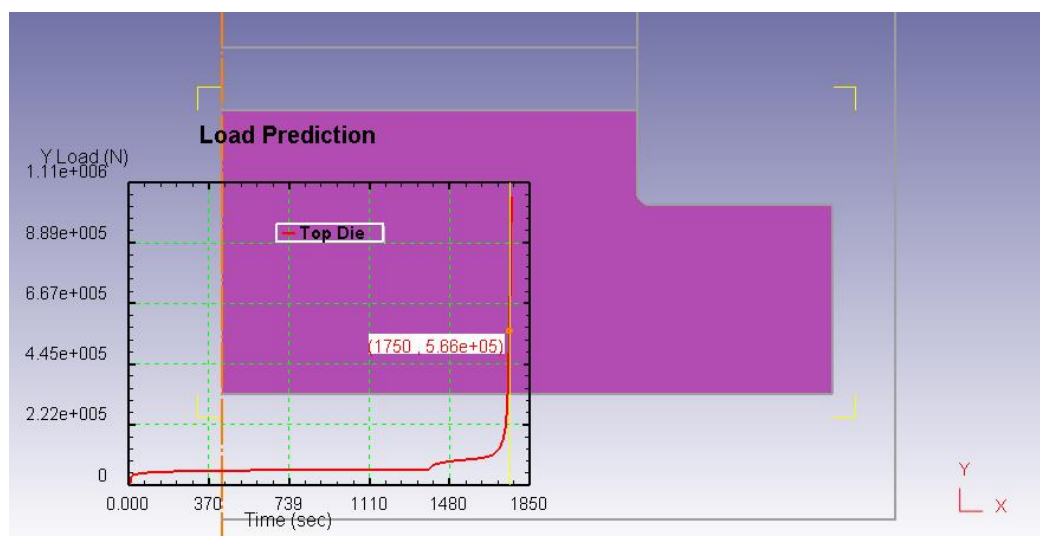


Рис 4.40 Графік залежності зусилля від часу процесу

На рис 4.41 показаний розподіл швидкостей по заготовці

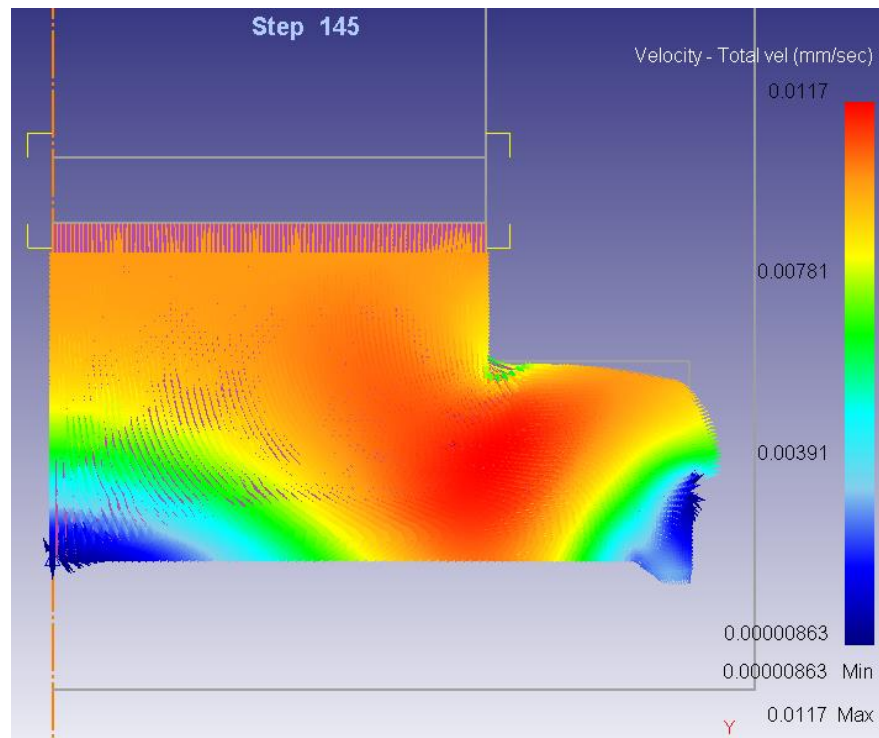


Рис 4.41 Поле швидкостей з 1 застійною зоною

На рис 4.42 показаний розподіл напружень по поверхні заготовки

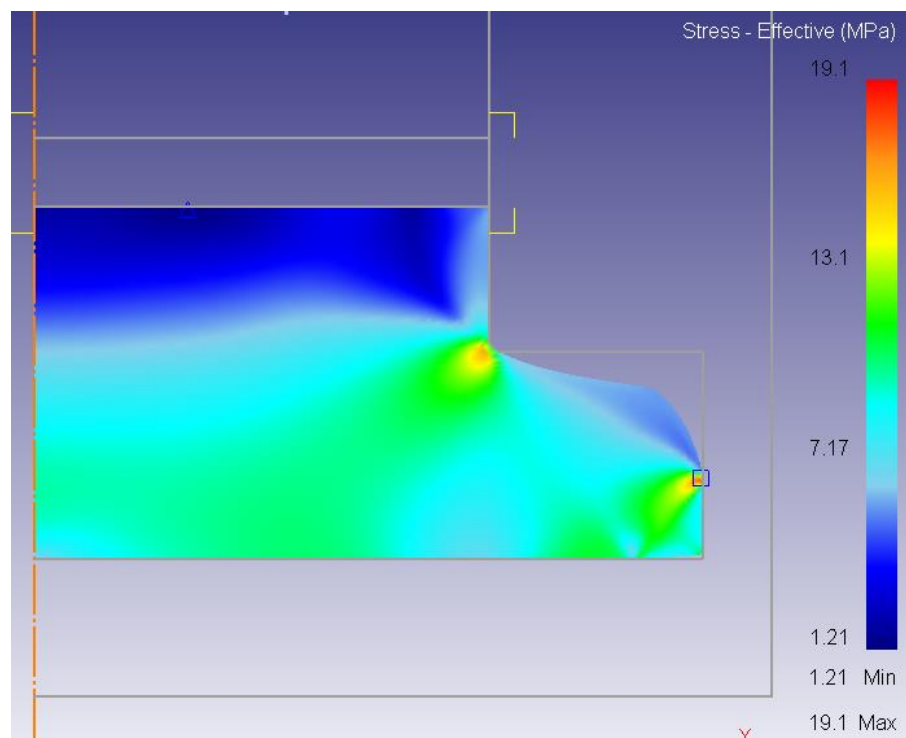


Рис 4.42 Розподіл напружень по поверхні заготовки

Аналізуючи ці режими деформації можна зробити висновки,

- 1) зі зменшенням температури збільшується напруження всередині заготовки, що і впливає на зусилля процесу
- 2) зі зменшення швидкості переміщення інструменту збільшується розмір застійної зони, що і є причиною зменшення зусилля.

4.3.2 Розміщення кутового каналу варіант 2

На рис 4.43 показана схема процесу деформування

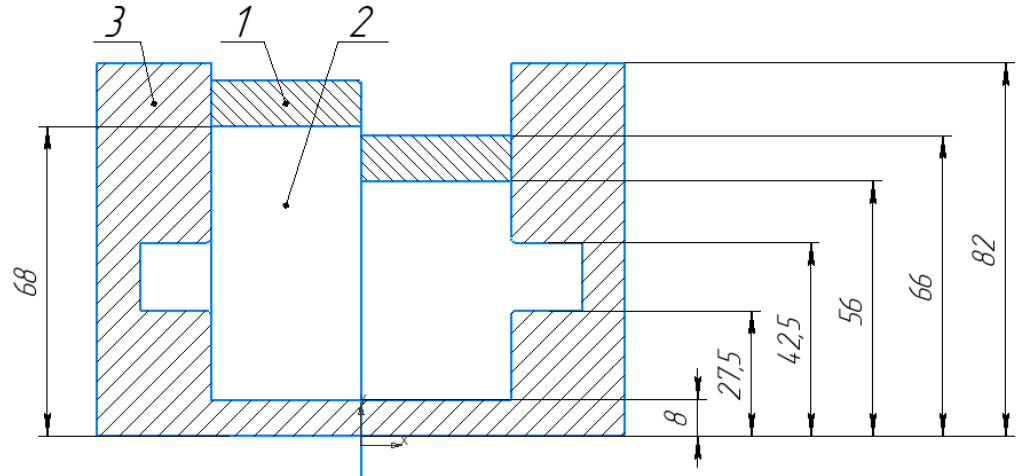


Рис 4.43 Схема процесу у 2Д, зліва до деформації, справа після деформації (позначення 1 – пуансон, 2 – Заготовка, 3 - матриця)

На рис 4.44 показаний графік залежності зусилля в залежності часу процесу

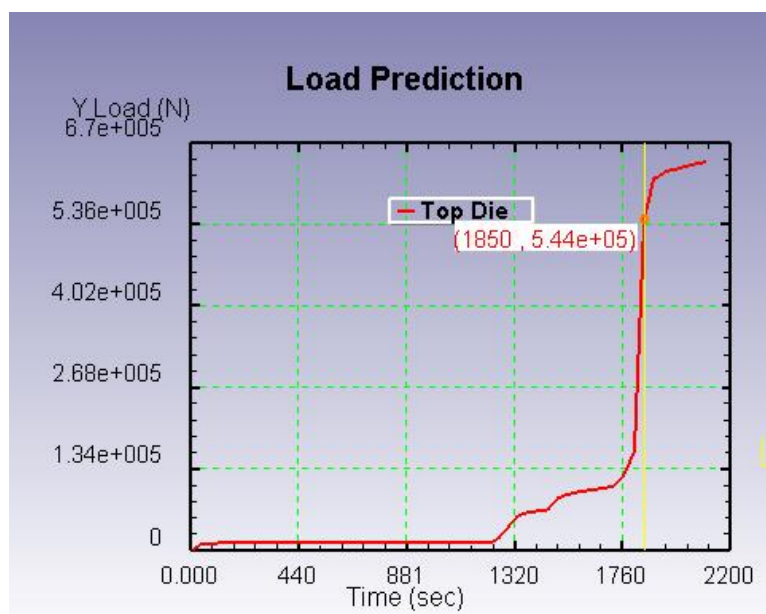


Рис 4.44 Графік залежності зусилля від часу процесу

На рис 4.45 показаний розподіл швидкостей по поверхні заготовки

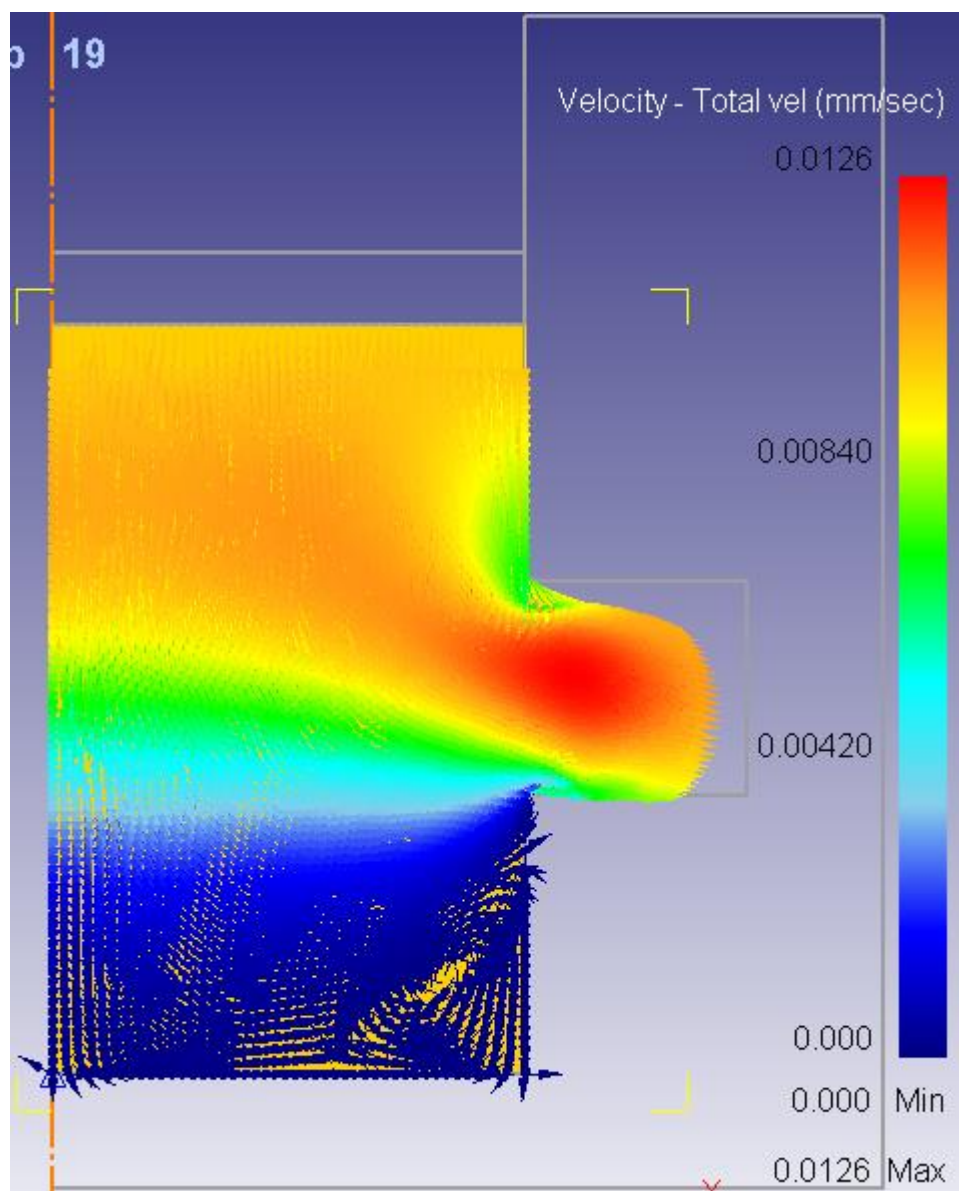


Рис 4.45 Розподіл швидкостей по поверхні заготовки

РОЗДІЛ 5

ВИСНОВКИ ПО РОБОТІ

- 1) Проведений літературний огляд щодо джерел ізотермічного формоутворення моноколіс, існуючих конструкцій моноколіс, сучасних технологій щодо виготовлення лопаток ГТД
- 2) Проведено чисельне моделювання процесу ізотермічного формоутворення моноколеса з радіальним розташуванням лопаток
- 3) Розроблений метод спрощеного розрахунку багатоканальних вісесиметричних деталей
- 4) Проведено розрахунок представницького елемента в 2д для лопатки аксіального типу та лопатки радіального розташування, та виявлені закономірності течії в залежності від температури та швидкості переміщення пуансона.
- 5) Встановлено залежність енергосилових параметрів від граничних умов процесу(температура, швидкість переміщення інструменту), та виявлено як течія матеріалу впливає на зусилля

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Богуслаев В.А. Технологическое обеспечение и прогнозирование несущей способности деталей ГТД / В.А. Богуслаев, В.К. Яценко, В.Ф. Притченко. – К.: Манускрипт, 1993. – 332 с.
2. Богуслаев В.А. Технология производства авиационных двигателей / В.А. Богуслаев, А.Я. Качан, В.Ф. Мозговой. – Запорожье, изд. ОАО «Мотор Сич», 2000. – 945 с.
3. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Лопатки компрессора и вентилятора. Часть 1 / В.А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко и др. – Запорожье: Мотор Сич, 2003. – 396 с.
4. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах / В. М. Воробьев. 2012. – 289 с.
5. Анищенко, А. С. Анализ альтернативных технологий штамповки компрессорных лопаток для судовых двигателей / А. С. Анищенко // Вісник Приазовського державного технічного університету : зб. наукових праць / ПДТУ. – Маріуполь, 2015. – Вип. 30, Т. 1. – С. 141–148. – (Серія : Технічні науки).
6. Проблемы технологии изготовления лопаток компрессоров ГТД : Материалы совещания. – М.: НИАТ, 1982. – 114 с.
7. Momber A., Kovacevic R. Principles of Abrasive Water Jet Machining. Berlin: Springer Verlag, 1998.
8. Богуслаев А.В., Качан А.Я., Карась В.П. Высокоскоростное финишное фрезерование лопаток моноколес // Вестник двигателестроения, 2002. – №1. – С. 110-111.
9. Жеманюк П.Д., Мозговой В.Ф., Качан А.Я., Карась В.П. Формирование сложнопрофильных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием // Газотурбинные технологии. – 2003. – №5(26). – С. 18-21.

10. Жеманюк П.Д., Богуслаев А.В., Мозговой С.В., Карась Г.В., Качан А.Я. Формообразование сложнопрофильных поверхностей осевого моноколеса с широкохордными лопатками высокоскоростным фрезерованием // Вестник двигателестроения. – 2004. – №3. – С. 16-19.
11. Жеманюк П.Д., Богуслаев А.В., Мозговой С.В., Карась Г.В., Качан А.Я. Обработка проточных поверхностей моноколес высокоскоростным фрезерованием // Авиационно-космическая техника и технология. – 2004. – №7 (15). – С. 215-219.
12. А. Я. Качан, С. А. Петров, В. А. Панасенко, С. В. Мозговой, Г. В. Карась Технология обработки моноколёс высокоскоростным фрезерованием // Вісник двигунобудування. 2006. №1.
13. Теорія та практика обробки металів тиском / Під ред. Богуслаєва В. О., Бобиря М. І., Тітова В. А., Качана О. Я. – Запоріжжя : АТ «Мотор Січ», 2016. – 522 с.
14. Воробьев В. М. Основы теории и реализация технологических решений процессов выдавливания металлов в многоканальных штампах / В. М. Воробьев. , 2012. – 289 с
15. Титов А. В. Некоторые особенности изотермической штамповки точных деталей с тонкостенными элементами / А. В. Титов, А. Ю. Басов, А. Д. Лавриненков, П. С. Вишневский, О. Н. Лысенко, В. А. Титов // Обработка материалов давлением. - 2018. - № 1. - С. 105-115.
16. Pallavi Push. Classification and applications of titanium and its alloys. Materials Today, Volume 54, part 2, 2022, pages 537-542.
17. James C. Williams. Opportunities and Issues in the Application of Titanium Alloys for Aerospace Components. Metals, 2020
18. Електроний ресурс Attributes, Characteristics, and Applications of Titanium and Its Alloys
<https://www.tms.org/pubs/journals/JOM/1005/boyer-1005.html>
19. R. R. Boyer & R. D. Briggs. The use of β titanium alloys in the aerospace industry. Journal of Materials Engineering and Performance,

Volume 14, pages 681–685, (2005)

20. Chao Cai. In-situ TiB/Ti-6Al-4V composites with a tailored architecture produced by hot isostatic pressing: Microstructure evolution, enhanced tensile properties and strengthening mechanisms, *Composites Part B: Engineering*, Volume 164, 1 May 2019, Pages 546-558

21. Rong Li. Unified modeling of the microstructure and densification of TC4 powder titanium alloy during hot deformation, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, May–June 2023, Pages 4904-4918

22. Yingchun Fang. Additive manufacturing of titanium alloys with enhanced strength and uniform ductility via multi-element alloying, *Journal of Materials Research and Technology*, Volume 24, May–June 2023, Pages 6854-6860

23. Особенности технической подготовки процесса изотермической штамповки моноколес Титов В.А. д.т.н., проф.; Мозговой В. Ф., к.т.н., Басов А. Ю.; Титов А.В., к.т.н., доц.; Гараненко Т.Р.; Лысенко О.Н.

24. Особливості процесів формоутворення заготовок лопаток з титанового сплаву системи Ti – TiBn / В. А. Тітов, О. Я. Качан, О. Г. Моляр, Ю. С. Кресанов, Н. К. Злочевська // Вісник НТУУ "КПІ".
Машинобудування : збірник наукових праць. – 2011. – № 61, т. 1. – С. 95–100.

25. Extension value, with hot rolled aluminum alloy specimens, round section in smooth rollers. Monography // Shvets L. / Scientific foundations of modern engineering. ISBN 978-1-64871-656-0, Boston (USA), 2020.

26. Characteristics and thermomechanical modes of aluminum alloys hot deformation /M. Pulupec, L. Shvets // ISSPT 2019: Current Problems of Transport: Proceedings of the 1st International Scientific Conference, Ternopil Ivan Pulyk National Technical University and Scientific Publishing House «SciView». ISSN: 978-966-305-101-7, Ternopil, 2019. pp 195-204.

27. Benzing J., Hrabe N., Quinn T., White R., Rentz R., Ahlfors M. Hot Isostatic Pressing (HIP) to Achieve Isotropic Microstructure and Retain as-Built Strength in an Additive Manufacturing Titanium Alloy (Ti-6Al-4V)

Mater. Lett. 2019;257:126690.

28. R.C. Picu, A. Majorell, Mechanical behaviour of Ti–6Al–4V at high and moderate temperatures: Part II. Constitutive modeling, Materials Science and Engineering A A326 (2002) 306 – 316.

29. Bruschi, S., Poggio, S., Quadrini, F., & Tata, M. E. (2004). Workability of Ti–6Al–4V alloy at high temperatures and strain rates. Materials Letters, 58(27-28), 3622–3629.

30. SHI, Z., GUO, H., LIU, R., WANG, X., & YAO, Z. (2015). Microstructure and mechanical properties of TC21 titanium alloy by near-isothermal forging. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 25(1), 72–79.

31. XIA, Y., JIANG, W., CHENG, Q., JIANG, L., & JIN, L. (2020). Hot deformation behavior of Ti—6Al—4V—0.1Ru alloy during isothermal compression. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 30(1), 134–146.

32. Perumal, B., Rist, M.A., Gungor, S. et al. The Effect of Hot Deformation Parameters on Microstructure Evolution of the α -Phase in Ti-6Al-4V. Metall Mater Trans A 47, 4128–4136 (2016)

33. Zhang, Jishi et al. “Microstructure characterization of hot isostatic pressed Ti-6Al-4V alloy under uniaxial compression and post heat treatment.” Journal of Materials Research and Technology (2021)

34. V. Seetharaman, L. Boothe, C.M. Lombard, Compressive deformation behaviour of a Ti6Al4V alloy at high temperatures and strain

rates, in: Y.-W. Kim, Rodney R. Boyer (Eds.), Microstructures/Property Relationships in Titanium Aluminides and Alloys, The Minerals, Metals and Materials Society, 1991, pp. 605 – 620.

35. S.L. Semiatin, V. Seetharaman, I. Weiss, Flow behavior and globularization kinetics during hot working of Ti–6Al–4V with a colony alpha microstructure, Materials Science and Engineering A A263 (1999) 257 – 271.

36. T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier, Y.V.R.K. Prasad,

- Hot working of commercial Ti–6Al–4V with an equiaxed alpha microstructure: materials modeling considerations, *Materials Science and Engineering A* A284 (2000) 184 – 194
37. T. Seshacharyulu, S.C. Medeiros, W.G. Frazier, Y.V.R.K. Prasad, Microstructural mechanisms during hot working of commercial grade Ti–6Al–4V with lamellar starting structure, *Materials Science and Engineering A* A325 (2002) 112 – 125.
 38. Z.M. Hu, T.A. Dean, Aspects of forging of titanium alloys and the production of blade forms, *Journal of Materials Processing Technology* 111 (2001) 10 – 19.
 39. H.L. Gegel, J.C. Malas, S.M. Doraivelu, V.A. Shende, *Metal Handbook*, 9th edition, vol. 14, ASM International, Metals Park, OH, 1988, p. 417.
 40. H. Oikawa, Y. Ishikawa, M. Seki, in: F.H. Froes, I. Caplan (Eds.), *Titanium Sci. Technol*, 1993, p. 1779.
 41. M.N. Vijayshankar, S. Ankem, in: F.H. Froes, I. Caplan (Eds.), *Titanium Sci. Technol*, 1993, p. 1733.
 42. Weiss, I., Froes, F., Eylon, D., and Welsch, G., Modification of alpha morphology in Ti-6Al4V by thermomechanical processing. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 1986. 17(11): p. 1935-1947.
 43. Malcor, J.G., Montheillet, F., Champin, B. (1985) Mechanical and Microstructural Behavior of Ti-6Al-4V in the Hot Working Range. In: G. Luetjering (Ed.), *Titanium: science and technology*. Oberursel, Germany, 1495–1502.
 44. Semiatin, S., et al., Microstructure evolution during alpha-beta heat treatment of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2003. 34(10): p. 2377-2386.
 45. Semiatin, S.L., Montheillet, F., Shen, G., and Jonas, J.J, Self-Consistent Modelling of the Flow Behavior of Wrought Alpha/Beta Titanium Alloys under Isothermal and Nonisothermal HotWorking Conditions. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002. 33A: p. 2719-2727.

46. Shell, E.B., and Semiatin, S.L., Effect of Initial Microstructure and Plastic Flow and Dynamic Globularisation during Hot Working of Ti-6Al-4V. *Metallurgical and Materials Transactions*, 1999. 30A: p. 3219-3229.
47. Miller, R.M., Bieler, T.R., and Semiatin, S.L., Flow softening during hot working of Ti-6Al-4V with a lamellar colony Microstructure. *Scripta Materialia*, 1999. 40, No. 12: p. 1387–1393.
48. BANERJEE D, WILLIAMS J C. Perspectives on titanium science and technology [J]. *Acta Mater*, 2013, 61: 844–879.
49. LUTJERING G, WILLIAMS J C. *Titanium* [M]. 2nd ed. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2007.
50. LEYENS C, PETERS M. *Titanium and titanium alloys* [M]. Weinheim: Wiley-VCH, 2003.
51. ZHAO Yan-lei, LI Bo-long, ZHU Zhi-shou, NIE Zuo-ren. The high temperature deformation behavior and microstructure of TC21 titanium alloy [J]. *Mater Sci Eng A*, 2010, 527: 5360–5367.
52. ZHU Y C, ZENG W D, LIU J L, ZHAO Y Q, ZHOU Y G, YU H Q. Effect of processing parameters on the hot deformation behavior of as-cast TC21 titanium alloy [J]. *Mater Des*, 2012, 33: 264–272
53. SHI Zhi-feng, GUO Hong-zhen, HAN Jin-yang, YAO Ze-kun. Microstructure and mechanical properties of TC21 titanium alloy after heat treatment [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2013, 23(10): 2882–2889.
54. QU Heng-lei, ZHOU Yi-gang, ZHOU Lian, ZHAO Yong-qing, ZENG Wei-dong, FENG Liang. Relationship among forging technology, structure and properties of TC21 alloy bars [J]. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2005, 15(5): 1120–1124.
55. SHI K, SHAN D B, XU W C, LU Y. Near net shape forming process of a titanium alloy impeller [J]. *J Mater Process Technol*, 2007, 187–188: 582–585.

56. GUO H Z, YAO Z K, ZHAO Z L, GUO Y G, TANG J, LI Y C. The application of isothermal neat net-shape forming technology on titanium complicated load-bearing structures [C]//Proceedings of the 12th World Conference on Titanium, Beijing: Science Press, 2011: 1744–1747.
57. HE Wei-wei, TANG Hui-ping, LIU Hai-yan, JIA Wen-peng, LIU Yong, YANG Xin. Microstructure and tensile properties of containerless near-isothermally forged TiAl alloys [J]. Transactions of Nonferrous Metals Society of China, 2011, 21(12): 2605–2609.
58. WEISS I, SEMIATIN S L. Thermomechanical processing of beta titanium alloys—An overview [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 243: 46–65.
59. SAUER C, LUTJERING G. Thermo-mechanical processing of high strength β -titanium alloys and effects on microstructure and properties [J]. J Mater Process Technol, 2001, 117: 311–317.
60. LÜTJERING G. Influence of processing on microstructure and mechanical properties of (α + β) titanium alloys [J]. Mater Sci Eng A, 1998, 243: 32–45.
61. LEE E. Microstructure evolution and microstructure/mechanical properties relationships in α + β titanium alloys [D]. Columbus: The Ohio State University, 2004.
62. SRINIVASU G, NATRAJ Y, BHATTACHARJEE A, NANDY T K, NAGESWARA Rao G V S. Tensile and fracture toughness of high strength β Titanium alloy, Ti–10V–2Fe–3Al, as a function of rolling and solution treatment temperatures [J]. Mater Des, 2013, 47: 323–330.
63. FURUHARA T, OGAWA T, MAKI T. Atomic structure of interphase boundary of an α precipitate plate in a β Ti–Cr alloy [J]. Philos Mag Lett, 1995, 72: 175–183.
64. BHATTACHARYYA D, VISWANATHAN G B,

DENKENBERGER

R, FURRER D, FRASER H L. The role of crystallographic and geometrical relationships between α and β phases in an α/β titanium alloy [J]. Acta Mater, 2003, 51: 4679–4691.

65. BHATTACHARYYA D, VISWANATHAN G B, FRASER H L. Crystallographic and morphological relationships between β phase and the Widmanstätten and allotriomorphic α phase at special β grain boundaries in an α/β titanium alloy [J]. Acta Mater, 2007, 55: 6765–6778.

66. LI B Q, WAWNER F E. Dislocation interaction with semicoherent precipitates (Ω phase) in deformed Al–Cu–Mg–Ag alloy [J]. Acta Mater, 1998, 46: 5483–5490.