

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК _____

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри

_____ О. А. Охріменко _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
«_____» _____ 2023 р.

МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: Підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в
одиничному виробництві

Студент групи МТ-21мп Білицький Родіон Вікторович _____
(шифр групи) (прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Науковий керівник: д. т. н., професор, Воронцов Борис Сергійович _____
(вчені ступінь та звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

Рецензент: к.т.н., доцент, Красновид Дмитро Олександрович _____
(вчені ступінь та звання, прізвище, ім'я, по батькові) (підпис)

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

Студент _____
(підпис)

Київ – 2024 рік

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені Ігоря Сікорського»

Навчально-науковий механіко-машинобудівний інститут

Кафедра технології машинобудування

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131 «Прикладна механіка»

Освітньо-професійна програма «Технології машинобудування»

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Завідувач кафедри

_____ О. А. Охріменко _____
(підпис) (ініціали, прізвище)
« _____ » _____ 2023 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію

студенту Білицькому Родіону Вікторовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації «Підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в одиничному виробництві»

науковий керівник: д. т. н., професор, Воронцов Борис Сергійович

(вчені ступінь та звання, прізвище, ім'я, по батькові)

затверджені наказом по університету від 3 листопада 2023 р. № 5127-с

2. Термін подання студентом дисертації 28 грудня 2023 р.
3. Об'єкт дослідження одиничне виробництво деталей складної форми
4. Вихідні дані інтернет ресурси, наукові статті, наукові дослідження та фахова література

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) Опрацювати наявну літературу із заданої теми.
- 2) Проаналізувати взаємозамінність технологічних процесів в одиничному виробництві.
- 3) Оптимізувати деталь забезпечуючи необхідну міцність та жорсткість.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу:

30 ілюстрацій, до 10 слайдів

7. Орієнтовний перелік публікацій:

1 наукова стаття

8. Дата видачі завдання «15» січня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1.	Вибір та затвердження теми роботи	01.02.2023	Виконано
2.	Огляд та аналіз літератури за обраною темою	01.03.2023	Виконано
3.	Написання першого розділу	01.04.2023	Виконано
4.	Написання наукової статті	01.09.2023	Виконано
5.	Аналіз взаємозамінності технологічних процесів	01.11.2023	Виконано
6.	Розроблення стартап-проекту	01.12.2023	Виконано

Студент

Родіон БІЛИЦЬКИЙ

Науковий керівник

Борис ВОРОНЦОВ

Реферат

Об'єм та структура: Магістерська дисертація складається із 4 розділів, висновків, списку використаної літератури та додатків. Вона включає в себе 88 аркушів, 26 таблиць, 27 рисунків, та 9 літературних джерел.

Актуальність теми: Зростання попиту на індивідуалізовану та унікальні вироби спричиняють необхідність оптимізації одиничного виробництва. В умовах високої конкуренції, промисловість все більше і більше потребує збільшення ефективності виробництва. Також розвиток цифрових технологій та адитивних технологій є рушіями швидких змін. Отже, враховуючи сучасні потреби промисловості, обрана тема є актуальною та перспективною.

Завдання та мета: Дослідити методи підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в одиничному виробництві.

Об'єкт дослідження: Одиничне виробництво.

Предмет дослідження: Розробка та оптимізація деталі для одиничного виробництва.

Методи дослідження: Порівняння ефективності технологічних процесів в одиничному виробництві.

Ключові слова: адитивне виробництво, традиційні методи виробництва, оптимізація, топологія.

Список друкованих праць за темою дисертації та доповіді на конференції:

1. Білицький Р., Воронцов Б. Використання адитивних технологій у виробництві та обслуговуванні літаків / Родіон Білицький, Борис Воронцов // Вітчизняна наука на зламі епох: Проблеми та перспективи розвитку: Зб. наук. праць. – Переяслав, 2023. – Вип. 92. – С. 200 - 203.
2. Участь у міжнародній науково-технічній конференції «Нові та нетрадиційні технології в ресурсо- та енергозбереженні» 6-7 грудня 2023 р. – Одеса, 2023 р.

Abstract

Scope and structure: The master's dissertation consists of 4 chapters, conclusions, a list of used literature and addendums. It includes 88 pages, 26 tables, 27 figures, and 9 literary sources.

Relevance of the topic: The growing interest in individualized and unique products makes it necessary to optimize individual production. In a highly competitive environment, the industry is more and more required to increase production efficiency. The development of digital technologies and additive technologies is also driving rapid change. Therefore, considering the current needs of industry, the chosen topic is relevant and perspective.

Task and goal: Research methods to improve the efficiency of manufacturing complex-shaped parts in one-off production.

Research object: One-off production (job shop production).

Research subject: Development and optimization of a part for one-off production.

Research methods: Comparison of the efficiency of manufacturing processes in one-off production.

Keywords: Additive manufacturing, conventional manufacturing methods, optimization, topology.

ЗМІСТ

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ	8
ВСТУП	9
1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА НАЯВНИХ НАПРАЦЮВАНЬ	10
1.1 Методи класифікації типу виробництва.....	11
1.1.1 Матриця вибору технологічного процесу	13
1.1.2 Вартість виробничих процесів	15
1.1.3 Послідовність вибору технологічного процесу.....	16
1.2 Використання одиничного виробництва в промисловості	18
1.3 Адитивне виробництво як метод одиничного виробництва.	18
1.3.1 Проектування для адитивного виробництва.....	19
1.3.2 Принципи адитивного виробництва.....	22
1.3.3 Приклади впровадження адитивних технологій у виробництво	26
1.4 Висновки.....	27
2 ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ОДИНИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ.....	28
2.1 Постановка задачі	29
2.2 Аналіз відмінностей між технологічними процесами.....	30
2.3 Порівняння механічних властивостей матеріалів	30
2.4 Аналіз виробничого кронштейна	34
2.5 Аналіз ремонтного кронштейна	40
2.6 Висновки.....	46
3 ОПТИМІЗАЦІЯ КРОНШТЕЙНА	47
3.1 Перша ітерація оптимізації.....	47
3.2 Друга ітерація оптимізації	52
3.3 Статичний аналіз оптимізованого кронштейна.....	53
3.4 Порівняння оригінального та оптимізованого кронштейна.....	57
3.5 Висновки до розділу.....	59
4 СТАРТАП ПРОЕКТ	60
4.1 Опис ідеї проекту.....	61
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту	64
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	67

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту	74
4.5 Маркетингова програма стартап-проекту	77
4.6 Висновки до розділу	79
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ	80
ДОДАТОК А (Акт використання результатів магістерської дисертації)	82
ДОДАТОК Б (Копія опублікованої статті)	83
ДОДАТОК В (Механічні властивості матеріалів використані в роботі)	87

УМОВНІ ПОЗНАЧЕННЯ

e	- відносне видовження
E	- модуль пружності
E_c	- модуль пружності на стиск
F_{bru}	- максимальні допустимі напруження на зім'яття
F_{bry}	- максимальні допустимі напруження текучості на зім'яття
f_c	- діючі напруження на стиск
F_{cy}	- максимальні допустимі напруження текучості на стиск
F_{su}	- максимальні допустимі напруження на зсув
F_{sy}	- максимальні допустимі напруження текучості на зсув
f_t	- діючі напруження на розтяг
F_{tu}	- максимальні допустимі напруження на розтяг
F_{ty}	- максимальні допустимі напруження текучості на розтяг
$in, inch$	- дюйм (2,54 см)
ksi	- кілофунт на квадратний дюйм
L	- поздовжній напрям волокон в заготовці
lb, lbs, lbf	- фунт (0,45 кг)
LT	- поперечний напрям волокон в заготовці
$M.S.$	- запас міцності
psi	- фунт на квадратний дюйм
ST	- напрям волокон в напрямку мінімального розміру
ω	- густина

ВСТУП

В умовах конкурентного ринку, швидкого технологічного розвитку існує високий попит на індивідуалізовані вироби складної форми, ефективне одиничне виробництво є викликом для підприємств. Потреба удосконалення наявних технологічних процесів зумовлена високою конкуренцією на ринку, боротьбою за споживача. Вибір ефективного технологічного процесу завжди був актуальним, а для деталей складної геометричної форми вибір технологічного процесу є надзвичайно важливим.

Магістерська дисертація має на меті проаналізувати наявні проблеми та способи вирішення питання підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в одиничному виробництві. Дослідження базується переважно на порівнянні традиційних та адитивних методів виробництва. Розглянуто можливості та переваги адитивних технологій для одиничного виробництва. Зроблено аналіз взаємозамінності технологічних процесів в одиничному виробництві.

1 АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРИ ТА НАЯВНИХ НАПРАЦЮВАНЬ

Виробництво це фундаментальна основа будь-якої індустріально розвиненої країни. Чим вище виробнича активність країни, тим більший рівень життя, і навпаки. Виробничим потужності надають можливість працевлаштування для великої кількості людей з різним рівнем кваліфікації. Методи виробництва постійно вдосконалюються та вимагають певного рівня кваліфікації працівників. Маючи таку висококваліфіковану робочу силу, країна здатна конкурувати на світовому ринку.

Розвиток промисловості є стратегічним завданням розвинутих країн для підтримки національного багатства та економічної могутності. Багато дослідників та організацій наголошують на важливості розвитку промисловості для зростання економіки [7].

Промислова революція розпочалась з винаходу парового двигуна і після цього постійно розвивається та змінюється. З розвитком технологій масштаб та складність методів виробництва постійно зростають. На цей момент критеріями ефективності є продуктивність та якість продукції. Промисловість в пошуках шляхів оптимізації витрат на виробництво та підтримання конкурентоспроможності. Тенденції розвитку промисловості рухаються в напрямку широкого використання комп'ютерних можливостей для аналізу та проєктування продукції.

З короткого огляду впливу промисловості на національну економіку, представленого вище, слідує наступний висновок: глобальне виробництво продовжуватиме зростати й надалі, причому швидшими темпами, оскільки кількість споживачі невпинно зростає. Для країн з економікою, що розвивається, розвиток промисловості – це шанс досягти статусу «розвиненої». Щобільше, розвиток та підтримування виробництва, важливе для економіки кожної країни. Також очевидна важливість розвитку промисловості в контексті глобалізації. Для деяких країн, таких як Японія чи

Тайвань, які майже не мають природних ресурсів, виробництво є єдиним засобом наповнення бюджету.

Нижче розглянуто стан промисловості на сьогоднішній день та значна увага приділяється використанню адитивних технологій. Адитивні технології є ідеальним рішенням при одиничному чи малосерійному виробництві. Також наведено порівняння традиційних та адитивних методів виробництва.

1.1 Методи класифікації типу виробництва.

Існує декілька методів класифікації виробництв за типами. До найбільш поширеної класифікації відноситься класифікація за кількістю виробленої продукції. За цією класифікацією виробництво поділяють на одиничне, малосерійне, середньосерійне, великосерійне та масове. При цьому, не існує чітких меж між цими типами. Також тип виробництва залежить від маси та габаритів деталі [9].

З розвитком верстатів з ЧПК, межі між типами виробництв стають всі більше не визначним. До прикладу, раніше для виготовлення більш менш складної продукції використовували декілька типів верстатів, що своєю чергою вимагало створення виробничої лінії. Зараз ж багато продукції виготовляють за допомогою багато осевих верстатів з ЧПК. Таким чином, відпадає необхідність утримувати великі промислові потужності.

Також наявна класифікація не визначає точно межі між типами виробництва. Наприклад, продукція виготовляється в кількості 20 одиниць за допомогою верстат з ЧПК. В залежності від кількості деталей це малосерійне виробництво, а зважаючи на використання лише одного верстату це класифікують як одиничне виробництво.

Традиційний спосіб класифікації можна зобразити у вигляді схеми (Рисунок 1.1). Така схема відображає залежність типу виробництва від об'єму та різноманітності виробленої продукції. Також наведено схематичне зображення зміни ключових характеристик для кожного типу виробництва, а

саме: швидкість доставки, вартість та якість виробленої продукції, а також, інноваційність та гнучкість підприємства.

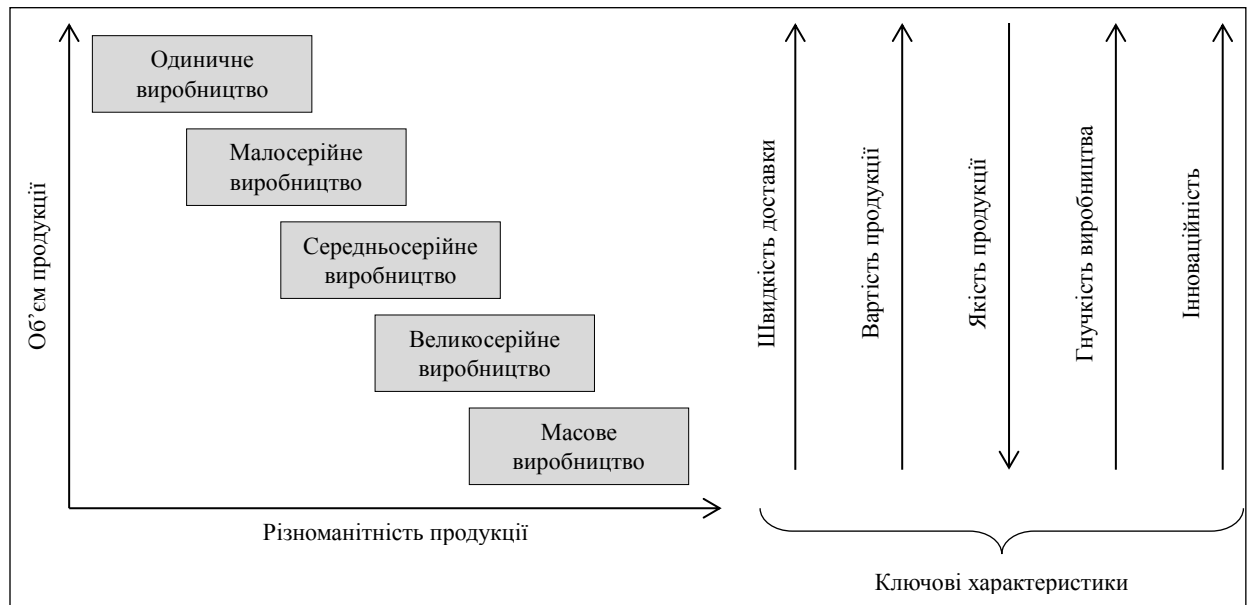


Рисунок 1.1 – Схематичне зображення класифікації виробництв за типами

Метод виробництва впливає безпосередньо на низку аспектів: вибір матеріалу, розміри, геометрія, допуски тощо. Таким чином, метод виробництва потрібно обирати ще на етапі розроблення концепції деталі. Завжди існують альтернативні методи виробництва, але необхідно вибирати найбільш конкурентоспроможний. Конкурентоспроможний метод виробництва є найменш вартісним, забезпечує необхідну якість та виконання функціональних вимог деталі [9].

Отже, на розробника покладається відповідальність за відповідність деталі вимогами замовника, державним та галузевим стандартам, а також забезпечення якості на кожному з етапів. Якість необхідно забезпечити на всьому проміжку виготовлення: від вибору матеріалу до складання готового виробу і передачі замовнику. Тобто розробка концепції виробу є ключовим завданням у виробництві. Зниження виробничих затрат з одночасним збереженням якості продукції є передумовою конкурентоспроможності та успіху підприємств.

Багато підприємств підвищують ефективність за рахунок інвестицій в автоматизацію виробництва та купівлю передових верстатів, але правильний вибір технологічного процесу виготовлення є ключовим в підвищенні ефективності виробництва та зниженні витрат.

1.1.1 Матриця вибору технологічного процесу

Існує безліч методів виробництва, водночас є необхідність швидко вибирати оптимальний. Перш за все, вибір технологічного процесу залежить від масовості виробництва.

В книзі [9] автор пропонує матрицю вибору технологічного процесу (PRIMA selection matrix). Ця матриця об'єднує найбільш поширені методи виробництва. Матриця розроблена за співробітництва з інженерами фахівцями з кожного переліченого технологічного процесу. Дані для матриці PRIMA були зібрано з понад 20 джерел, щоб якомога ширше охопити всі можливості технологічних процесів. Отже, матриця є гарним ресурсом для вибору технологічного процесу для певної деталі із заданою серійністю.

На Рисунок 1.2 наведено перекладену та адаптовану версію матриці (PRIMA selection matrix). Перекладена версія включає лише найбільш поширені метали в галузі машинобудування.

Ретельно розроблений проект на ранніх етапах є запорукою успіху виробництва. Адже внесення змін на завершальному етапі виробництва неможливе або дуже дороге. Згідно [9] витрати на внесення змін на пізніх етапах проектування в середньому сягають 30%. Зважаючи на конкурентне середовище ринку, це великий показник.

Кількість виробів	Матеріал				
	Чавуни	Вуглецеві сталі	Інструментальні сталі	Алюміній	Титан
1 - 100	[3.5] [3.6] [3.7] [6M] [7.1] [7.4]	[3.5] [3.7] [4.10] [6M] [7.1] [7.5] [7.6]	[3.1] [3.5] [3.7] [4.10] [6M] [7.1] [7.5] [7.6] [7.7]	[3.5] [3.7] [4.10] [6M] [7.1]	[3.1] [3.6] [4.7] [4.10] [6M] [7.1] [7.5] [7.6] [7.7]
100 - 1 000	[3.2] [3.5] [3.6] [3.7] [6M] [7.1] [7.3] [7.4]	[3.2] [3.5] [3.7] [4.10] [6M] [7.1] [7.3] [7.4] [7.5]	[3.1] [3.2] [3.7] [6M] [7.1] [7.3] [7.4] [7.5] [7.6] [7.7]	[3.2] [3.5] [3.7] [3.8] [4.5] [4.10] [6M] [7.1] [7.3] [7.5]	[3.1] [3.6] [4.7] [4.10] [6M] [7.1] [7.3] [7.4] [7.5] [7.6] [7.7]
1 000 - 10 000	[3.2] [3.3] [3.5] [3.6] [3.7] [4.11] [6A] [7.2]	[3.2] [3.3] [3.5] [3.7] [4.1] [4.3] [4.10] [4.11] [6A] [7.2] [7.3] [7.4] [7.5]	[3.2] [3.5] [3.7] [4.1] [4.4] [4.11] [6A] [7.2] [7.3] [7.4] [7.5]	[3.2] [3.3] [3.5] [3.8] [4.1] [4.3] [4.10] [4.11] [6A] [7.2] [7.3] [7.4]	[4.1] [4.7] [4.10] [4.11] [6A] [7.2] [7.3] [7.4] [7.5]
10 000 - 100 000	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[3.9] [4.1] [4.3] [4.4] [4.5] [4.11] [4.12] [4.13] [6A] [7.2] [7.5]	[4.1] [4.4] [4.5] [4.11] [4.12] [4.13] [6A] [7.2]	[3.2] [3.4] [3.9] [4.1] [4.3] [4.4] [4.5] [4.11] [4.12] [4.13] [6A]	[4.1] [4.4] [4.11] [4.12] [4.13] [6A] [7.2] [7.5]
> 100 000	[3.2] [3.3] [4.11] [6A]	[3.9] [4.1] [4.2] [4.3] [4.4] [4.5] [4.12] [4.13] [6A]	[4.12] [6A]	[3.2] [3.9] [4.1] [4.2] [4.3] [4.4] [4.5] [4.7] [4.8] [4.11] [4.12] [4.13] [6A]	[4.12] [6A]
Будь яка кількість	[3.1]	[3.1] [3.6] [4.6] [4.8] [4.9]	[3.6] [4.6]	[3.1] [3.6] [4.6] [4.8] [4.9] [7.5]	[4.8] [4.9]

Процеси лиття

- [3.1] лиття в піщані форми
- [3.2] лиття в пісок покритий смолою
- [3.3] гравітаційне лиття в піщані форми
- [3.4] лиття під тиском
- [3.5] відцентрове лиття
- [3.6] лиття за виплавлюваними моделями
- [3.7] лиття за керамічними формами
- [3.8] лиття за гіпсовими формами
- [3.9] лиття під тиском

Процеси механічної обробки

- [6A] обробка за допомогою верстатів з ЧПУ
- [6M] обробка за допомогою верстатів без ЧПУ

Процеси формоутворення

- [4.1] кування
- [4.2] прокат
- [4.4] волочіння
- [4.4] холодне штампування
- [4.5] холодна висадка
- [4.6] розвальцьовування
- [4.7] надпластичне штампування
- [4.8] різання листового металу
- [4.9] штампування листового металу
- [4.10] витяжка
- [4.11] порошкова металургія
- [4.12] спікання порошкових металів
- [4.14] екструзія металу

Не традиційні технологічні процеси

- [7.1] електроерозійна обробка
- [7.2] електрохімічна обробка
- [7.7] електронно-променева обробка
- [7.7] лазерно-променева обробка
- [7.5] хімічна обробка
- [7.6] ультразвукова обробка
- [7.7] абразивно-струменева обробка

Рисунок 1.2 – Матриця вибору технологічного процесу. Перекладено та адаптовано з [9]

З досліджень проектування для складання (Design for Assembly; DFA) відомо що величезна економія може бути досягнута на рівні продукту. Результатом застосування проектування для складання є скорочення кількості деталей до 50%, а також середня економія витрат на складання на 45%. Як наслідок собівартість продукції зменшується на 30% [9].

В той час як деякі конструктори мають практичний досвід виробничих процесів і розуміють обмеження та можливості, є багато фахівці які не мають такого досвіду. Як наслідок, багато спроектованої продукції не є оптимальною. Розробник має усвідомлювати можливості виробничих процесів та складання для яких він проектує. Окрім цього визначення геометрії, матеріалу та допусків мають далекосяжні наслідки такі як термін служби, ремонтпридатність тощо. Розуміння наслідків конструкторських рішень є важливими на етапі проектування.

Для досягнення необхідних показників якості та витрат на виготовлення конструкції, необхідно виконати взаємопов'язані дії з вибору альтернативних процесів. Це не завжди легко, особливо під час розробки нового продукту. Адже зазвичай існує декілька технологічних процесів і всі наступні етапи проектування взаємозалежні від вибраного технологічного процесу.

1.1.2 Вартість виробничих процесів

Одним із ключових факторів у питанні вибору технологічного процесу виготовлення є доступність та вартість цього процесу. Проте опублікованих робіт з даного питання є вкрай мало. Зазвичай інформація про вартість певного процесу виготовлення недостатньо докладна, що не дає змогу точно оцінити економічний аспект виробництва. До того ж наявна інформація, як правило, суперечлива: деякі процеси описані дуже докладно, тоді як іншими, можливо, нехтують [9].

Компанії, які усвідомлюють важливість проектування для виробництва, багато років шукають вирішення даної проблеми і більшість обирають

«командний» підхід для вирішення. Тобто в компанію залучають велику кількість людей, які мають забезпечити необхідний досвід. Дійсно, інколи даний підхід спрацьовує і дає прийнятні результати, але також є низка перешкод, таких як: складність залучити достатню кількість людей з необхідним досвідом; відсутність структурованості та послідовності в «командному» проектуванні. Окрім того, велика ймовірність що залучені фахівці матимуть досвід лише в конкретній галузі і конкретних виробничих процесах, що в свою чергу унеможлиблює впровадження альтернативних методів виробництва, так як вони залишаються поза увагою проектувальників.

1.1.3 Послідовність вибору технологічного процесу

Для вибору будь-якого процесу виробництва необхідно зважати на наступні конструктивні міркування [9]:

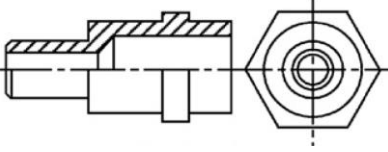
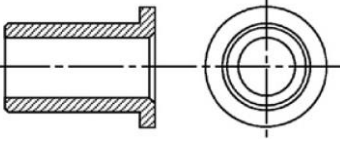
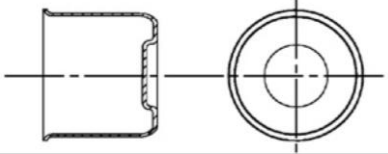
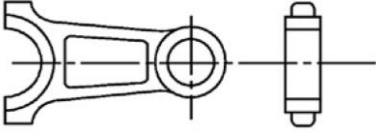
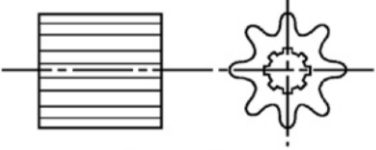
- Які форми (поверхонь) можна виготовити?
- Які обмеження на габарити?
- Яку точність можна отримати за допомогою обраного процесу?
- Які наслідки процесу для стану поверхні?
- Яка вартість процесу та необхідних інструментів?
- Які наслідки для цілісності компонентів?

Перед проектуванням для виробництва, рекомендовано зробити наступні дії [9]:

- Знайти інформацію про можливі методи виробництва;
- Проконсультуватися з виробником, отримати інформацію про обраний процес та його можливості;
- Слідувати загальним правилам проектування та конкретним інструкцій щодо обраного технологічного процесу.

Як приклад, Таблиця 1.1 ілюструє що відносна вартість може сягати 4.2 одиниці при виборі не оптимального технологічного процесу.

Таблиця 1.1 – Порівняльна таблиця відносної вартості технологічних процесів.
Перекладено та адаптовано з [9].

Деталь	Матеріал	Кількість	Виробничий процес	Відносна вартість
	Сталь	1 000 000	Механічна обробка різанням	4.2
			Холодне формування	1
	Бронза	50 000	Точіння	2.2
			Спікання порошкових металів	1
	Алюміній	5 000	Ротаційна витяжка	1.8
			Глибока витяжка	1
	Сталь	100 000	Закрите штампування	1.3
			Лиття у піщані форми	1
	Сталь	5 000	Механічна обробка різанням	2.6
			Холодна екструзія	1

1.2 Використання одиничного виробництва в промисловості.

Одиничне виробництво характеризується малим обсягом випуску широкої номенклатури продукції. Згідно чинного державного стандарту України ДСТУ 2960-94: «одиничне виробництво – це тип виробництва, що характеризується невеликим обсягом випуску однакової продукції, повторне виготовлення якої, як правило, не передбачається». Також повторне виготовлення може бути через невизначений проміжок часу.

Відсутність постійного технологічного процесу, використання універсального обладнання (переважно багато осеві верстати з ЧПК), висока частка ручних робіт, все це ознаки одиничного виробництва. Залежні ключових характеристик від типу виробництва, зокрема одиничного, проілюстровано вище на *Рисунок 1.1*.

Одиничне виробництво переважно використовується невеликими підприємствами або ж для виготовлення ремонтних деталей. Адже саме у випадку ремонтних робіт, деталь потрібно в одному або декількох екземплярах і якщо деталь специфічна, то немає можливості придбати готову деталь. В такому разі підприємство виготовляє деталь самостійно або ж замовляє в підрядників.

1.3 Адитивне виробництво як метод одиничного виробництва.

Протягом останнього десятиліття, адитивні технології набувають все більшої популярності у всіх галузях промисловості. На додачу до вже традиційних методів виробництва (*Рисунок 1.2*), вже є наявний широкий вибір адитивного виробництва. Необхідно чітко усвідомлювати недоліки та переваги адитивного виробництва в порівнянні з традиційними методами виробництва.

Подальша частина Розділу 1 присвячена систематизації наявних методів адитивного виробництва та аналізу поточних досягнень у цій сфері. Подальший огляд базується на літературі [1, 2, 3, 5, 7].

При адитивному виробництві, на відміну від субтрактивного (традиційного), матеріал наноситься, а не видаляється, пошарово. Пошарове нанесення матеріалу повністю змінює характеристики деталі, можливості дизайну, виробничі процеси і навіть бізнес моделі підприємств.

Адитивні технології надають унікальні можливості для проектування. З легкістю можна виготовляти геометрично складні деталі, які не можливо виготовити традиційними методами. Також є можливість використовувати композитну структуру для досягнення оптимального розподілу механічних властивостей. Окрім того, є можливість виготовляти відразу функціональні пристрої з кінематичним з'єднанням.

Книга [1] належить до серії книг від видавництва ASM Handbook. Це авторитетне видавництво, яке має майже сторічну історію. В книзі основна увага приділена застосуванню адитивного виробництва для металів, проте, також розглянуто кераміку та полімери. В цій книзі розглянуто взаємозв'язок між типом адитивного виробництва, внутрішньою структурою, механічними властивостями тощо. Також розглянуто можливі дефекти під час друку та способи оптимізації і моделювання матеріалів та процесів. Книга надає широкий перелік прикладів успішно впроваджених адитивних технологій у різноманітні галузі.

1.3.1 Проектування для адитивного виробництва

Раніше згадане проектування для складання (DFA – Design for assembly) було розроблено для адаптації конструкції до обмежень традиційних методів виробництва. Натомість адитивне виробництво надає набагато більше можливостей для проектування. У зв'язку з цим розвивається новий тип проектування для адитивного виробництва (DFAM – Design for additive manufacturing).

Основна мета проектування для адитивного виробництва (DFAM) максимізувати продуктивність продукту шляхом об'єднання компонентів,

зміни розмірів, використання запроєктованих механічних властивостей в кожному напрямку. Впровадження адитивного виробництва та масштабність змін залежить від рівня проектування. Тобто зміни можуть стосуватися однієї конкретної деталі, вузла або ж продукту в цілому.

По мірі впровадження адитивно виготовлених деталей в конструкцію зростає ефективність системи в цілому. Одночасно потрібно зважати що існує певний поріг змін, коли зворотні зміни вже не можливі. Коли в продукті виготовляється лише декілька деталей методами адитивного виробництва, то є можливість за потреби повернутися до попереднього дизайну розрахованого на традиційні методи проектування. У випадку ж проектування всього вузла чи продукту для адитивного виробництва, зворотні зміни не можливі, так як перепроєктовано всю геометрію. При проектуванні для адитивного виробництва геометрія продукту може змінюватися кардинально для досягнення ефективності та функціональності.

За допомогою адитивного виробництва можна виготовляти деталі зі складною геометрією без залучення допоміжної оснастки чи спеціалізованих інструментів. Оптимальна геометрія деталі може бути розрахована математично за допомогою оптимізації топології, оптимізації форми та внутрішньої будови [1]. Адитивне виробництво дозволяє створювати сітчасту внутрішню структуру, що неможливо зробити традиційними методами виробництва.

Рисунок 1.3 ілюструє типову послідовність дій в адитивному виробництві. Все розпочинається з визначення вимог до деталі та проектування тривимірної моделі. За необхідності деталь оптимізують за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення. Після чого до моделі додається допоміжна опорна структура і генерується траєкторія друку. Нарешті деталь друкують і виконують пост-обробку.

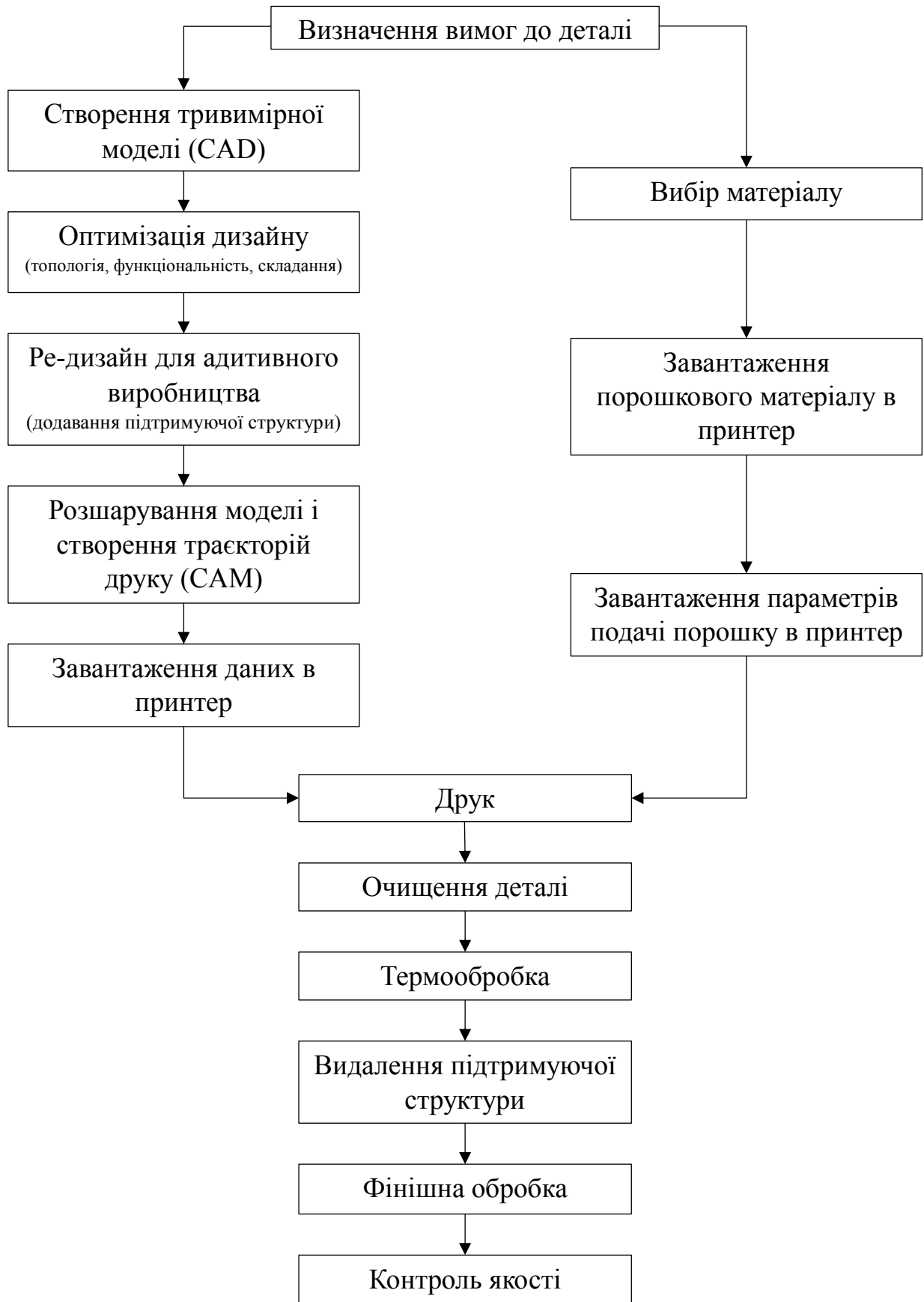


Рисунок 1.3 – Типова послідовність дій в адитивному виробництві.
Перекладено та адаптовано з [2].

1.3.2 Принципи адитивного виробництва

Адитивне виробництво сьогодні на стадії активного розвитку. Як і будь-який технологічний процес, з самого початку розвитку формуються основоположні принципи. Адитивне виробництво теж не є винятком. Знання і розуміння цих принципів окреслює наявні та майбутні можливості цього технологічного процесу

Аналогічно до «Три закони робототехніки», Айзека Азімова, відомий науковець в галузі 3D-друку Ход Ліпсон (Hod Lipson) запропонував «Десять принципів 3D-друку» [3]. Ці принципи окреслюють наявні та майбутні адитивні технології. Хоча деякі провідні експерти в галузі сперечаються щодо точності формулювання принципів, нижченаведені принципи закладають фундамент для використання технології. Нижче наведено перекладені та адаптовані «Десять принципів 3D-друку» Хода Ліпсона.

1. Складність виробництва є безкоштовною.

Вартість виробництва немає залежати від геометричної складності деталі. Це твердження базується на тому що процес виробництва є пошаровим. А отже, кожен шар є доволі простої геометричної форми для виготовлення. Об'єднання простих шарів в цілісну структуру утворює геометрично складну деталь. Концепція підтверджує що для адитивних технологій складність форми не є обмеженням, в той час як для традиційні методи виготовлення дуже обмежені у здатності складного формоутворення. Отже, дана концепція стверджує що вартість адитивного виробництва не має залежати від складності форми деталі.

2. Різноманітність безкоштовна.

Традиційне, конвеєрне виробництво обмежене виготовленням певних виробів. Для виготовлення іншого виробу необхідно певний час для на переналаштування лінії і при цьому номенклатура виробів які можна виготовляти на одному конвеєрі є дуже обмеженою. На противагу цьому,

адитивне виробництво здатне виготовляти широкий спектр різноманітних виробів. При цьому можна змінювати не лише форму деталей, а також і фізичні, хімічні та механічні властивості. Адитивне виробництво не потребує витрат на перепідготовку персоналу так як фахівцю достатньо навчитися працювати з одним принтером і все. В той час як при традиційних методах виробництва, для виготовлення складної геометрії використовують різні типи верстатів, що в свою чергу вимагає залучення більшої кількості фахівців.

3. Не потребує збирання.

Як наслідок з першої концепції, адитивні технології дозволяють створювати деталі з складною формою, які за традиційних методів потрібно було б розділити на декілька деталей. Тобто є значна економія ресурсів із-за відсутності складальних операцій, які при традиційному виробництві займають багато часу і при цьому ще для деталі необхідно встановлювати та витримувати допуски на операції складання.

4. Нульовий час виконання замовлення.

За традиційних методах виробництва, створенню продукту передують значний час планування. Адже для виготовлення необхідно розробити технологічний процес який включає послідовність операцій оброблення. При цьому більшість деталей виготовляють на декількох верстатах і потрібно запланувати час на зміну та налаштування верстатів. Для кожного виробу потрібні різні заготовки, оснащення тощо. Як наслідок підприємство витрачає ресурси на купівлю та обслуговування верстатів і зобов'язане мати запас заготовок різної форми та розмірів. Натомість при адитивному виробництві використовується один і той самий принтер, а в якості заготовки використовується порошок. Час витрачають лише на розроблення тривимірної моделі виробу для друку. Отже, витрачений час між моментом замовлення до старту виробництва може становити менше одного робочого дня, що практично неможливо досягти при використанні традиційних методів.

5. Необмежений простір для дизайну.

Порівнюючи традиційні методи виготовлення та адитивне виробництво, очевидна перевага другого, так як майже не існує жодних обмежень на форму. До прикладу, точіння дозволяє виготовити деталі лише формою тіл обертання, в той час як для адитивного виробництва практично всі форми є «правильними».

6. Виробництво з нульовою кваліфікацією.

Фахівці зайняті в традиційному виробництві, потребують років навчання та досвіду, щоб виготовляти відповідальні деталі з жорсткими допусками. На противагу, адитивне виробництво потребує значно менше досвіду. Це полегшує пошук співробітників для компаній, але варто зазначити що адитивному виробництву надають перевагу здебільшого інженери молодшого покоління. Це зумовлено тим що дана технологія комп'ютеризована.

7. Компактне виробництво.

Обладнання для адитивного виробництва займає невелику площу, що робить цей вид виробництва ідеальним для домашнього виробництва. Адитивне виробництво не потребує величезних розмірів виробничих приміщень як традиційне виробництво, що є значною перевагою.

8. Менше побічних відходів.

Значно зменшується кількість відходів матеріалу, таких як стружка після пост-обробки. До прикладу, при виготовленні силових нервюр для крила літака використовують фрезерування з суцільної плити, при цьому частка відходів в стружку може сягати 80%. На противагу, адитивне виробництво дозволить зменшити частку відходів лише до кількох відсотків.

9. Варіативність матеріалів.

Принтер надає можливість використовувати одночасно різні матеріали для друку виробу. Кожен шар наноситься з високою роздільною здатністю.

Така опція дозволяє використовувати широкий спектр матеріалів з різними хімічними, механічними та візуальними властивостями в одному виробі. В той час як традиційні методи виробництва зазвичай дозволяють виготовляти деталі з одного матеріалу.

10. Точне фізичне відтворення.

Адитивне виробництво надає можливість точно відтворити геометрію тривимірної моделі. Однак сучасна технологія 3D-сканування обмежена, так як здатна лише сканувати видимі лінії. Іншими словами, є можливість сканувати і створити автоматично цифрову модель, але не можливо сканувати внутрішні порожнини чи канали.

Як було сказано в передмові до десяти принципів адитивного виробництва, не всі фахівці погоджуються з формулюванням цих принципів. Також можна зауважити що принцип 6 є суперечливим. Адже формулювання про достатність «нульової» кваліфікації вводить в оману про нескладність адитивного виробництва. При виготовленні відповідальних деталей з дійсно жорстким допусками методами адитивного виробництва, може вимагатися не менша кваліфікація ніж при традиційних методах.

До прикладу, виготовлення деталей для авіаційної галузі є стандартизованим та чітко регульованим. Так як на даний момент існує недостатньо стандартів для адитивних технологій, фахівець зобов'язаний мати значний досвід в інженерії та багаж знань з різних галузей. Для успішного використання адитивних технологій у відповідальних галузях, як авіація зокрема, фахівець має володіти знання з матеріалознавство, принципів роботи принтерів, авіаційними стандартами та вимогами щодо безпеки тощо. Отже, в адитивному виробництві успішно можна використати досвід старшого покоління інженерів та знання комп'ютерів молодшого покоління. Саме така співпраця буде успішною та найбільш швидка в розвитку.

1.3.3 Приклади впровадження адитивних технологій у виробництво

Провідні компанії з різних галузей вже використовують переваги адитивних технологій у виробництві. Щорічно проводяться конференції в різних країнах для демонстрації досягнень в адитивному виробництві. Як приклад можна навести конференцію за участю федерального управління авіації в США (FAA) та провідних авіакомпаній [4].

В рамках опрацювання наявної літератури з теми дисертації було опубліковано статтю про приклади використання адитивних технологій у сфері авіацій. В рамках даної роботи наведемо лише один приклад використання адитивних технологій у сфері авіації.

Авіаційний двигун GE9X було сертифіковано в 2020 році Федеральним Управлінням Авіації (FAA) [4]. Конструкція даного двигуна включає близько 300 одиниць адитивного виготовлених деталей. Варто звернути увагу що лопаті турбіни також виготовлено за допомогою адитивних технологій. Отже, адитивні технології вже досягли рівня, при якому 3D друк металу використовують для виробництва не лише другорядної конструкції, а також і для дуже відповідальних частин, таких як компоненти авіаційного двигуна, в тому числі і лопаті турбіни.

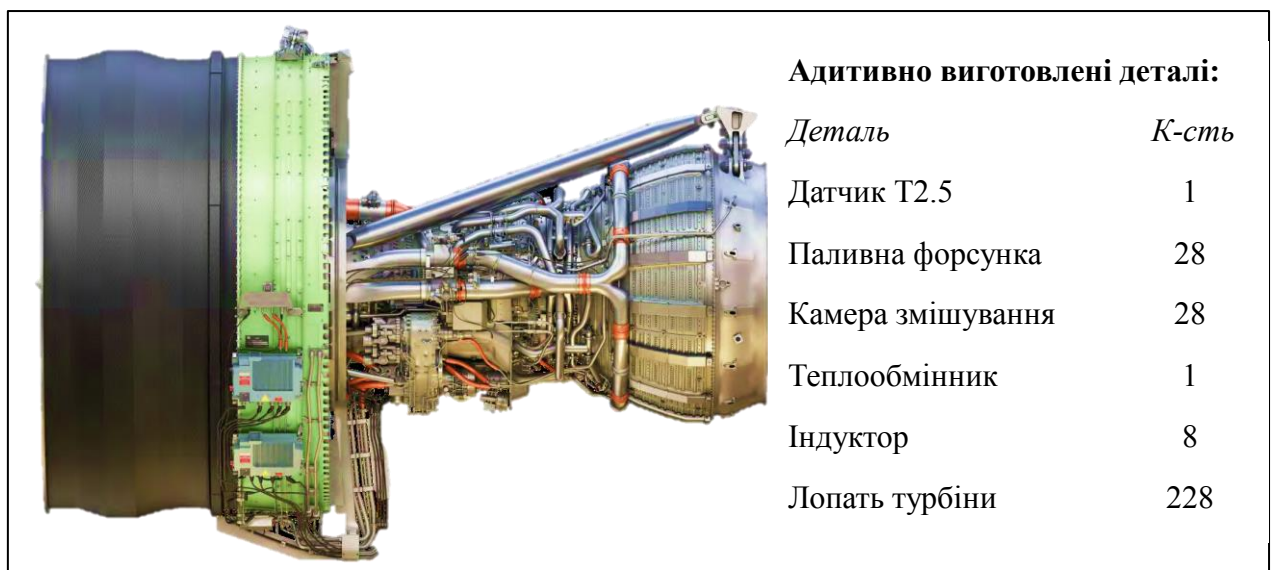


Рисунок 1.4 – Адитивно виготовлені деталі в конструкції двигуна GE9X [4]

1.4 Висновки

Проаналізувавши наявну літературу з питання одиничного виробництва, переважно зважаючи на адитивні технології, можна стверджувати, що адитивні технології ідеально підходять для одиничного виробництва.

Ефективність одиничного виробництва, а також ефективність продукції можна досягнути оптимізуючи виробництво, впроваджуючи адитивні технології за потреби. Водночас потрібно розуміти, що проектування та оптимізація може бути економічно не виправданою в деяких галузях. Тому потрібно завжди оцінювати загальні витрати на виробництво за допомогою різних технологічних процесів. Адитивні технології доцільно використовувати за умови здешевлення виробництва, а також доцільність може бути оправдана зменшенням маси продукції, і як наслідок зменшення витрат на експлуатацію. Наприклад, зменшення маси в авіації є причиною зменшення витрат на паливо, тому використання адитивних технологій є економічно доцільним.

Підсумовуючи вищесказане, сьогодні доволі важко оцінити всі аспекти альтернативних технологічних процесів із-за нестачі конкретних актуальних даних щодо вартості того чи іншого процесу. Проте є деякі методи для приблизного порівняння вартості виробництва. Водночас, при проектуванні, необхідно пам'ятати про далекосяжні наслідки обраних параметрів та процесу виробництва. Адже висока вартість виробництва може бути компенсована нижчою вартістю експлуатації та терміном служби.

2 ВЗАЄМОЗАМІННІСТЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ В ОДИНИЧНОМУ ВИРОБНИЦТВІ

Як було розглянуто у Розділі 1, для кожної деталі є декілька можливих методів виготовлення в залежності від кількості, маси, розмірів продукції тощо. Подальші розділи сфокусовані переважно на виробництві в авіаційній галузі. Виробництво в авіації відрізняється від машинобудування вимогами до якості, а також вимагається додаткові розрахунки.

Авіаційні деталі мають бути проаналізовані на довговічність та живучість, а як відомо, деякі технологічні процеси не можуть забезпечити достатню довговічність. Наприклад, використання лиття доволі обмежене в авіаційній галузі у зв'язку з складністю точного контролю внутрішньої структури заготовки. Як наслідок, використання лиття обмежено другорядною конструкцією, яка не сприймає основні навантаження планера.

Кожна авіаційна деталь виготовляється за певним затвердженим методом виробництва. Зміна методу виробництва має бути чітко обґрунтованою і підтверджена супроводжуючим аналізом та документацією. Необхідно бути впевненим що аналіз охоплює всі необхідні аспекти і нова деталь не погіршує конструкцію в цілому.

В цій роботі проаналізовано кронштейн другорядної структури (non-FCBS). Це означає що даний кронштейн не є конструктивним елементом в конструкції літака і втрата цього елемента не є катастрофічною для безпеки польоту. Даний кронштейн є лише прикладом розглянутим в межах даної роботи і не використовується в конструкції жодного з наявних літаків.

Для виготовлення у виробництві, для другорядних елементів, використовують, зокрема, лиття під тиском. Для використання лиття під тиском, не обов'язково деталь має бути геометрично складної форми. Часто лиття є економічно доцільним із-за швидкості виготовлення на етапі серійного виробництва.

При підтримці та обслуговуванні літаків з'являється необхідність ремонту або заміни одного чи іншого кронштейну. Ремонтне виробництво оцінюється як одиничне виробництво. Для одиничного виробництва кронштейнів рекомендовано використання фрезерування з суцільної плити або ж екструдованого профілю, зважаючи на наявність другого на ринку.

Розглянемо можливість заміни методу лиття на фрезерування з суцільної плити для кронштейна. Для заміни процесу виготовлення, зазвичай, достатньо порівняти механічні властивості литого матеріалу та прокатної плити. Але у випадку кронштейна також необхідно чітко розуміти які конструктивні функції виконує елемент та які навантаження сприймає.

2.1 Постановка задачі

Необхідно проаналізувати можливість заміни кронштейна виготовленого за допомогою лиття по моделям кронштейном фрезерованим з суцільної плити (Рисунок 2.1). Необхідність такої заміни обґрунтовано одиничним виробництвом, для якого не економічно недоцільно виготовлення шляхом лиття за моделями.

Даний кронштейн є другорядною структурою пілона двигуна літака. Виготовлений шляхом лиття за моделями з Ti-6Al-4V (AMS 4992). Діючі навантаження наступні:

- максимальна діюча горизонтальна сила (поздовжня) становить 6000 lb;
- максимальна діюча вертикальна сила становить 4000 lb;
- сили можуть діяти як одночасно, так і по чергово.

Необхідно розробити статичне обґрунтування заміни технологічного процесу, розробити модифіковане креслення ремонтного кронштейна, оформити порівняльну таблицю двох процесів.



Ti-6Al-4V класифікують як альфа-бета сплав. Такі сплави мають хорошу міцність при кімнатній температурі і протягом короткого часу при підвищенні

температури. Даний сплав немає такого негативного ефекту як тривала повзучість. Не рекомендовано застосовувати для використання в кріогенних умовах. Зварюваність погана через двофазну структуру, але можна зварювати при дотриманні особливих заходів [6].

Ti-6Al-4V доступний у всіх видах прокату, а також у вигляді виливків та порошкової металургії. Можу використовуватися у стані відпалу або в іншому стані термічної обробки. Використовується в діапазоні температур від -200 °C до 400 °C. Для досягнення максимальної в'язкості, даний сплав варто використовувати у стані відпалу. Також варто зауважити що міцність даного сплаву залежить від максимальної товщини перерізу. При товщині більше 1 дюйма (2,54 см), розмір бета зерен неможливо зменшити відпалом, що погіршує механічні властивості на розтяг. Особливо дана проблема актуальна при литті [6].

При проектуванні авіаційних деталей, механічні властивості матеріалів мають бути згідно затвердженого стандарту [3] MMPDS-2023.

Представлення механічних властивостей в даному стандарті відрізняється від вже звичних стандартів ДСТУ або ж ГОСТ, тому варто навести коротке пояснення щодо цього.

По-перше, в даному стандарті наведено лише механічні властивості авіаційних сплавів. По-друге, механічні властивості залежать від специфікації для виробництва металу, форми прокату, термообробки, товщини перерізу заготовки, базису (статистичної достовірності властивостей) та напрямку волокон в деталі.

Кожен матеріал, який використовують в аерокосмічній галузі, має бути виготовлено згідно стандарту Aerospace Material Specifications (AMS). Для кожного матеріалу існує свій стандарт, який обумовлює всі етапи виготовлення, хімічний склад сплаву тощо. В таблиці механічних властивостей MMPDS-2023, специфікація вказана в першому рядку. Під час виконання

розрахунків, важливо впевнитись, що використано механічні властивості матеріалу заданої специфікації.

Наступний рядок стандартних таблиць механічних властивостей прокату це класифікація заготовки як лист, плита, поковка, лиття, екструдований профіль тощо. Далі вибір термічної обробки та максимальної товщини перетину заготовки.

Важливо правильно розуміти поняття базису в таблицях MMPDS. Загалом є три базиси, а саме A, B, та S. Дані базиси вказують на статистичну достовірність наведених механічних властивостях. Найчастіше використовують базис B, але використання даного базису включає обмеження при якому навантаження в конструкції не може бути одно-шляховим. Тобто, навантаження в конструкції має розподілятися на декілька деталей і при умові виходу із ладу одного з елементів, інший елемент має мати здатність сприймати додаткове навантаження. Виходячи з даного обмеження, в цій роботі, використано базис A, який використовують при одно-шляховій передачі навантаження (базис A має дещо менші максимальні допустимі напруження в порівнянні з базисом B).

Також при проектуванні важливо звертати увагу на напрям волокон в заготовці, адже від напрямку волокон залежать механічні властивості. При проектуванні провущини чи кронштейна, напрям волокон є максимально важливим для забезпечення якнайкращих механічних та довговічних характеристик.

Варто зауважити, що помилка у виборі механічних властивостей матеріалу призводить до некоректного аналізу в цілому. Тому уважне ознайомлення з всіма примітками до матеріалу наведеному в стандарті MMPDS-2023 є запорукою успішного проектування та аналізу деталі. Саме з цієї причини, дана робота включає детальний опис вибору механічних властивостей для аналізу.

Механічні властивості для оригінального (лиття за моделями) та запропонованого ремонтного матеріалу (плита або ж екструдований профіль) наведено в Таблиця 2.1 нижче.

Згідно наведених даних в таблиці, допустимі напруження на розтяг (F_{tu}), допустимі напруження текучості на розтяг (F_{ty}), напруження текучості на стиск (F_{cy}) екструдованого профілю з Ti-6Al-4V є кращими ніж для лиття за моделями. Одночасно, допустимі напруження на зсув (F_{su}), допустимі напруження на зім'яття (F_{bru}), допустимі напруження текучості на зім'яття (F_{bry}) є дещо гіршими для запропонованого ремонтного матеріалу. Отже, заміну матеріалу неможна обґрунтувати лише шляхом порівняння механічних властивостей матеріалу, адже деякі властивості краще, а деякі гірші. Необхідно повноцінний аналіз для обґрунтування альтернативного (ремонтного) технологічного процесу та матеріалу.

Таблиця 2.1 – Механічні властивості Ti-6Al-4V

Специфікація	AMS 4992	AMS 4911	AMS 4935
Форма	Лиття за моделями	Плита	Екструзія
Термообробка	Відпал	Відпал	Відпал
Товщина, дюйм	<0.500	2.001 – 4.000	2.001 – 3.000
Базис	A	A	A
F_{tu} , ksi			
L	125	130	130
LT		130	130
F_{ty} , ksi			
L	111	120	116
LT		120	116

F_{cy} , ksi			
L	117	124	120
LT		130	125
F_{su} , ksi	86	79	84
F_{bru} , ksi			
($e/D = 1.5$)	201	206	214
($e/D = 2.0$)	252	260	264
F_{bry} , ksi			
($e/D = 1.5$)	172	164	174
($e/D = 2.0$)	207	194	203
e , % (S-Basis)	5	10	8
E , 10^3 ksi	16.9	17.3 *	16.9
E_c , 10^3 ksi	17.4	18.2 *	17.2
ω , lb/in ³	0.160	0.160	0.160
Посилання [3], табл.:	5.4.1.0(g)	5.4.1.0(b ₁)	5.4.1.0(e)

* Механічні властивості титану, зокрема модуль пружності, значно залежить від внутрішньої структури заготовки. В таблиці вказано середнє значення.

2.4 Аналіз виробничого кронштейна

Лиття за виплавлюваними моделями – це виробничий процес, під час якого розплав металу заливають у керамічну форму, що містить порожнину у форму деталі, або ж форми близької до форми деталі. Зазвичай, отриманий виливок потребує мінімальної механічної обробки для отримання кінцевих форм деталі.

Процес лиття по виплавлюваних моделях зазвичай вимагає хімічного фрезерування для видалення альфа-фази з поверхні.

Аналізований кронштейн є частиною внутрішньої конструкції пілона авіаційного двигуна. Кронштейн кріпиться за допомогою чотирьох болтів до оточуючої конструкції, в свою чергу до кронштейна кріпиться напрямна тяга.

Напрямна тяга може створювати прикладену горизонтальну силу (силу на зріз болтів кріплення) 6 000 lb та прикладену вертикальну силу (силу на відрив болтів) 4 000 lb. Прикладені сили можуть діяти одночасно або ж незалежно одна від одної.

Для статичного аналізу скористаємося можливостями SolidWorks 2021 Static Simulation. Так як необхідний матеріал відсутній в стандартній бібліотеці, вносимо механічні властивості в бібліотеку (Рисунок 2.2).

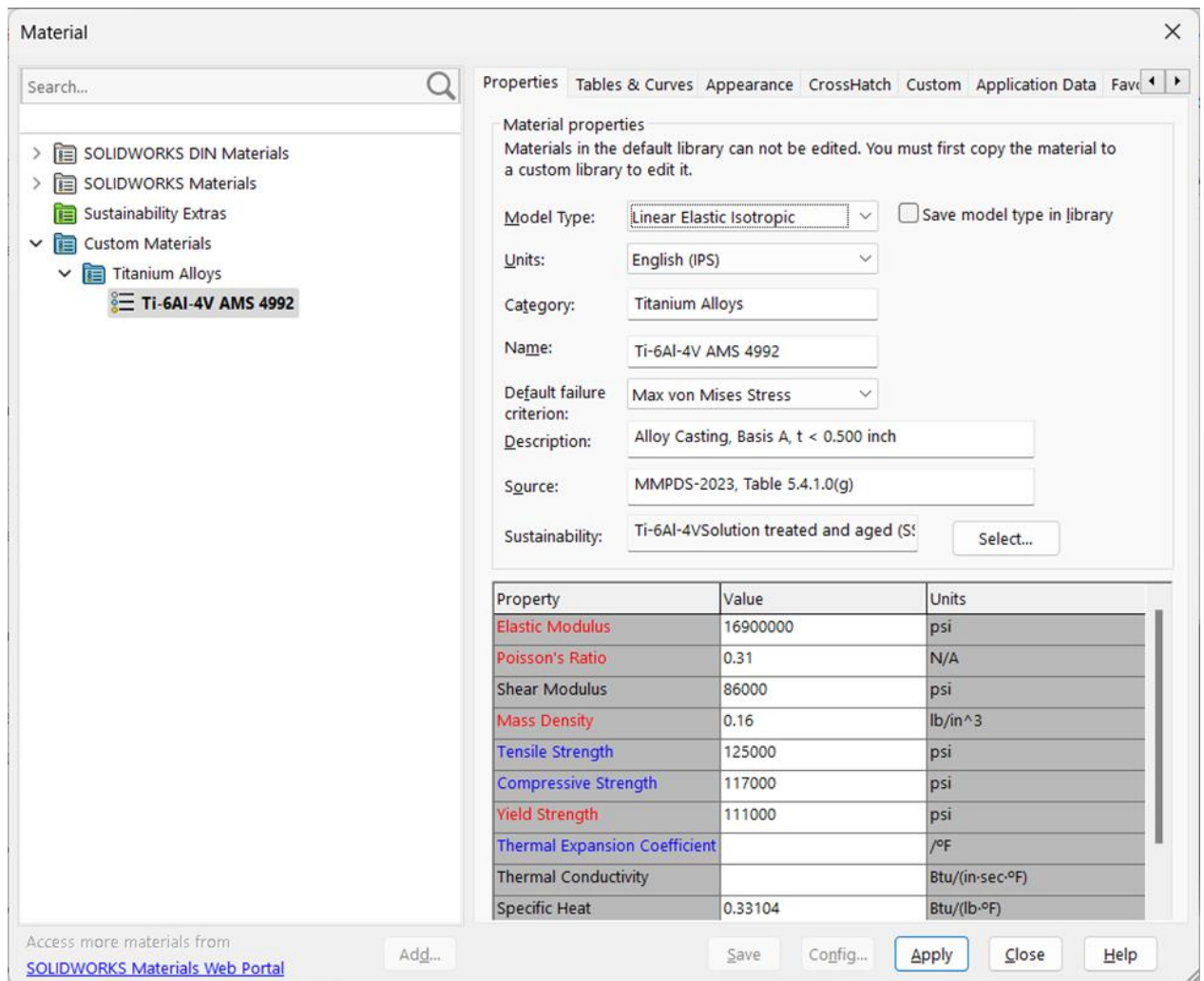


Рисунок 2.2 – Механічні властивості Ti-6Al-4V AMS 4992 (лиття) використані для аналізу кронштейна

На Рисунок 2.3 наведено схему закріплення та навантаження використану в аналізі. Кронштейн зафіксований за 4 отвори на горизонтальному фланці. Навантаження прикладено у вигляді горизонтальної сили 6 000 lb та вертикальної сили 4 000 lb.

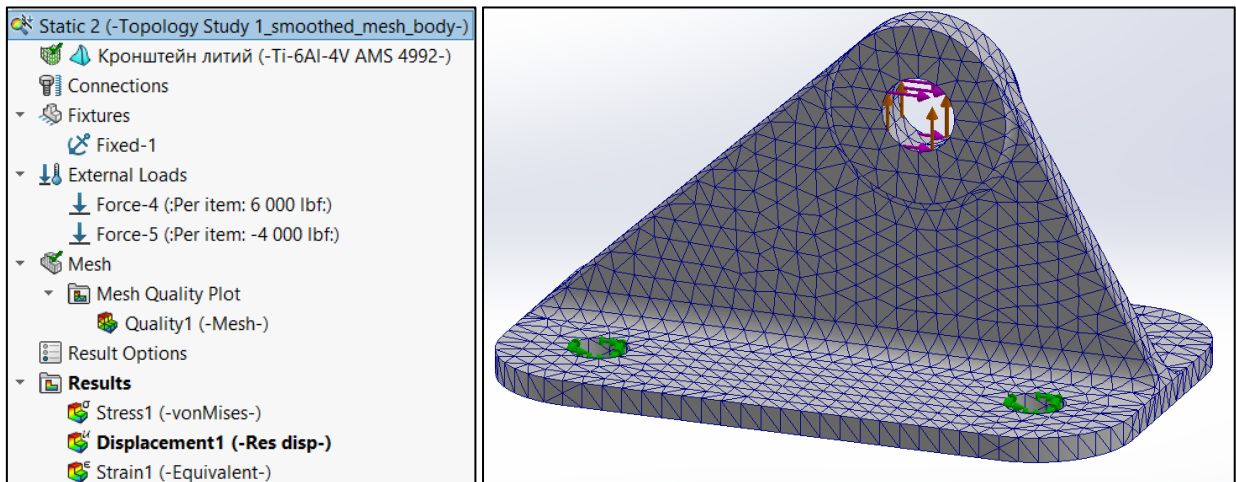


Рисунок 2.3 – Схема закріплення та навантаження

Нижче наведено аналіз трьох варіантів навантаження, а саме:

- Прикладено горизонтальну та вертикальну силу одночасно (Рисунок 2.4);
- Прикладено лише горизонтальну силу (Рисунок 2.5);
- Прикладено лише вертикальну силі (Рисунок 2.6).

Примітка: Розрахунок запасів міцності та порівняння литого і фрезерованого кронштейна наведено в Таблиця 2.2.

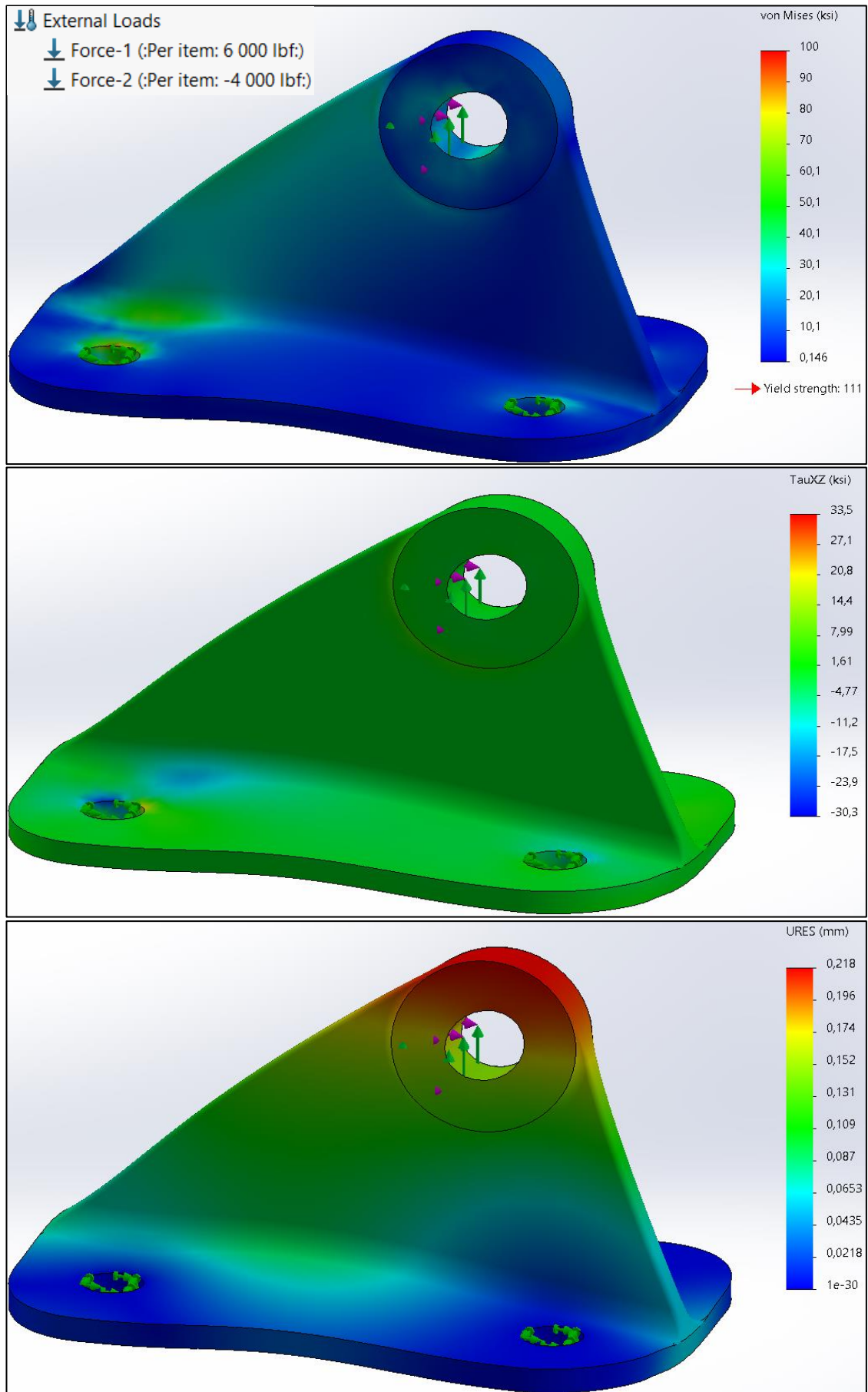


Рисунок 2.4

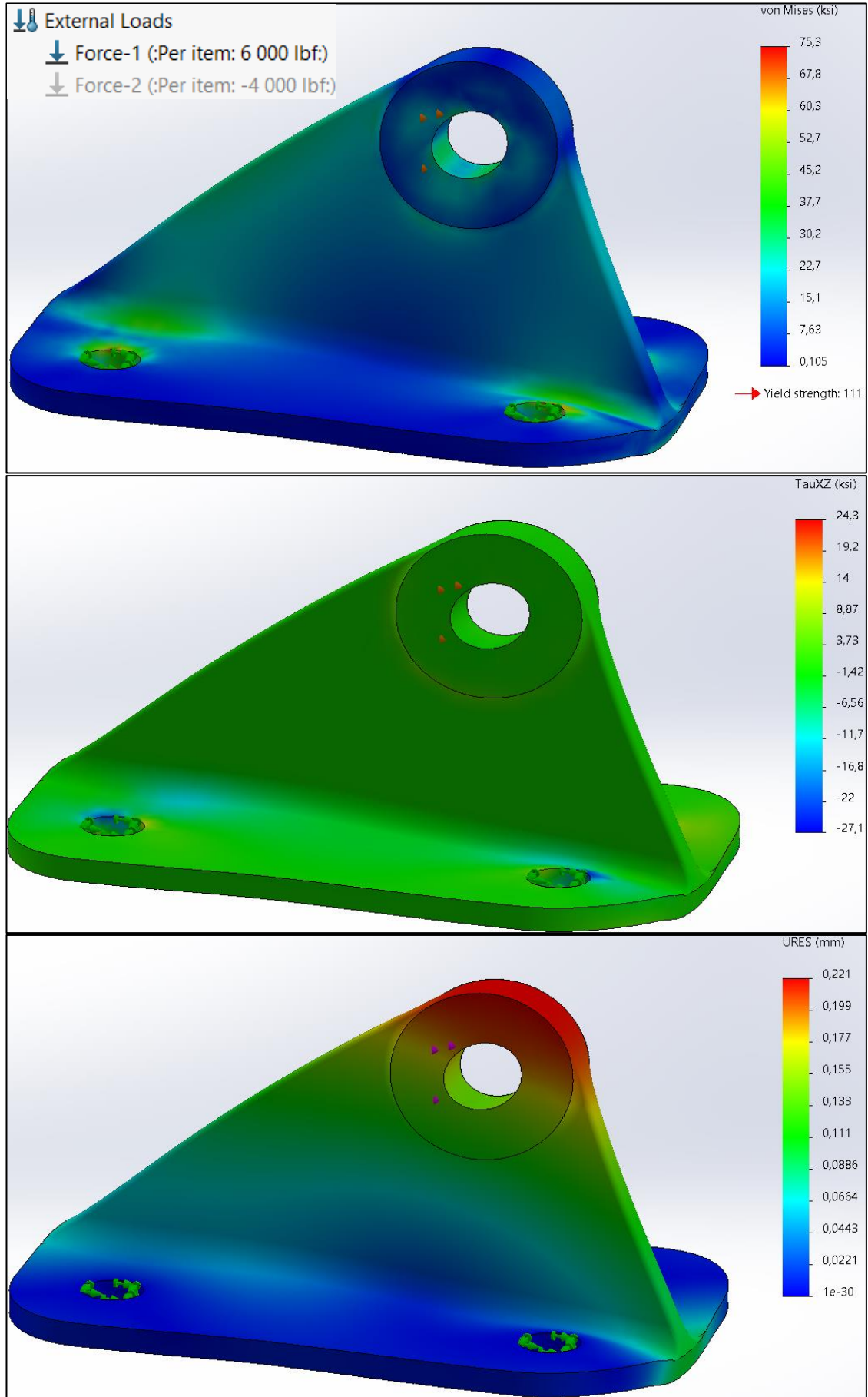


Рисунок 2.5

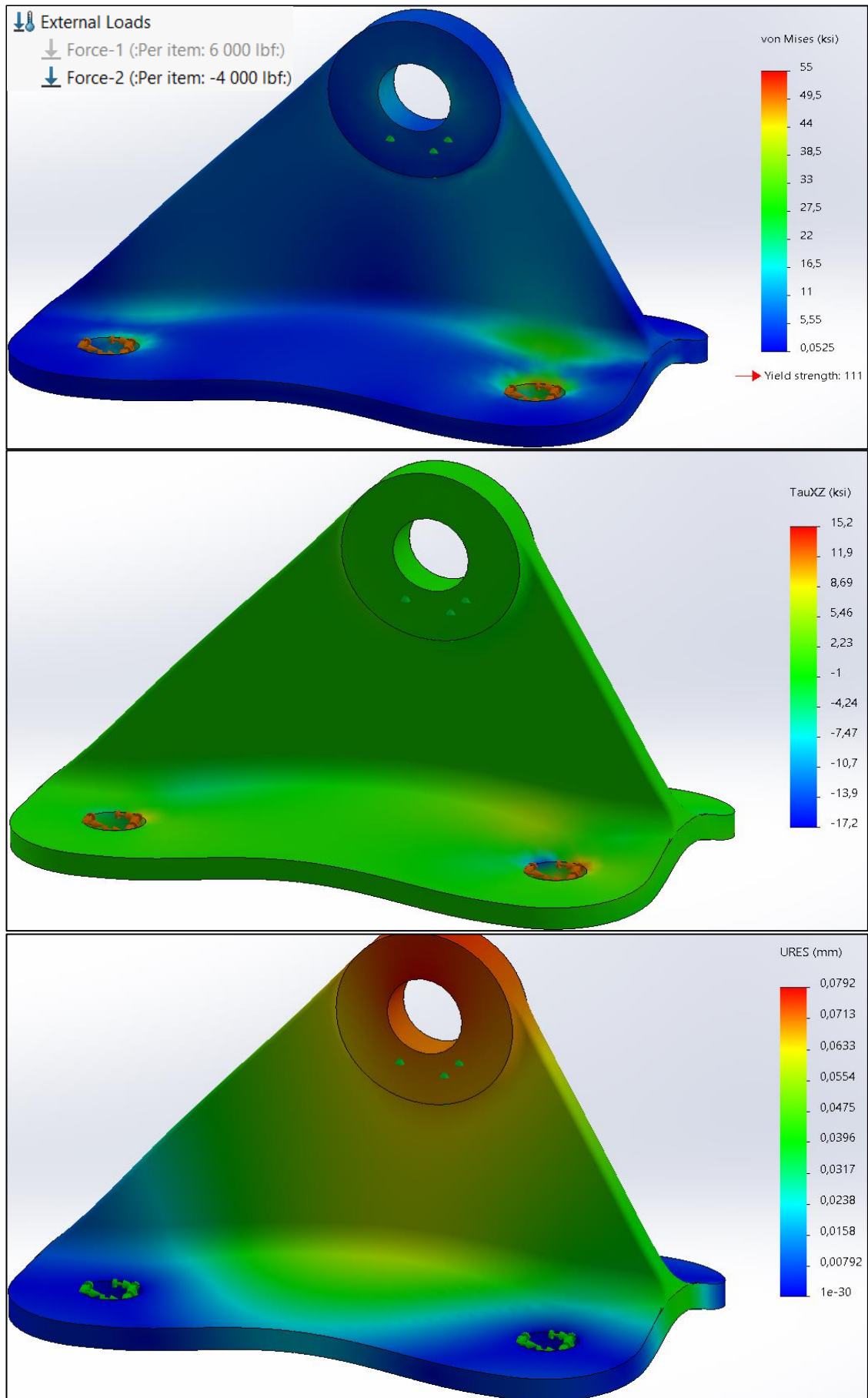


Рисунок 2.6

2.5 Аналіз ремонтного кронштейна

Як було згадано вище, для одиничного виробництва фрезерування є більш доцільним ніж лиття за моделями. Лиття за моделями є надто дорогим для одиничного виробництва та займає багато часу. Рекомендовано виготовити даний кронштейн шляхом фрезерування з суцільної плити або ж екструдованого профіля.

Спершу розробляємо модифіковане креслення для ремонтного кронштейна (*Рисунок 2.7*). Варто зауважити що креслення має містити мінімальну, але достатню кількість вимог до замовника. У ремонтному виробництві не варто ускладнювати вимоги до деталі без необхідності. Наприклад, радіуси між поверхнями формуються під час механічної обробки. Зважаючи на статичну та довговічну міцність варто задавати якомога більші радіуси, але радіуси не мають перетинатися з посадочними поверхнями для болтів. Тому заданий радіус рівний товщині фланця (5 мм). Статичний аналіз обґрунтовує такий радіус, у випадку збільшення радіуса запас міцності лише покращиться, що є допустимим. Отже, в примітках до креслення вказуємо радіус 5 мм як мінімальний допустимий.

Також необхідно звернути увагу що при литті напрям волокон є не контрольованим. В той час як при фрезерування напрям волокон в деталі задається при орієнтуванні заготовки в суцільній плиті. Направ волокон по товщині (ST – short transfer direction) має найгірші механічні та довговічні властивості, тому креслення має обов'язково містити схему орієнтування волокон в заготовці.

Як було вказано в Розділі 2.1, аналізуємо три схеми навантаження для ремонтного кронштейна.

Так як механічні властивості стандартних титанових сплавів в бібліотеці SolidWorks відрізняються від стандарту MMPDS (Таблиця 2.1), вносимо ці дані в бібліотеку самостійно (*Рисунок 2.8*).



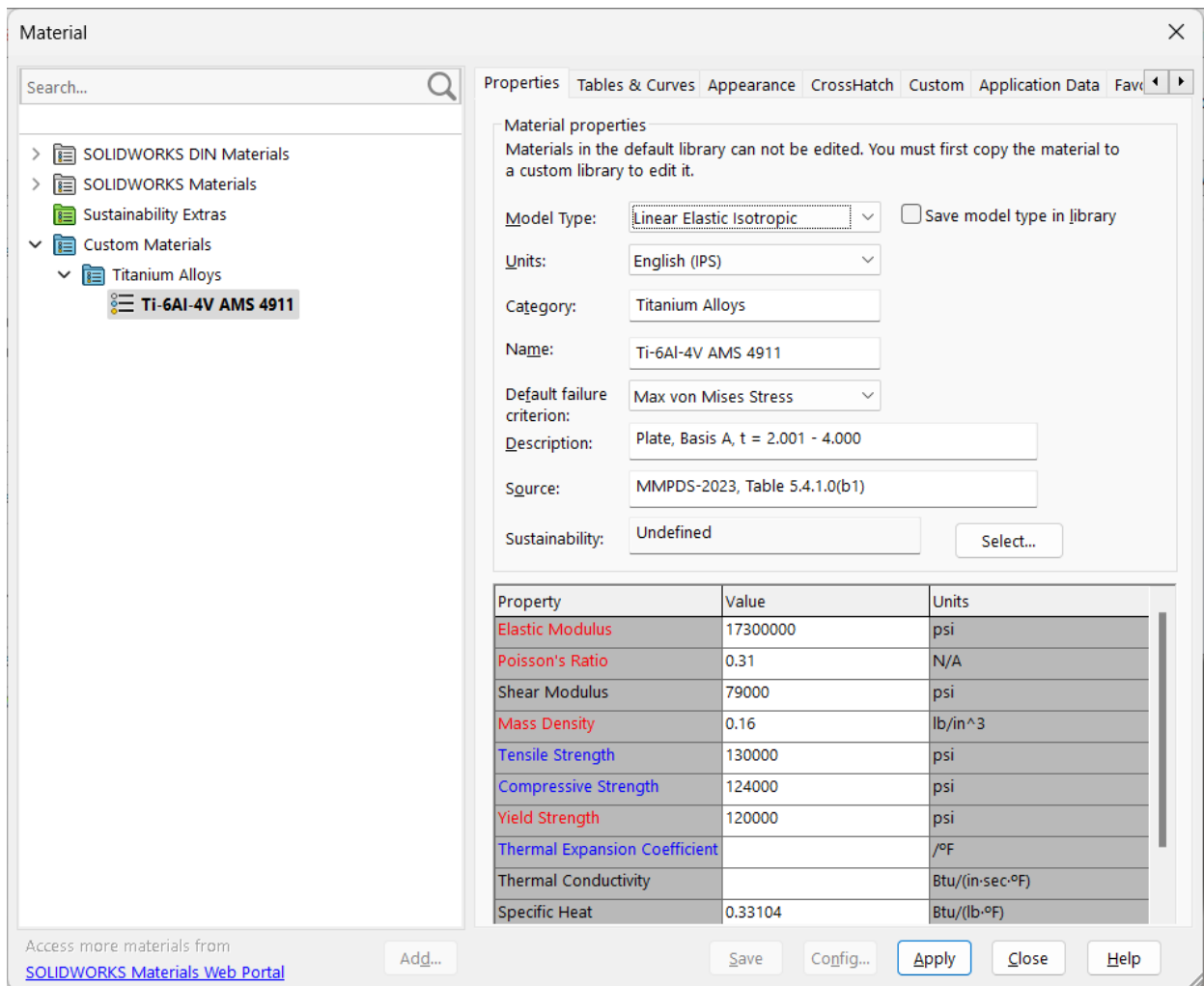


Рисунок 2.8 – Механічні властивості Ti-6Al-4V (AMS 4911)

Нижче наведено аналіз трьох варіантів навантаження, а саме:

- Прикладено горизонтальну та вертикальну силу одночасно (Рисунок 2.9);
- Прикладено лише горизонтальну силу (Рисунок 2.10);
- Прикладено лише вертикальну силі (Рисунок 2.11).

Примітка: Розрахунок запасів міцності та порівняння литого і фрезерованого кронштейна наведено в Таблиця 2.2.

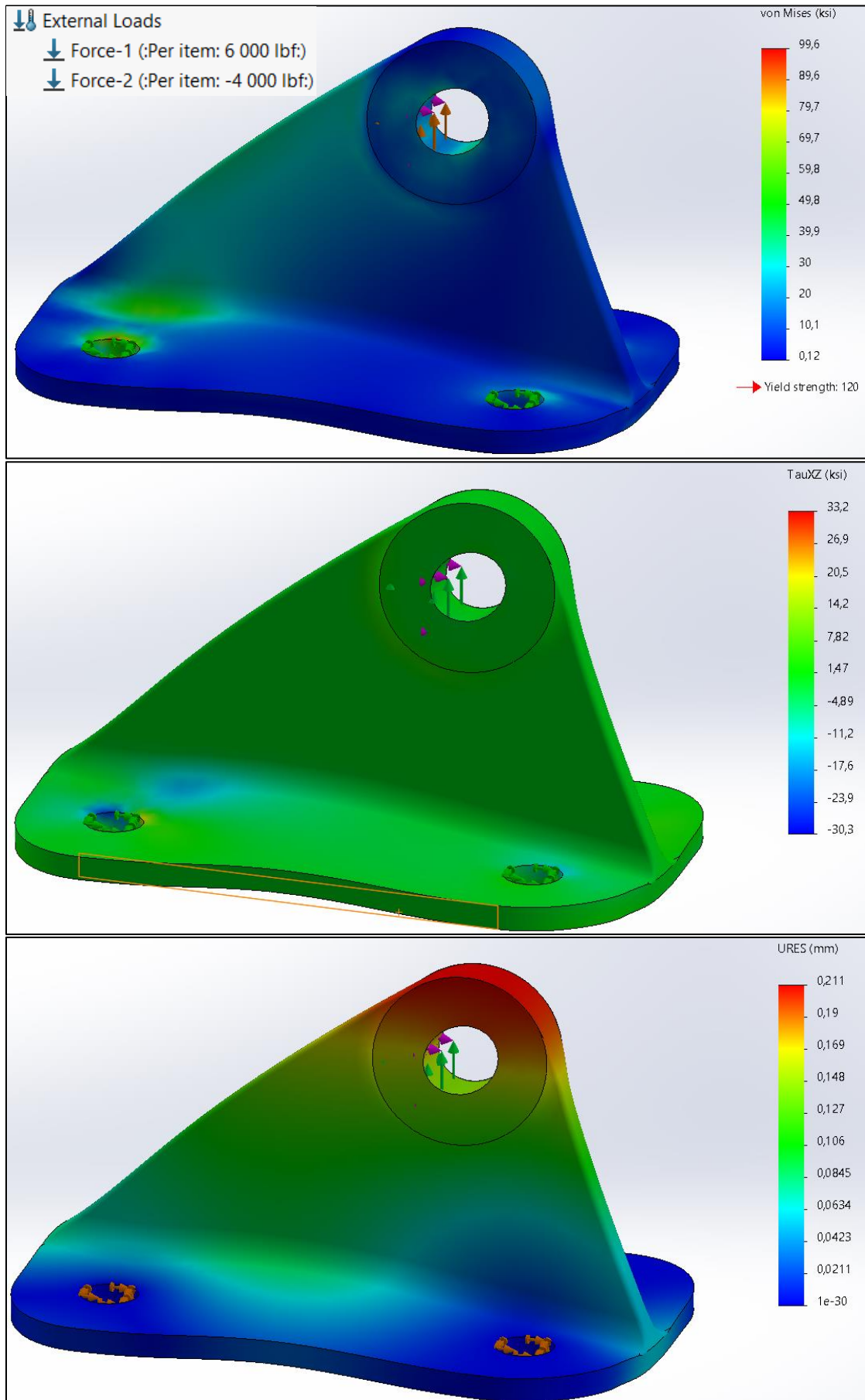


Рисунок 2.9

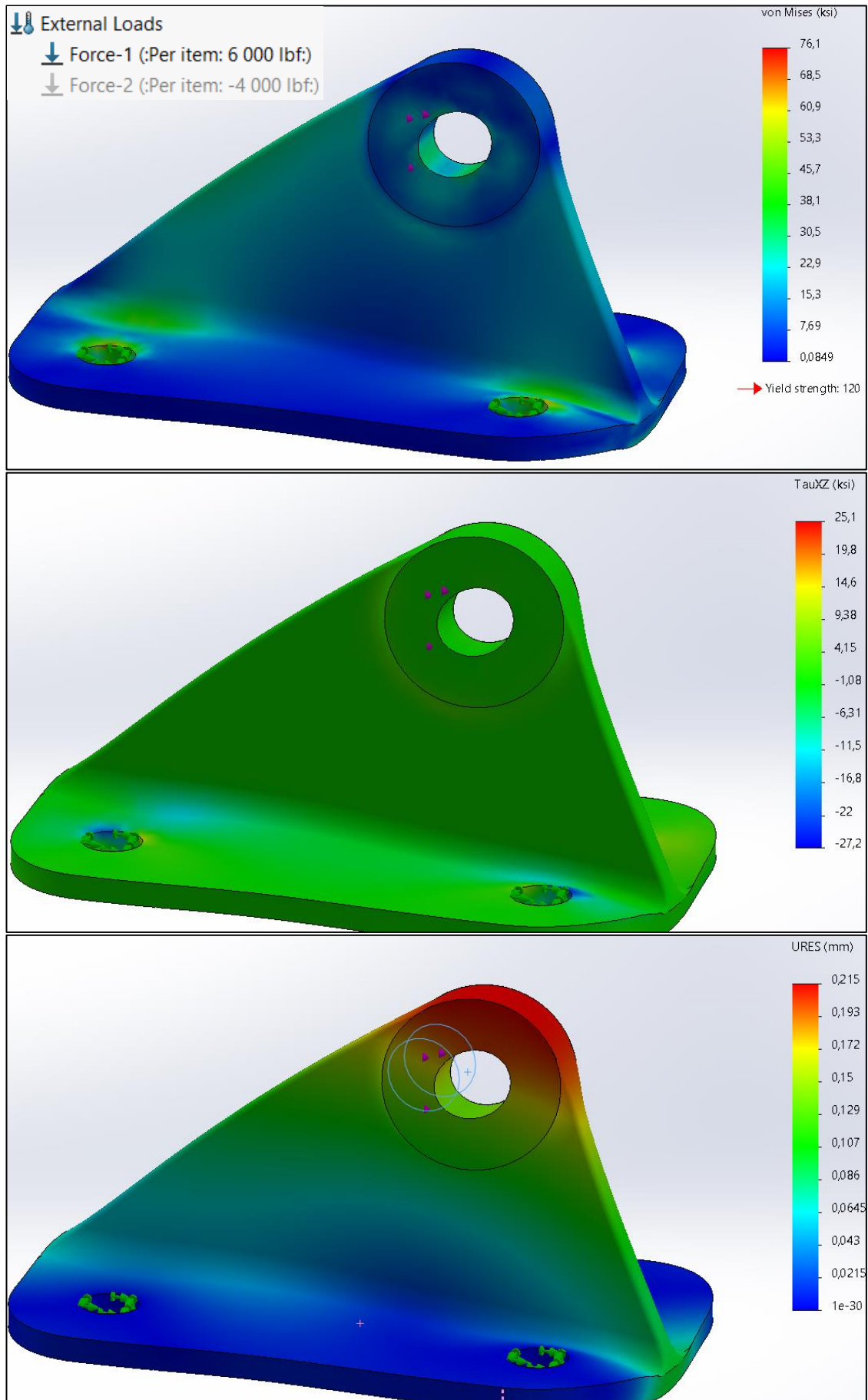


Рисунок 2.10

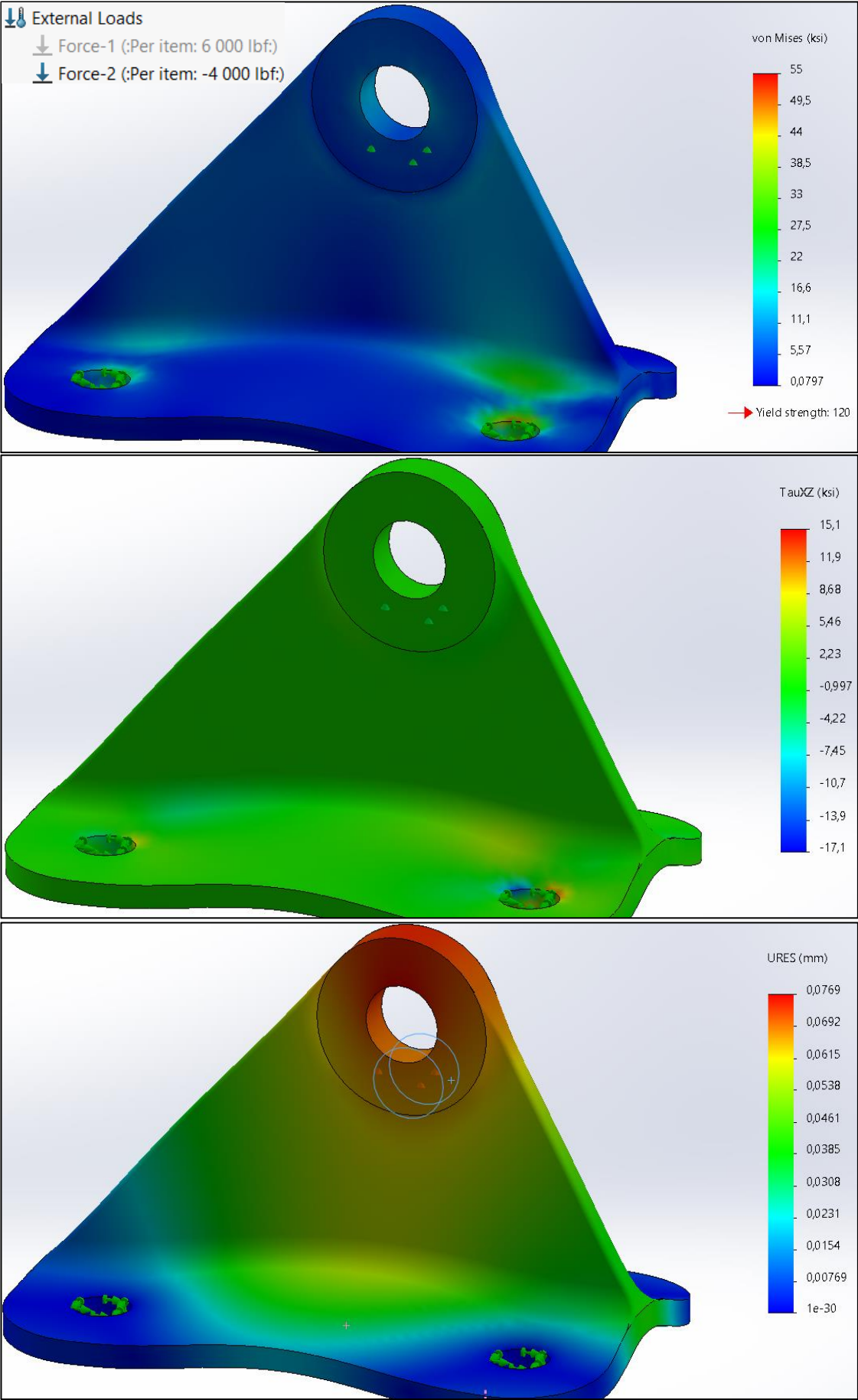


Рисунок 2.11

Таблиця 2.2

Схема навантаження	Δ , мм *	f_t , ksi	F_{ty} , ksi	M.S. _t **	f_s , ksi	F_{su} , ksi	M.S. _s ***
Литий кронштейн							
$P_v = 4\,000\text{ lb}$ $P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,218	100	111	+0,11	33,5	86	+0,71
$P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,221	75,3		+0,47	27,1		+1,11
$P_v = 4\,000\text{ lb}$	0,079	55		+1,02	17,2		+2,33
Фрезерований кронштейн							
$P_v = 4\,000\text{ lb}$ $P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,211	99,6	120	+0,19	33,2	79	+0,59
$P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,215	76,1		+0,56	27,2		+0,94
$P_v = 4\,000\text{ lb}$	0,077	55		+1,16	17,1		+2,08

* Вказано лише максимальні переміщення;

** Запас міцності на розтяг $M.S._t = F_{ty} / f_t - 1$;

*** Запас міцності на зсув $M.S._s = F_{sy} / f_s - 1$; $F_{sy} \approx F_{su} / 1,5$.

2.6 Висновки

Незважаючи на менші максимально допустимі напруження на зсув для плити, в порівнянні з литим матеріалом, всі запаси міцності для фрезерованого кронштейна є позитивними і більшими ніж в кронштейна виготовленим за допомогою лиття. Отже, виготовлення шляхом фрезерування з плити є допустимим.

Доволі важко оцінити економічну складову такої заміни технологічних процесів. Проте, зважаючи що для виготовлення шляхом лиття необхідно сертифікація моделей для лиття, постачальника металу для лиття, інспектування та контроль виготовленого кронштейну, фрезерування є цілком логічним вибором.

Також економічна доцільність такого виробництва може бути доведена шляхом порівняння часу простою літака на період ремонтних робіт. Процес виготовлення моделей для лиття та виробництво литого кронштейна зумовить простій літака протягом декількох місяців, в той час як виробництво та встановлення фрезерованого кронштейна займає не більше декількох днів.

3 ОПТИМІЗАЦІЯ КРОНШТЕЙНА

Розглянемо можливість оптимізації даного кронштейна. Оптимізація має включати зменшення маси кронштейна при збереженні міцності та жорсткості. Запаси міцності мають залишатися позитивними для всіх трьох варіантів навантажень, а допустиме переміщення внаслідок деформацій має бути в межах 1 мм (стандартне допустиме переміщення для другорядної структури).

Для оптимізації маси скористаємося модулем Topology Simulation в програмному забезпеченні SolidWorks.

3.1 Перша ітерація оптимізації

Задаємо фіксацію по чотирьох отворах на горизонтальному фланці, так само як і в статичному аналізі. Навантажуємо кронштейн двома силами одночасно прикладеними до отвору проушини (вертикальний фланець). В якості цілі оптимізації вказуємо найкраще співвідношення маси до жорсткості.

Також необхідно обмежити видалення матеріалу навколо отворів. Зазвичай мінімальна відстань від центру кріпильного отвору до кромки має бути не менше двох діаметрів. При відношенні відстані від центру отвору до кромки менше ніж 1,7 діаметра необхідно проаналізувати отвір на всі розрахункові випадки проушини. Так як поставлене завдання зменшення маси і є модель з діючими напруженнями, то встановлюємо дане співвідношення рівним 1.

При оптимізації однієї деталі важливо зберегти відстані між посадочними отворами для можливості встановлення оптимізованої деталі в наявну зборку. Оптимізований кронштейн має зберігати відстань між 4 отворами на нижньому фланці та 1 отвір на вертикальному отворі.

На Рисунок 3.1 показано зони навколо отворів з яких не можна видаляти матеріал при оптимізації.

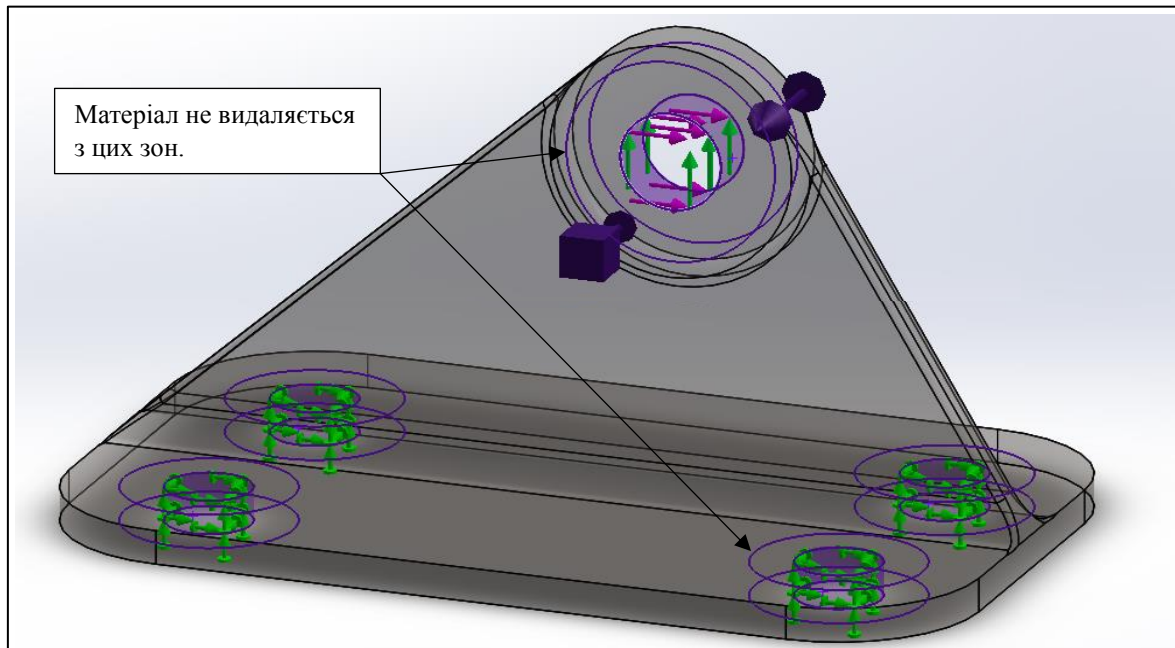


Рисунок 3.1

Готова модель для оптимізації виглядає наступним чином:

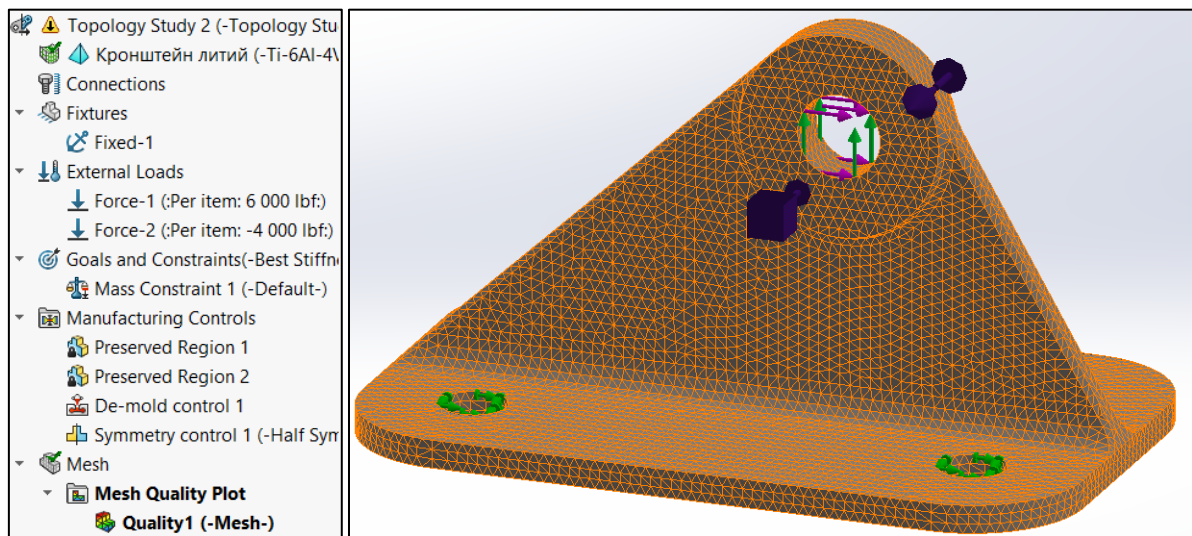


Рисунок 3.2

В пункті Manufacturing Control (Рисунок 3.2) обрано залишити матеріал навколо отворів (дивись Рисунок 3.1), видалення зайвого матеріалу з вертикального фланця і вертикальну площину як вісь симетрії деталі.

Після процесу оптимізації маємо запропоновані зони для видалення матеріалу (Рисунок 3.3).

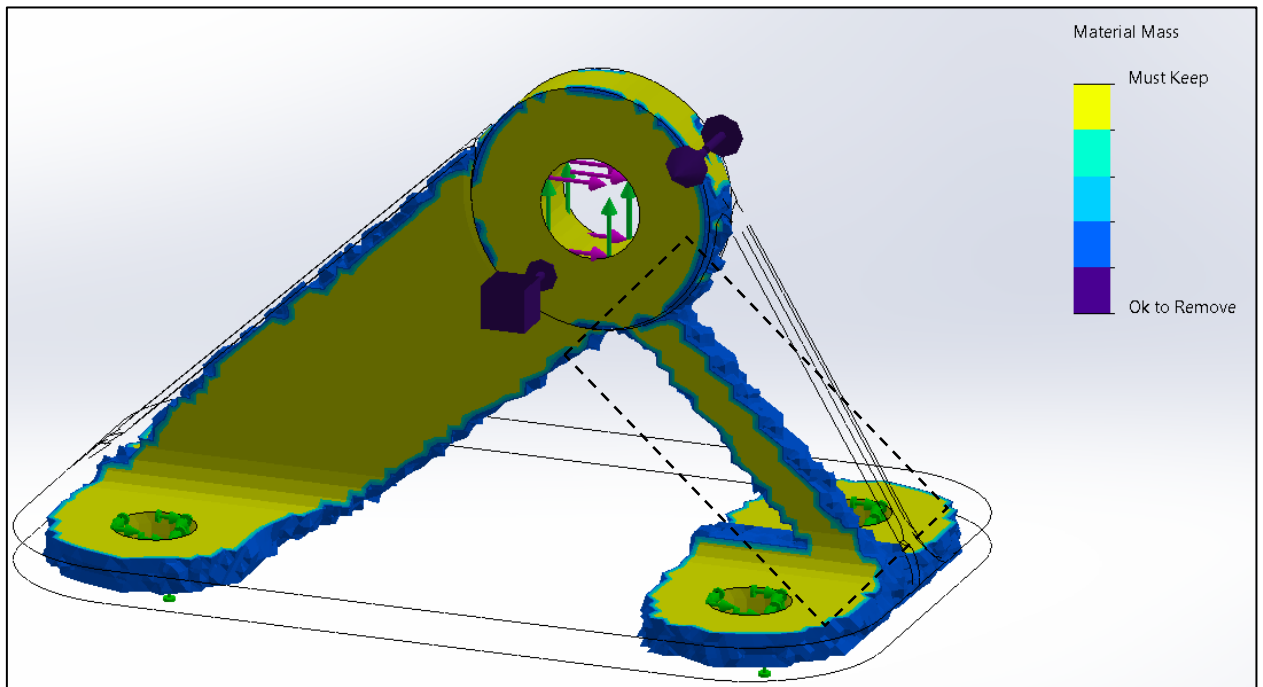


Рисунок 3.3

Зважаючи на те що система враховує лише один випадок навантаження (одночасно діє і вертикальна, і горизонтальні сили), запропонований варіант (Рисунок 3.3) потрібно модифікувати як показано на Рисунок 3.4.

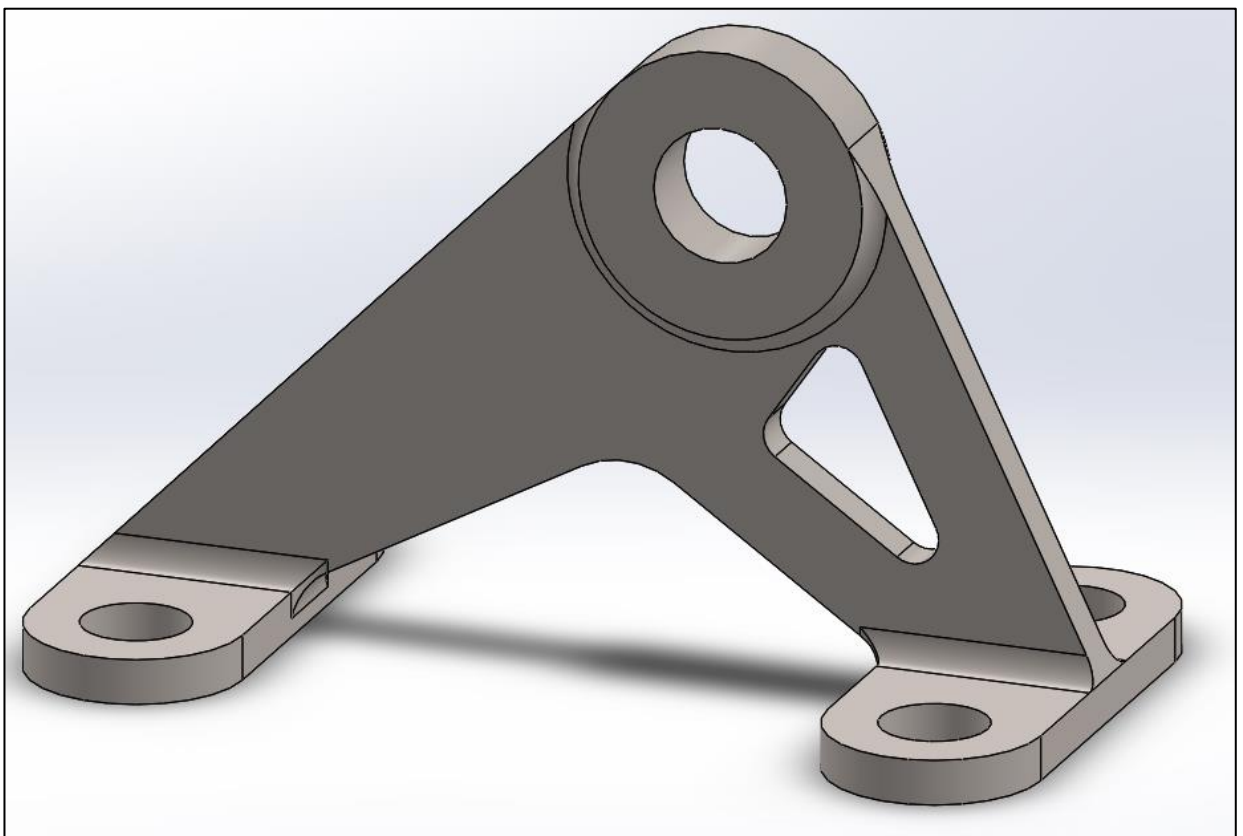


Рисунок 3.4

Так як вертикальна та горизонтальні сили можуть діяти порізно, то у випадку дії лише горизонтальної сили на запропоновану оптимізовану деталь, задня опора втрачає стійкість (дивись Рисунок 3.3, опора що втрачає стійкість обведена чорним штрих пунктиром). Отже, в першому приближенні модифікуємо деталь як показано на Рисунок 3.4 і робимо статичний аналіз повторно (Рисунок 3.5).

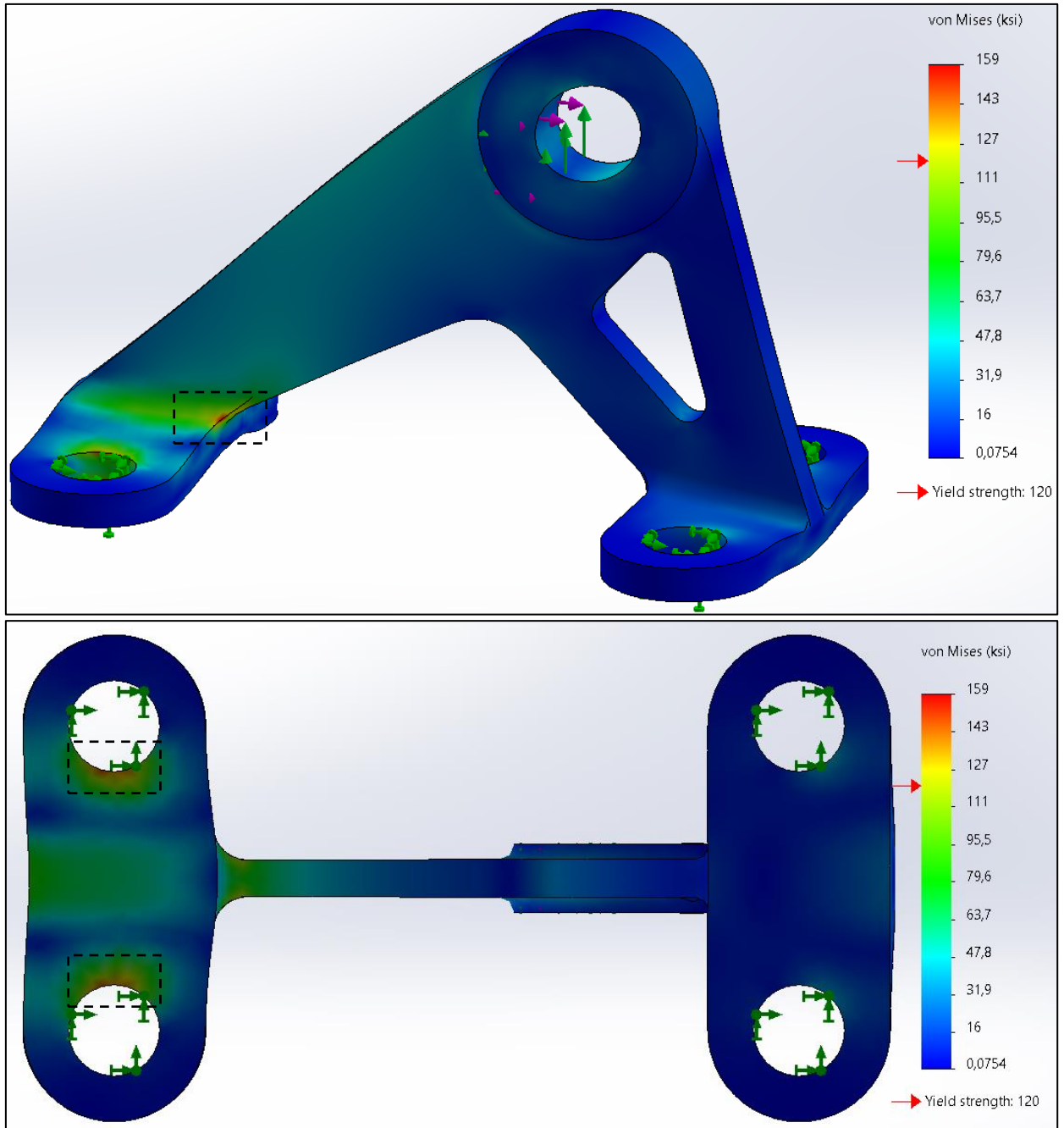


Рисунок 3.5

Максимальні діючі напруження 159 ksi при допустимих напруженнях текучості матеріалу 120 ksi. Аналізуючи розподіл напружень можна зробити висновок лівий фланець з двома отворами має не достатньо жорстке кріплення

до вертикального фланця. Внаслідок деформації фланця діючі напруження перевищують допустимі напруження (напруження текучості) в обведених штрих пунтиром зонах (дивись Рисунок 3.5). Для збільшення жорсткості даного фланця збільшимо його товщину (). Зауважимо, що збільшуємо товщину лише одного фланця, для іншого фланця діючі напруження менше допустимих, тому збільшення жорсткості не потрібно.

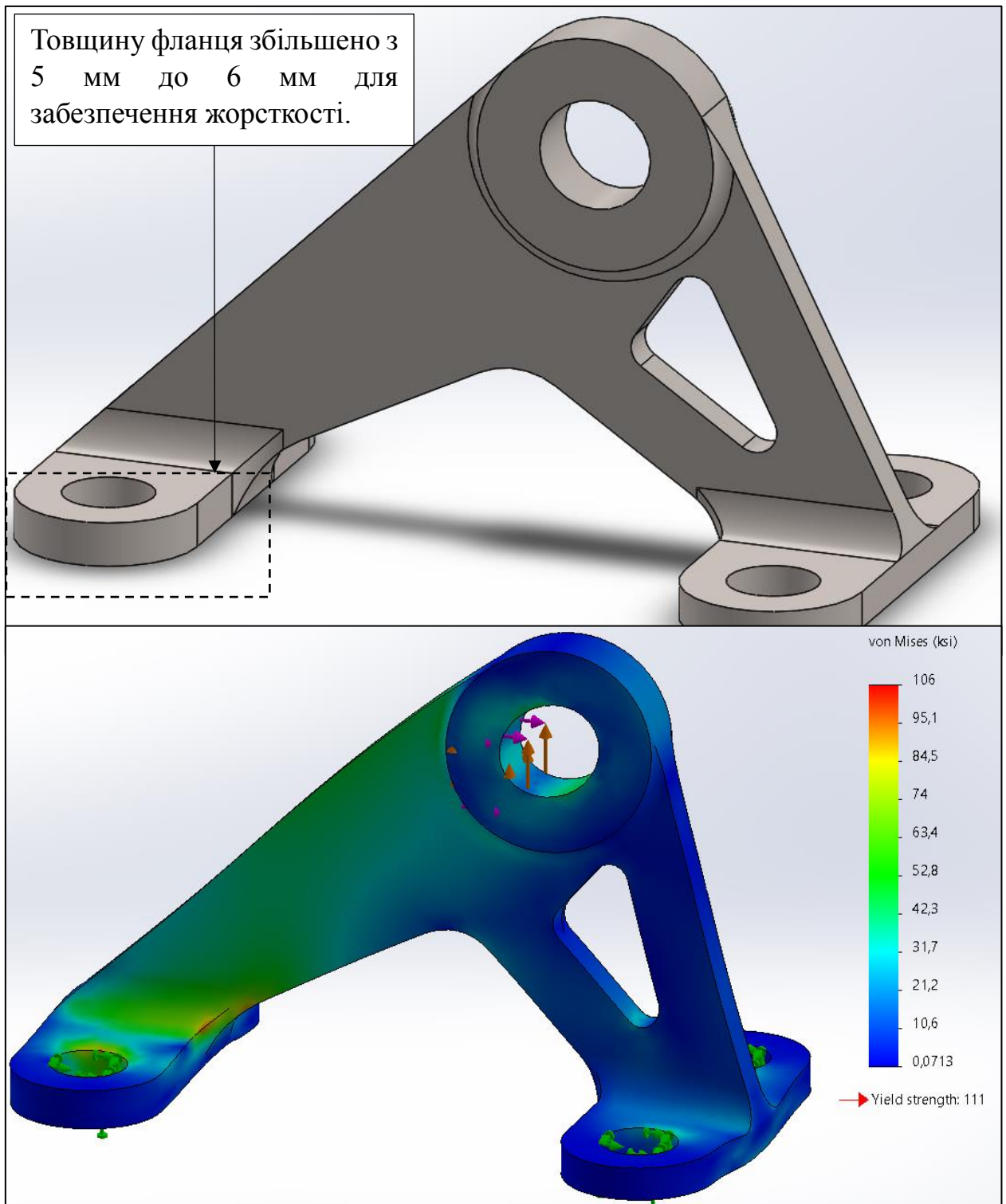


Рисунок 3.6

Як видно з повторного аналізу кронштейна зі збільшеною товщиною (Рисунок 3.6), діючі напруження менші напружень текучості. Отже, запас міцності для такого варіанту кронштейна забезпечений. Потрібно зазначити що збільшення товщини фланця під час оптимізації допустиме, адже під час встановлення кронштейна в оригінальну збірку, 1 мм не впливає на складання в цілому. Проте потрібно бути уважним при збільшенні певних розмірів деталі на значно більші розміри, адже така зміна геометрії може призвести до перетину деталей при складанні. В даному ж випадку збільшення товщину фланця може бути лише причиною необхідності встановлення іншого болта, щоб запобігти наявності нарізі болта в отворі кронштейна.

3.2 Друга ітерація оптимізації

Для зменшення маси робимо ще одну ітерацію оптимізації топології вже для модифікованого кронштейна, в результаті маємо пропозиції видалити матеріал таким чином (Рисунок 3.7):

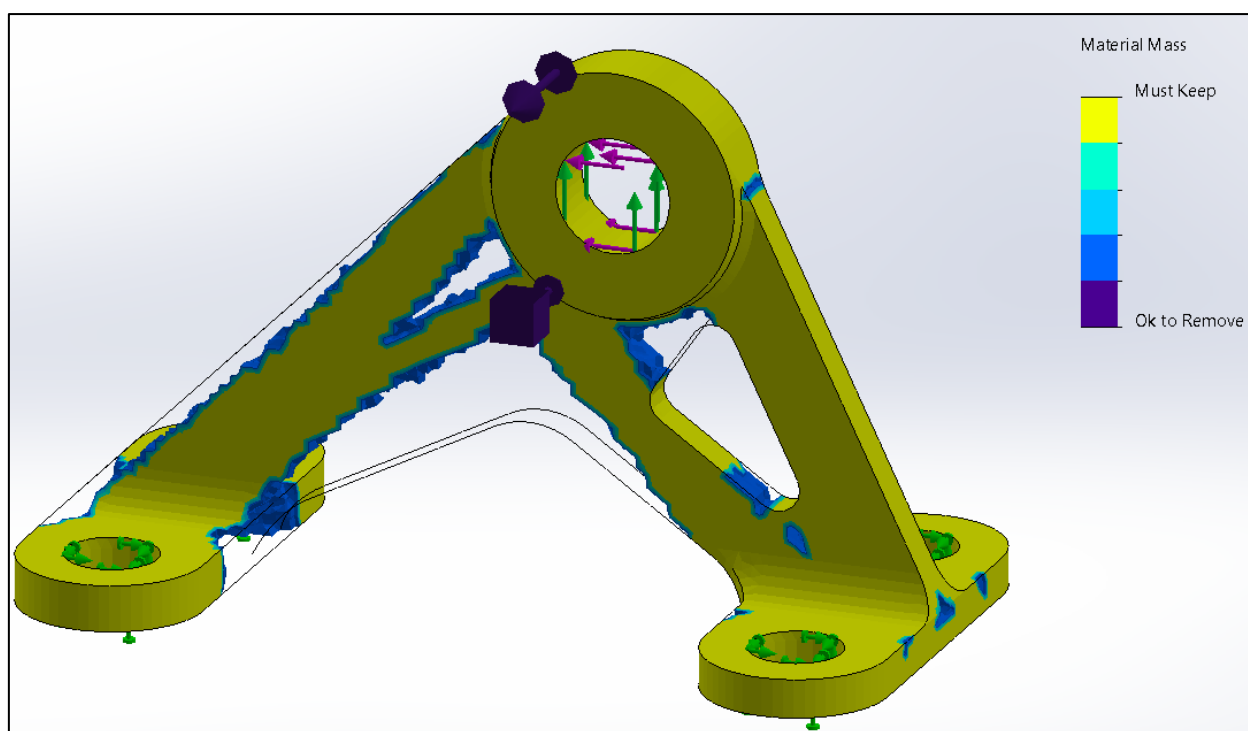


Рисунок 3.7

Модифікуємо кронштейн відповідно до запропонованих змін (Рисунок 3.7) і маємо нову конфігурацію (Рисунок 3.8).

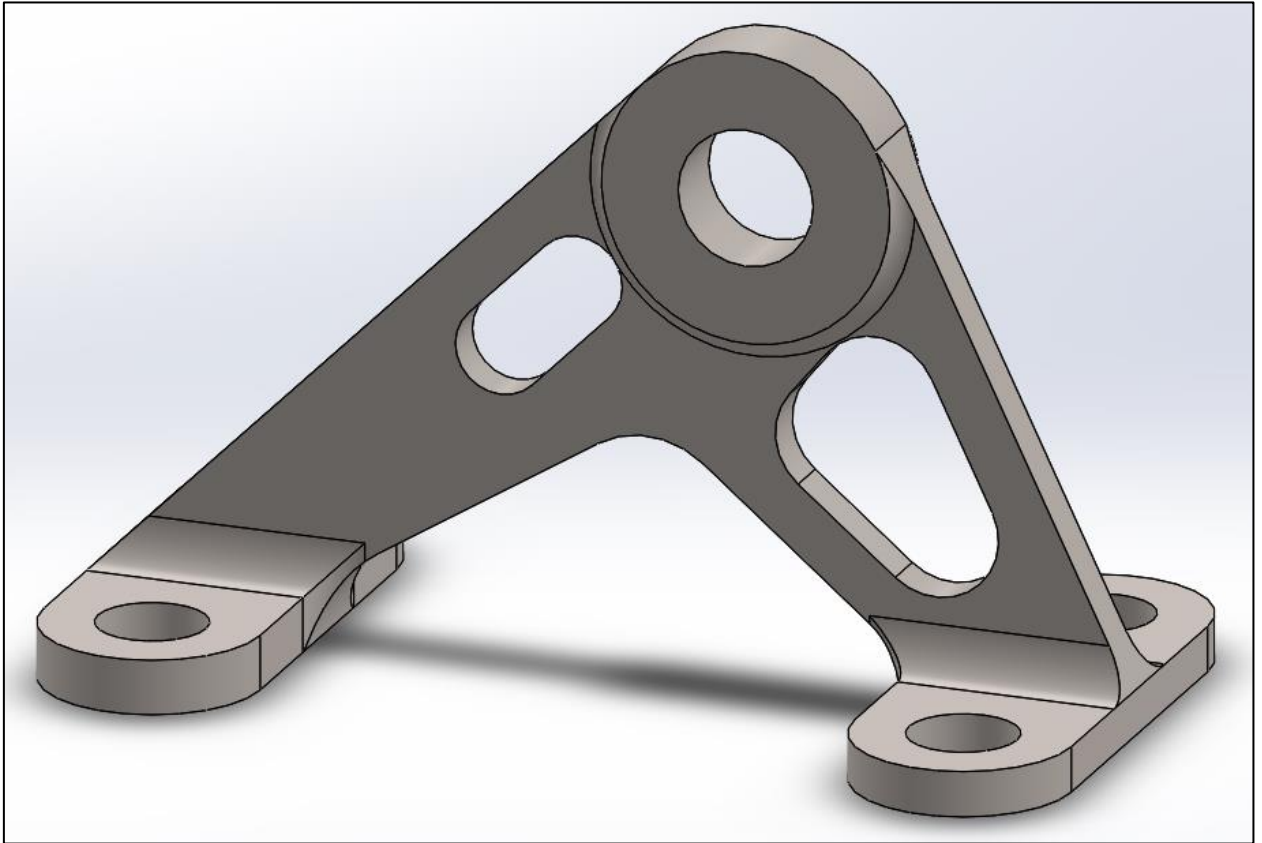


Рисунок 3.8

3.3 Статичний аналіз оптимізованого кронштейна

Оптимізований кронштейн сприймає всі три варіанти навантаження, а саме:

- Прикладено горизонтальну та вертикальну силу одночасно (дивись Рисунок 3.9);
- Прикладено лише горизонтальну силу (дивись Рисунок 3.10);
- Прикладено лише вертикальну силу (дивись Рисунок 3.11).

Примітка: Розрахунок запасів міцності для оптимізованого кронштейна наведено в Таблиця 2.2.

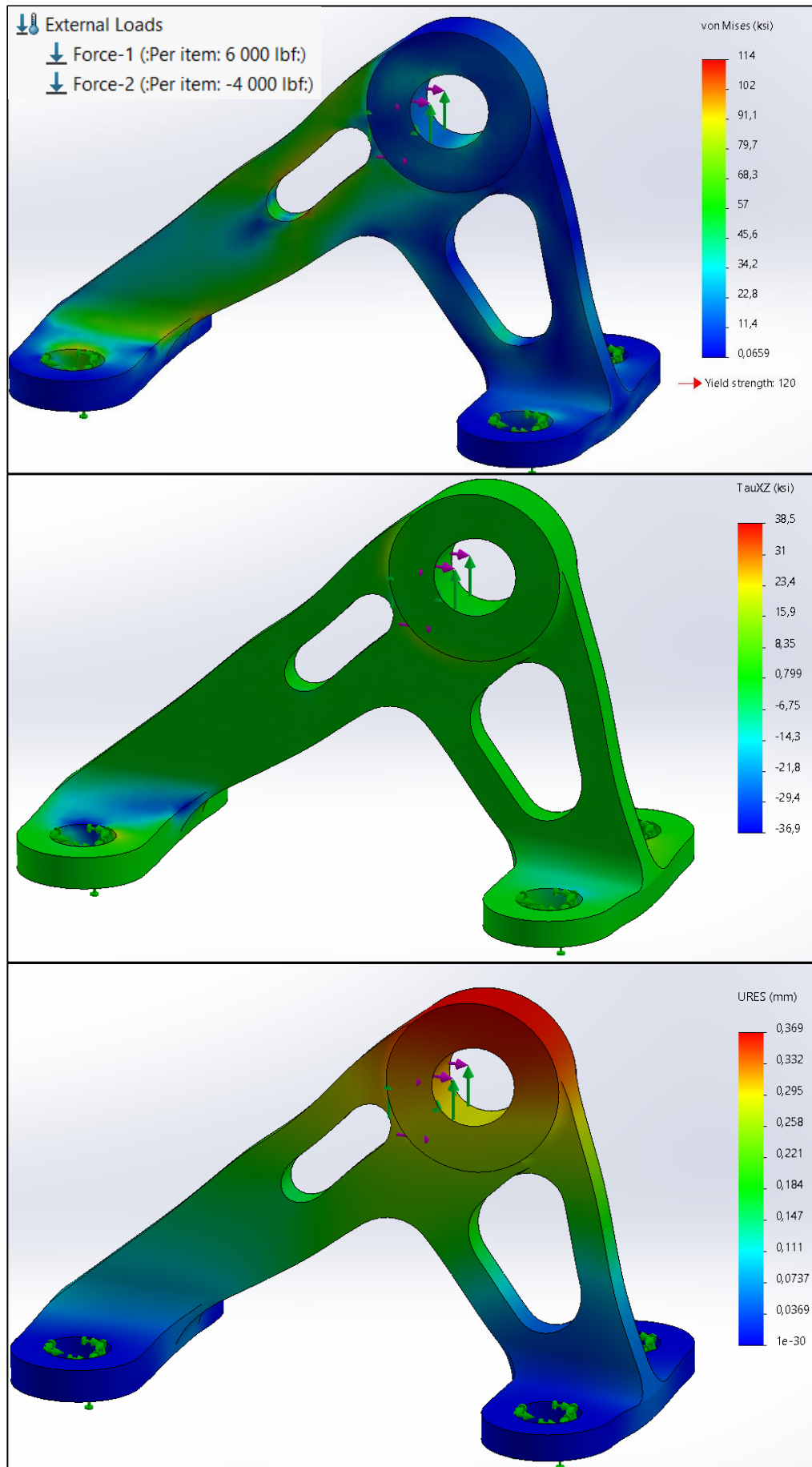


Рисунок 3.9

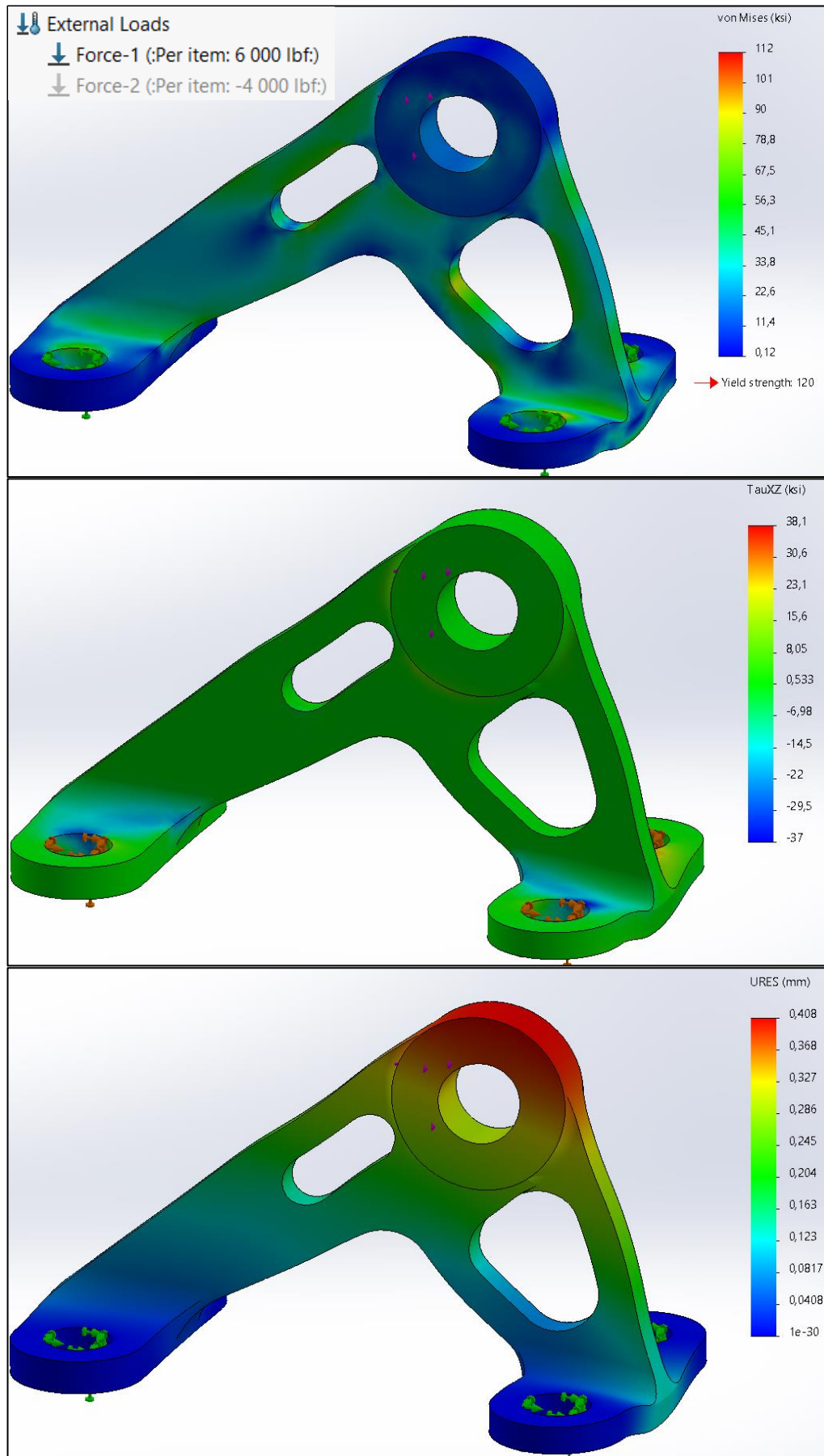


Рисунок 3.10

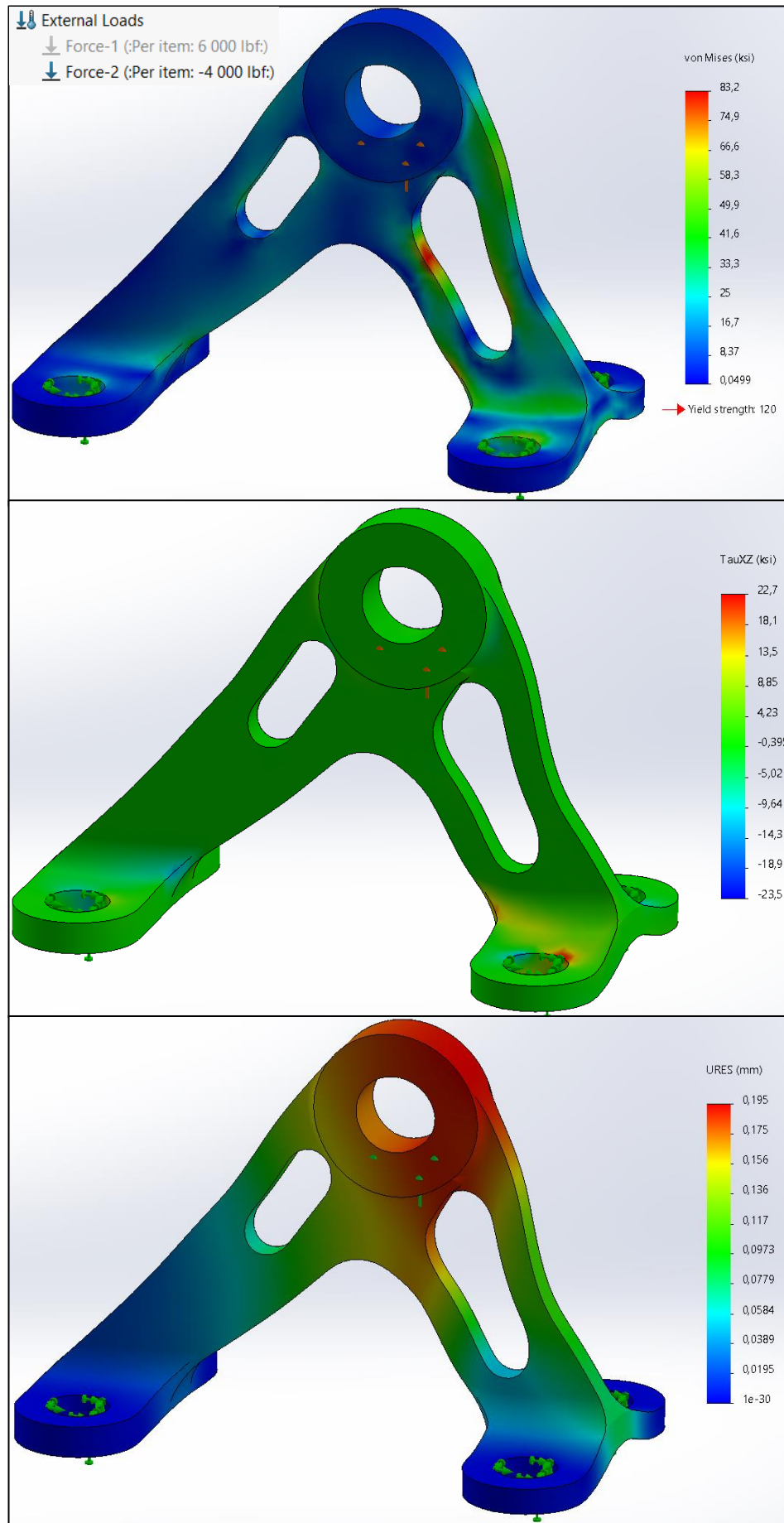


Рисунок 3.11

3.4 Порівняння оригінального та оптимізованого кронштейна

Вносимо дані в Таблиця 3.1 для порівняння.

Таблиця 3.1

Схема навантаження	Δ , мм *	f_t , ksi	F_{ty} , ksi	M.S. _t **	f_s , ksi	F_{su} , ksi	M.S. _s ***
Литий кронштейн							
$P_v = 4\,000\text{ lb}$ $P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,218	100	111	+0,11	33,5	86	+0,71
$P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,221	75,3		+0,47	27,1		+1,11
$P_v = 4\,000\text{ lb}$	0,079	55		+1,02	17,2		+2,33
Оптимізований кронштейн							
$P_v = 4\,000\text{ lb}$ $P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,369	114	120	+0,05	38,5	79	+0,36
$P_h = 6\,000\text{ lb}$	0,408	112		+0,07	38,1		+0,38
$P_v = 4\,000\text{ lb}$	0,195	83,2		+0,44	23,5		+1,24

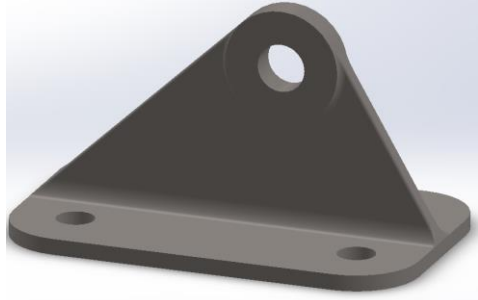
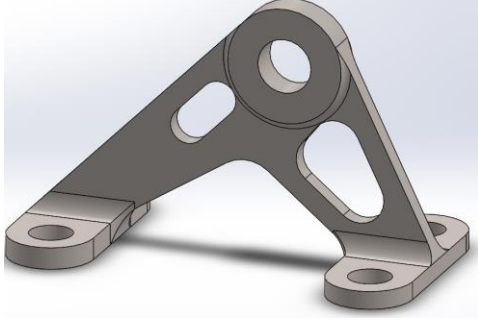
* Вказано лише максимальні переміщення;

** Запас міцності на розтяг $M.S._t = F_{ty} / f_t - 1$;

*** Запас міцності на зсув $M.S._s = F_{sy} / f_s - 1$; $F_{sy} \approx F_{su} / 1,5$.

Вносимо дані в Таблиця 3.2 для порівняння.

Таблиця 3.2

Деталь	Маса, г	Δ_{max} , мм	$M.S._{min}$, %
	340	0,221	11
	131	0,408	5

Отже, маса оптимізованого кронштейна зменшилась на 61%. При цьому збільшилось максимальне переміщення, тобто зменшилась жорсткість деталі. Для другорядної конструкції літака, переміщення менше 1 мм є прийнятним, тобто жорсткість забезпечено.

При оптимізації зборки або ж при допущенні кардинальної зміни геометрії, можна оптимізувати деталь зменшив масу і зберігши жорсткість. Але для цього потрібно знати оточуючу структуру деталі, щоб забезпечити можливість подальшого складання.

Розробляємо креслення оптимізованого кронштейна (Рисунок 3.12). Варто зауважити що даний кронштейн все ще можна виготовити шляхом фрезерування з суцільної заготовки. Використання адитивного виробництва було б більш економним з точки зору витрати матеріалу, але для адитивного виробництва недостатньо наявних механічних властивостей друкованого матеріалу. Тому адитивне виробництво не може бути використане без доказового аналізу забезпечення міцності.

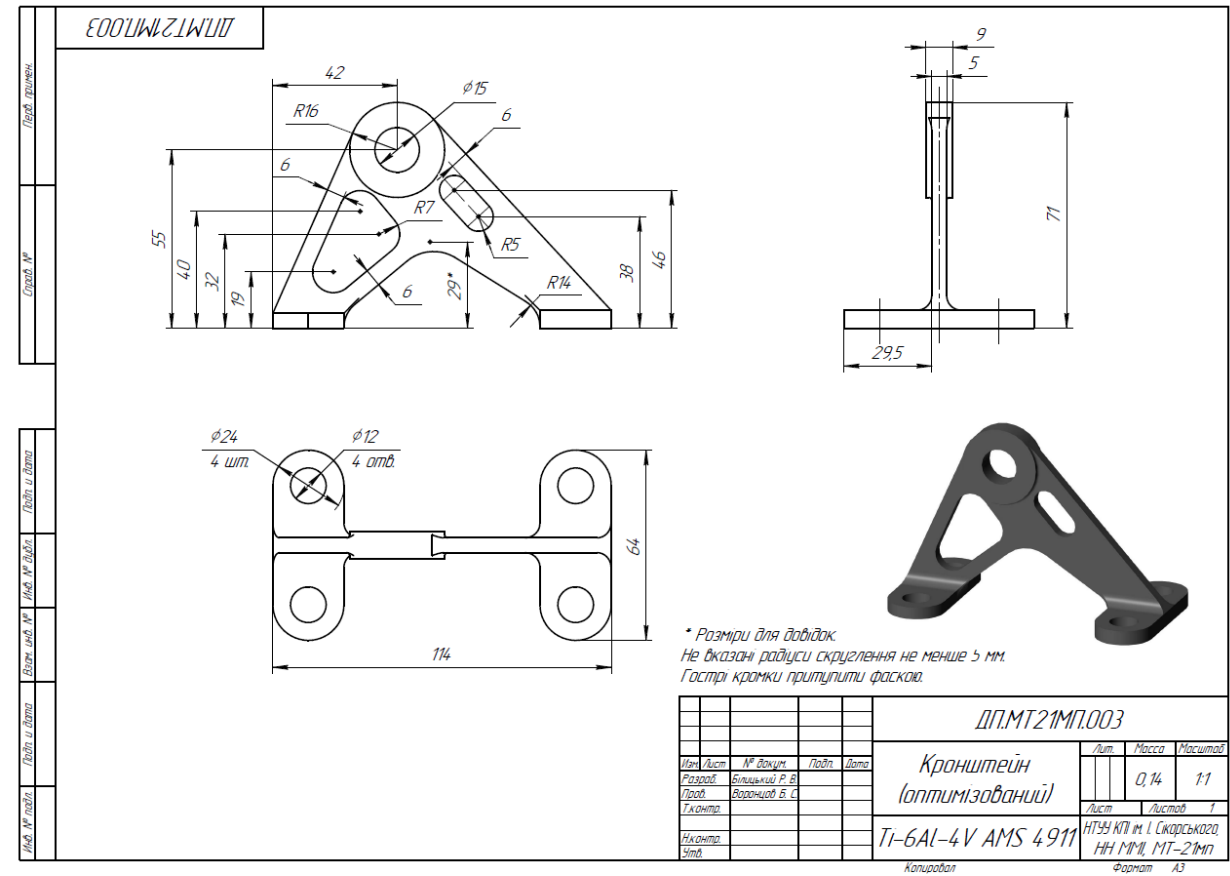


Рисунок 3.12

3.5 Висновки до розділу

Розроблена оптимізована деталь має масу на 61% менше ніж оригінальна деталь. Цей факт є яскравим свідченням широких перспектив оптимізації геометрії. Проте щоб досягти максимальних переваг в оптимізації потрібно використання адитивних технологій для виготовлення деталей. Водночас немає загальнодоступних механічних властивостей адитивно виготовлених матеріалів, щоб можна було оцінити деталь на міцність.

Згідно [4], механічні властивості для друкованих металів зараз в процесі дослідження і будуть опубліковані в другому розділі MMPDS [6]. Поява загальнодоступних механічних властивостей дасть змогу оцінювати на міцність адитивно виготовлені деталі, що в свою чергу надає можливість скористатися перевагами адитивного виробництва сповна.

4 СТАРТАП ПРОЕКТ

Протягом останніх десятиліть набуває поширень виникнення десятків стартапів, розвиток яких залежить від залучення інвестицій. Стартапи набули поширення разом із розвитком інтернету. Адже саме інтернет є ключовим інструментом комунікації, пошуку партнерів, інвесторів і просто зацікавлених сторін. Роль інтернету в сучасному світі, без перебільшення, величезна.

Результатом кожної магістерської дисертації, окрім наукових розробок, має бути стартап проект. Наявність стартап проекту є ознакою актуальності роботи і затребуваності ідеї на ринку.

Хоча стартапи і набули великої популярності в світі і залучають інвесторів, більшість стартапів не досягають успіху. Сучасні стартапи пов'язані з розвитком технологій, які мають потенціал стати бізнесами з великим капіталом. Інвестиції в стартапи є дуже ризикованими, але при цьому частка прибутку, в разі успіху, незрівнянно вище ніж в традиційних шляхах інвестування.

Для того щоб стартап досягнув успіху необхідно знайти актуальну потребу ринку і розробити рішення чи продукт для задоволення потреб ринку. Для реалізації стартап проекту доцільно, для початку, розробити прототип продукту і запропонувати це ринку. Саме розробка мінімально життєздатного продукту буде головним показником чи дійсно ця розробка актуальна і стартап має шанси на успіх.

В той час як для інвесторів рекомендується інвестувати в проекти в галузі яких вони розуміються, для розробників рекомендовано розробляти проекти в галузі, в якій вони є фахівцями. Також залучення і консультація з потенційними споживачами під час розробки проекту є гарною ідеєю.

4.1 Опис ідеї проекту

На даний момент існує складність швидко обрати оптимальний технологічний процес виготовлення для певного продукту. Необхідно розробити програмне забезпечення яке буде аналізувати розроблену тривимірну модель і обирати оптимальний технологічний процес виготовлення.

Це можна організувати у вигляді окремого програмного продукту або ж як модуль до наявних програм тривимірного моделювання.

Програма має включати в себе можливість оптимізації геометрії методами топології, а також видозмінювати геометрію зважаючи на технологічний процес. На даний момент деталь проектується зважаючи на подальший метод виробництва. Під час зміни методу виробництва доцільно дещо видозмінювати геометрію. Наприклад, деталь спроектована для процесу лиття включає ухили та радіуси для забезпечення процесу лиття, при виробництві даної деталі шляхом фрезерування, доцільно змінити радіуси відповідно до використовуваного інструменту.

Більшість деталей було спроектовано для традиційних методів виготовлення. Зазвичай такі деталі не є оптимальним з точки зору маси. Велика кількість матеріалу включена в геометрію деталі лише з причини технологічності виготовлення, а з точки зору міцності чи жорсткості цей матеріал не потрібний.

Отже, потрібно програмне забезпечення яке буде в змозі оптимізувати геометрію, зважаючи на статичну та довговічну міцність. Обирати технологічний процес виготовлення зважаючи на економічну доцільність. При цьому економічна доцільність має визначатись не лише вартістю виробництва, а також вартістю експлуатації та обслуговування.

Таблиця 4.1 – Структуровані дані про ідею стартап проекту

1. Короткий опис	Розробка програмного забезпечення здатного обирати оптимальний технологічний процес виробництва. При цьому необхідно зважати не лише на економічну складову виробництва, а також на вартість подальшої експлуатації та виробництва.
2. Термін реалізації проекту	1 рік на розробку мінімально життєздатного продукту, який здатний порівнювати декілька технологічних процесів. 2 роки для розробки та впровадження коригування в кінцевий продукт.
3. Необхідні ресурси	Широке дослідження наявних напрацювань в цій темі. Залучення команди спеціалістів для розробки програмного забезпечення. Залучення інженерів для консультації стосовно можливостей та специфіки певних технологічних процесів.
4. Опис проблеми, яку вирішує проект	Автоматизований вибір оптимального, економічно доцільного технологічного процесу.

5. Головні цілі та завдання проекту	Створення програмного забезпечення. Популяризація продукту на ринку. Розробка модифікація та технічна підтримка споживачів.
6. Очікуванні результати	Отримання унікального програмного забезпечення для проектування деталей та вибору оптимального технологічного процесу.

В Таблиця 4.2 визначено зміст ідеї, потенційних споживачів та переваги використання запропонованого програмного забезпечення (ПЗ).

Таблиця 4.2 – Опис ідеї стартап проекту

Зміст ідеї	Потенційні споживачі	Переваги застосування запропонованого ПЗ
Програмне забезпечення здатне обирати оптимальний економічно доцільний технологічний процес виробництва.	1. Міжнародні корпорації, які в пошуках шляхів оптимізації. 2. Компанії що надають інжинірингові послуги. 3. Технічні заклади освіти та дослідницькі установи	Швидкість проектування. Оптимальний технологічний процес виробництва. Економічна перевага над конкурентами.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Аудит ідеї проекту необхідний для розуміння цілей, завдань та їх обсягу для реалізації проекту. В межах даного розділу необхідно проаналізувати основних споживачів та їх очікування.

Перш за все потрібно розглянути технічну складову проекту, а саме за допомогою яких методів можна реалізувати ідею проекту.

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність проекту

Складові необхідні для реалізації проекту	Наявність технології та необхідність доопрацювання	Доступність технології
1. Розробка тривимірної моделі	Наявні, не потребують доопрацювання	Доступні для особистого користування, необхідно ліцензія для комерційного використання.
2. Оптимізація деталі	Наявні, потребують доопрацювання. Наявні системи оптимізації не завжди пропонують технічно реалізуємі рішення. Також не можливо оптимізація деталі зважаючи на можливі варіанти навантаження. Наявні системи оптимізують деталь лише для одного варіанту навантаження, в той	Доступні для особистого користування, необхідно ліцензія для комерційного використання.

	час як оптимізована деталь таким чином є неефективною для іншого варіанту навантаження. Отже, необхідно доопрацювання оптимізації для врахування різних варіантів навантаження, а також	
3. Статичний аналіз	Наявні, переважно не потребують доопрацювання. Доопрацювання необхідні лише у випадку необхідності врахування різних механічних властивостей матеріалу в кожному з напрямів.	Доступні для особистого користування, необхідно ліцензія для комерційного використання.
4. Вибір технологічного процесу	Потребують створення.	Доступні.
5. Аналіз економічної доцільності	Наявні частково, потребують значного доопрацювання.	Доступні.
6. Порівняння технологічних процесів.	Наявні у вигляді порівняльних таблиць, але потребують створення у вигляді ПЗ.	Доступні.

Проаналізувавши Таблиця 4.3, можна стверджувати, що ідея проекту може бути реалізована, але для цього потрібно витрати багато часу та ресурсів.

Перші перераховані три складових проекту (дивись Таблиця 4.3) можна реалізувати з використанням наявних програмних рішень. Тобто розроблене програмне забезпечення може використовувати наявні програми для вирішення початкових складових. При цьому потрібно зважати, що потрібно мати ліцензію для комерціалізації проекту.

Водночас, основні складові даного проекту, а саме пункти 4-6 (дивись Таблиця 4.3), доволі важко реалізувати, але можливо. Процес вибору методу виробництва важко формалізувати і оформити у вигляді автоматизованого програмного забезпечення.

Розробку програмного забезпечення потрібно розпочинати у вигляді прототипу, який містить порівняння лише декількох технологічних процесів. Необхідно максимально автоматизувати ці декілька технологічних процесів, протестувати працездатність ПЗ та адекватність результатів, і лише після цього добавляти інші можливі технологічні процеси.

До ПЗ потрібно включити функцію автоматичного зчитування механічних властивостей матеріалу із затверджених стандартів, наприклад як MMPDS-2023 (дивись 6). Необхідно підтримувати ці дані актуальними, оновлювати згідно кожної ревізії стандарту.

Для визначення економічної складової необхідно зібрати статистичні дані, щоб оцінити відносну вартість того чи іншого процесу. Більше того, ці дані також потрібно підтримувати актуальним, так як відносна вартість частково теж змінюється. Наприклад, донедавна адитивне виробництво було дорогим і не поширеним, зараз ж адитивні технології все більше впроваджують у всі галузі промисловості. Як наслідок відносна вартість адитивного виробництва зменшується.

Стосовно інших складових економічного аспекту, таких як вартість інструменту чи матеріалу, потрібно теж надати можливість редагувати ці дані, або ж тримати їх актуальними завдяки постійним оновленням бібліотек.

Реалізуювши всі вище згадані можливості, у вигляді ПЗ, можна стверджувати, що ідея проекту є успішною. Але зважаючи на складність формалізації даної задачі, можна дійти висновку, що таке ПЗ можливо реалізувати лише частково. Для початку це буде прототип з декількома технологічними процесами, який поступово буде вдосконалюватися і модифікуватися згідно потреб споживачів. І лише через тривалий проміжок часу можна розробити дійсно необхідне ПЗ.

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Аналіз ринкових можливостей є одним з ключових етапів у розробці стартап проекту. Цей аналіз необхідний для визначення перспектив ринку та дозволяє розробити ефективну стратегію входу та поведіння на ринку, реакцію на виклики ринку та дії конкурентів.

На даному етапі важливо проаналізувати наявну конкуренцію та визначити попит. Аналіз попиту взаємопов'язаний із ринковими трендами, тому потрібно зрозуміти чи доцільне розроблення даного продукту в цей час чи можливо ринок потребує іншого і краще розробляти нагальні потреби.

Необхідно зрозуміти хто конкурент, сильні та слабкі сторони, зрозуміти в чому власна перевага і розробити стратегію для подолання конкуренції та мінімізації ризиків.

Аналіз ринкових можливостей дає змогу зменшити ризики та зрозуміти переваги власного продукту. Ретельне вивчення ринку є необхідним для успішної реалізації проекту. Потрібно пам'ятати, більшість стартап-проектів не виходять на ринок, тому планування стратегії один із кроків до успіху.

Таблиця 4.4 – Попередня характеристика потенційного ринку

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1.	Кількість головних гравців	До 10
2.	Загальний обсяг продаж, грн / ум. од. (1 рік / 2 рік / 3 рік)	100 000 / 500 000 / 10 000 000
3.	Динаміка ринку	Зростає
4.	Наявність обмежень для входу	Висока конкуренція, високі витрати на вхід
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	Високі, обов'язкові сертифікати якості
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	15

Проведений аналіз можливостей ринку (дивись Таблиця 4.4) є приводом стверджувати, що ринок програмного забезпечення для інженерії динамічно розвивається. Існує попит на запропоноване програмне забезпечення, проте існує висока конкуренція з основними розробниками програм тривимірного моделювання. Попит полегшить вихід на ринок, а висока конкуренція є приводом для розроблення унікального ПЗ.

Визначаємо потенційні групи клієнтів, їх характеристики та вимоги щодо продукту (Таблиця 4.5).

Таблиця 4.5 – Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Програмне забезпечення здатне обирати оптимальний економічно доцільний технологічний процес виробництва.	Boeing, Airbus, General Dynamics, Northrop Grumman ...	Інтуїтивність та простота інтерфейсу. Прибутковість.	Відповідність стандартам. Надійність, постійна технічна підтримка. Економічно обґрунтована вартість продукту.

Таким чином, потенційним користувачем запропонованого програмного забезпечення є топ підприємств авіакосмічної промисловості. Саме в цій галузі активно впроваджується оптимізація і зростає конкуренція. В майбутньому серед потенційних споживачів є виробники зі сфери машинобудування та приладобудування.

Під час виходу нового ПЗ можливі певні труднощі (У Таблиця 4.6 *перераховано фактори загроз на які слід звернути увагу, щоб зменшити їх негативний вплив на якість послуг що надаються.*

У Таблиця 4.7 переховано можливі реакції компанії на загрози.

Таблиця 4.6). Для швидкого реагування та формування іміджу на ринку, необхідно мати кваліфікований персонал, який вчасно буде реагувати на проблеми та питання користувачів.

У Таблиця 4.6 перераховано фактори загроз на які слід звернути увагу, щоб зменшити їх негативний вплив на якість послуг що надаються.

У Таблиця 4.7 переховано можливі реакції компанії на загрози.

Таблиця 4.6 – Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Конкуренти	Реалізація конкурентами похожого ПЗ	Моніторинг ринку, оновлення власного ПЗ, підтримка унікальності.
2.	Програмна поломка	Збій під час користування ПЗ	Служба підтримки клієнтів, дистанційна підтримка.
3.	Проблеми в користуванні ПЗ	Труднощі у використанні певних функцій ПЗ	Розроблення детальних інструкцій користування. Надання прикладів використання ПЗ.

Таблиця 4.7 – Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Універсальність	Використання продукту у різних галузях промисловості	Розробка універсального ПЗ, можливість підключати стандарти з різних галузей промисловості.

2.	Покращення	Розроблення нових модулів та додавання нових можливостей до вже наявних.	Залучення більшої кількості фахівців для розроблення ПЗ та інженерів для консультативних послуг.
----	------------	--	--

Проводимо ступеневий аналіз конкуренції на ринку (Таблиця 4.8). Після цього аналізуємо конкурентне середовище ринку (Таблиця 4.9).

Таблиця 4.8 – Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії)
1. Олігополія	Конкуренція з наявними розробниками інженерного ПЗ	Створення унікального ПЗ
2. Національний	Значна конкуренція присутня лише на міжнародному рівні	Нижча ціна, система дистанційної підтримки
3. Товарно-видова	Конкуренція з аналогічним (похожим) ПЗ	Реклама, унікальні функції
4. Внутрішньогалузева	Конкуренти не мають розробленого такого ж ПЗ	Залучення фахівців та розробка нових технологій
5. Цінова	Доцільна цінова політика	Зниження ціни при виході на ринку, залучення нових клієнтів.

6. Марочна	Реєстрація бренду та формування іміджу	Реклама ПЗ
------------	--	------------

Таблиця 4.9 – Аналіз конкуренції за М. Портером

	Конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товари-замінники
Складові аналізу	Catia SolidWorks Autodesk	Компанії самостійно, без дистриб'юторів.	Провідні промислові підприємства є клієнтами конкурентів.	Деяке ПЗ має частково реалізовані функції запропонованого ПЗ.
Висновки	На ринку присутня олігополія, для конкуренції потрібно дійсно унікальний продукт.	Постачальники продукції самостійно встановлюють цінову політику.	Потрібно запропонувати клієнтами унікальні рішення.	Запропоноване ПЗ буде об'єднувати всі необхідні функції для вибору оптимального технологічного процесу.

Визначаємо та обґрунтовуємо фактори конкурентоспроможні (Таблиця 4.10).

Таблиця 4.10 – Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування
1.	Новизна продукту	Унікальне програмне забезпечення
2.	Якість	Розроблення якісного ПЗ, тестування та впровадження модифікацій

3.	Цінова політика	Продаж по нижчій ціні, можливість підписки на певний період
4.	Технічна підтримка	Постійна технічна підтримка клієнтів

Порівнюємо сильні та слабкі сторони запропонованого продукту (Таблиця 4.11).

Таблиця 4.11 – Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін продукту

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1.	Новизна продукту	16					X		
2.	Якість	18				X			
3.	Цінова політика	14							X
4.	Технічна підтримка	20					X		

Згідно аналізу сильних та слабких сторін (Таблиця 4.11), продукт конкурентоспроможний завдяки унікальності та якості.

Таблиця 4.12 – SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони: - Унікальність ПЗ; - Інтуїтивний та зручний інтерфейс; - Підвищення економічності виробництва, як наслідок використання ПЗ.	Слабкі сторони: - Новизна на ринку, відсутність клієнтів; - Необхідність зацікавити потенційних клієнтів.
Можливості: - Попит на продукт; - Постачання ПЗ провідним компаніям промисловості; - Збільшення продажів.	Загрози: - Висока конкуренція; - Випуск конкурентами аналогічного ПЗ; - Витрати перевищують затрати протягом тривалого часу.

На основі SWOT-аналізу (Таблиця 4.12) розробляємо альтернативну поведінку на ринку під час впровадження стартап-проекту на ринок (Таблиця 4.13).

Таблиця 4.13 – Альтернативи ринкового впровадження стартап проекту

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Отримання патенту на продукту	50%	2 місяці
2.	Продаж та передача прав на ПЗ компанії-конкуренту	30%	1 рік
3.	Залучення цінних кадрів в компанію	90%	1 рік

Отже, обираємо стратегію №3, залучення цінних кадрів в компанію, як найімовірніший шлях досягнення успіху.

4.4 Розроблення ринкової стратегії проекту

Таблиця 4.14 – Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Цільова група	Готовність споживачі прийняти продукт	Орієнтовний попит	Інтенсивність конкуренції	Простота входу в сегмент
1.	Провідні компанії промисловості	Готові	Високий попит	Висока	Складна
2.	Приватні особи	Готові	Середній попит	Низька	Середня
3.	Державні установи	Готові	Низький попит	Низька	Середня

На основі Таблиця 4.14 визначаємо та розробляємо базові стратегії роботи в обраному сегменті ринку (Таблиця 4.15).

Обираємо стратегію концентрації (спеціалізації) як базову стратегію розвитку (Таблиця 4.16).

Таблиця 4.15 – Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
1.	Так	Компанія буде шукати нових споживачів.	Так: - Методологія; - Похожий інтерфейс.	Стратегія наслідування лідера.

Таблиця 4.16 – Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги цільової аудиторії до товару	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)
----------	--	---------------------------------	---	--

1.	Якість, зручність, відповідність стандартам	Стратегія концентрації (спеціалізації)	Оптимальне співвідношення ціни та якості	Висока якість, стандартизація, індивідуальний підхід
----	--	--	--	---

Для виходу на ринок обираємо стратегію слідування за лідером (ринку) (Таблиця 4.15), що є гарним вибором для зменшення боротьби і зосередженні на отриманні прибутку.

Таблиця 4.17 – Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги над конкурентами
1.	Якість	Висока якість	Продукт розроблено у відповідності до всіх стандартів і за допомогою консультації з фахівцями.
2.	Ціна	Доступна ціна	Продукт дешевше конкурентів.
3.	Зручність	Інтуїтивно зрозумілий інтерфейс	Продукт розроблено зі зручним інтерфейсом.
4.	Технічна підтримка	Технічна підтримка	Консультація клієнтів, постійна технічна підтримка.

4.5 Маркетингова програма стартап-проекту

Таблиця 4.18 – Витрати на створення стартапу

№ п/п	Стаття витрат	Обсяг витрат, тис. грн / рік
1.	Придбання технічного обладнання	200
2.	Оренда приміщення	200
3.	Розробка ПЗ	500
4.	Тестування ПЗ	100
5.	Залучення інженерів-консультантів	150
6.	Реклама	100

Таблиця 4.19 – Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари- замінники	Рівень цін на товари- аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	-	500 000	Високий	300 000 – 400 000

Таблиця 4.20 – Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Купівля програмного забезпечення або ж	Доставка товару, встановлення	Нульовий рівень.	Безпосередній продаж

	купівля підписки на певний період.	та технічна підтримка клієнта.		клієнту від виробника.
--	------------------------------------	--------------------------------	--	------------------------

В цілях мати постійний контакт з клієнтом, обрано безпосередній продаж клієнту від виробника як систему збуту товару (Таблиця 4.20).

Таблиця 4.21 – Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
1.	Ознайомлення з товаром на сайті компанії. Можливість отримати пробну безкоштовну версію.	Сайт компанії, тематичні виставки та конференції, сторінки компанії в соціальних мережах	Якість та відповідність стандартам.	Зацікавити потенційного клієнта.	Економічне виробництво як наслідок використання продукту.

4.6 Висновки до розділу

Як заключну частину магістерської дисертації, було підготовлено стартап-проект. Ідея стартап-проекту полягає в розробці програмного забезпечення здатного обирати оптимальний технологічний процес виготовлення.

Аналіз ринку показує затребуваність даного продукту на ринку, але при цьому існують складнощі з реалізацією продукту, а саме: складність формалізації поставленої задачі, а також висококонкурентне середовище ринку.

Отже, зважаючи на складність поставленої задачі, запропоноване програмне забезпечення може бути реалізоване частково у вигляді прототипу лише для декількох технологічних процесів. У випадку зацікавленості ринку доцільно продовжити розробку продукту.

ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В ході роботи над магістерською дисертацією на тему «Підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в одиничному виробництві», було проаналізовано наявну літературу із заданої теми. Було виявлено, що існує декілька способів класифікації виробництва, але жоден зі способів не є автоматизованим. Складність вибору технологічного процесу зумовлена недостатністю об'єктивних даних щодо вартості кожного процесу. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробка ПЗ як було запропоновано в Розділі 4.

Великі можливості для виробництва деталей складної форми, зокрема в одиничному виробництві, надають адитивні технології. Проте необхідно зважати на недостатній об'єм загальнодоступних знань про механічні властивості таких деталей. І як наслідок, не можливість оцінити міцність таких деталей.

Також виявлено проблему в питанні оптимізації складної геометрії, наявне програмне забезпечення дозволяє оптимізацію одного варіанту навантаження деталі. Проте існують деталі які сприймають різні варіанти навантаження і як тимчасове рішення можна використовувати ітераційний метод, поступово оптимізувати деталь. Але це рішення обмежується декількома варіантами навантаження, у випадку десятків варіантів навантаження, необхідно автоматизувати цей процес.

Для продовження праці в напрямку теми дисертації необхідно розробити прототип програмного забезпечення, як було описано в Розділі 4. Саме розробка програмно забезпечення, з автоматизованим вибором оптимального технологічного процесу, буде показником ефективності опрацьованої літератури.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Bourell, D. L., Frazier, W., Kuhn, H., & Seifi, M. (2020). *ASM Handbook®*, Volume 24 - Additive Manufacturing Processes. Ohio: ASM International. Retrieved from https://www.asminternational.org/books-and-handbooks/results/-/journal_content/56/10192/39892774/PUBLICATION/
2. Dutta, B., Babu, S., & Jared, B. (2019). *Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/s.v?OGtcgcRN>
3. Elliott, A., & Waters, C. (2019). *Additive Manufacturing for Designers - A Primer*. Warrendale, Pennsylvania, USA: SAE International. Retrieved from <https://app.knovel.com/s.v?cBHmcYDG>
4. FAA, & EASA. (2022). Certification of Additively Manufactured Parts. 2022 FAA EASA Additive Manufacturing Workshop Presentations. Retrieved from https://www.faa.gov/sites/faa.gov/files/2022_FAA_EASA_AM_Workshop_Full_Proceedings.pdf
5. Gibson, I., Rosen, D., & Stucker, B. (n.d.). Additive Manufacturing Technologies. London. Retrieved from <https://kgut.ac.ir/useruploads/1523430527968ggi.pdf>
6. Institute, B. M. (2023). Metallic Materials Properties Development and Standardization (MMPDS-2023). Battelle Memorial Institute. Получено из <https://www.sae.org/publications/books/content/b-991/>
7. Mital, A., Desai, A., Subramanian, A., & Mital, A. (2008). *Product Development - A Structured Approach to Consumer Product Development, Design, and Manufacture*. Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/s.v?u3IiyDsU>
8. Scallan, P. (2003). *Process Planning - The Design/Manufacture Interface*. Great Britain by Biddles: Elsevier. Retrieved from <https://app.knovel.com/s.v?XS2iedVo>
9. Swift, K., & Booker, J. (2013). *Manufacturing Process Selection Handbook*. Oxford: Elsevier Science. Retrieved from <https://industri.fatek.unpatti.ac.id/wp-content/uploads/2019/03/062-Manufacturing-Process-Selection-Handbook-K.G.-Swift-J.D.-Booker-Edisi-1-2013.pdf>

ДОДАТОК А (Акт використання результатів магістерської дисертації)



АКТ

використання результатів магістерської дисертації студента КПІ ім. Ігоря Сікорського Білицького Родіона Вікторовича у науково-технічних розробках ТОВ «Прогрестех-Україна»

Цим актом підтверджується впровадження результатів магістерської дисертації «Підвищення ефективності виготовлення деталей складної форми в одиничному виробництві» студента КПІ ім. Ігоря Сікорського Білицького Родіона Вікторовича (керівник – професор кафедри технології машинобудування Воронцов Б.С.) у науково-технічних розробках ТОВ «Прогрестех-Україна».

Результатами впровадження є заміна виробничого процесу виготовлення ремонтних кронштейнів для встановлення в зоні двигуна літака (Pylon Structure). Стандартний виробничий процес (лиття під тиском) замінено на фрезерування з суцільної плити. Заміну технологічного процесу впроваджено лише для ремонтної конфігурації. Заміна технологічного процесу супроводжується детальними інструкціями виготовлення та встановлення. Розроблено розрахунки на статичну та довговічну міцність. Перевагою нового технологічного процесу є вартість та швидкість виготовлення. Вартість виготовлення форм для лиття декількох ремонтних кронштейнів є надто високою в порівнянні з витратами на фрезерування.

Використані матеріали роботи були передані ТОВ «Прогрестех-Україна» в односторонньому порядку та без будь-яких зобов'язань згідно рішення кафедри технології машинобудування (Протокол № 5 від 21 грудня 2023р.).

Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Заступник директора



Максим Гладський

ДОДАТОК Б (Копія опублікованої статті)

Вітчизняна наука на зламі епох: проблеми та перспективи розвитку

ТЕХНІЧНІ НАУКИ. ТРАНСПОРТ

УДК 62

Родіон Білицький
(Київ)

ВИКОРИСТАННЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ У ВИРОБНИЦТВІ ТА ОБСЛУГОВУВАННІ ЛІТАКІВ

У статті розглянуто приклади впровадження адитивного виробництва в промисловість. Розглянуто стан розроблення стандартизованих механічних властивостей адитивно виготовлених деталей. Проаналізовано досвід провідних компаній в розробленні та впровадженні адитивних технологій.

Ключові слова: адитивне виробництво (AB), механічні властивості адитивно виготовлених деталей, оптимізація геометрії (топология), стандартизація та сертифікація адитивного виробництва.

При традиційних (субтрактивних) методах виробництва, деталь створюють видаляючи пошарово зайвий матеріал із заготовки. При адитивному виробництві ж, навпаки, деталь створюють пошарово, осаджуючи матеріал на підкладку або попередній шар [1, с. 11]. При цьому необхідно лише мінімальна механічна обробка для створення кінцевої геометрії виробу.

Перевага АВ прослідковується в одиничному та малосерійному виробництві [2, с. 18]. При цьому значно спрощується технологічний процес виготовлення. Також є можливість виготовлення деталей складної форми, які важко, а то й не можливо, виготовити іншим способом.

Активно АВ впроваджують, зокрема, і у сфері авіації. Деякі з розроблених адитивно виготовлених деталей було презентовано на конференції за участі Федерального авіаційного управління США (FAA), Європейського агентства авіаційної безпеки (EASA) та провідних авіа виробників [7]. В даній статті проаналізовано деякі приклади впровадження адитивних технологій у виробництво та обслуговування літаків. Наведено приклади таких компаній як General Electric (GE), Boeing, 3D Systems, Norsk Titanium тощо.

General Electric (GE)

Згідно презентації GE [13, с. 5] на Міжнародній виставці-конференції 3D друку 2018 року в м. Ульсан, Південна Корея [11], робоча група компанії з адитивного виробництва була сформована в 2010 році. З тих пір компанія має ряд напрацювань в сфері адитивного виробництва.

Турбовентиляторний авіаційний двигун GE9X має 294 деталі виготовлених за допомогою адитивного виробництва, а саме: 1 корпус датчика температури та тиску, 28 паливних форсунок та камер змішування, 1 теплообмінник, 1 індуктор, 228 лопаті турбіни.

Використання адитивних технологій, для виробництва деталей двигуна, зменшує вагу деталі та вартість виготовлення, збільшує швидкість виробництва, зменшує кількість деталей та час необхідний для складання. Для лопатей турбіни, заявлена зменшення ваги становить 50%. Механічні властивості та довговічність теж кращі ніж в деталей виготовлених традиційними методами. Варто зауважити, що більшість з названих деталей раніше виготовлялися за допомогою лиття під тиском, що має відносно не високі показники довговічності. Тому покращення довговічних властивостей є цілком очікуваним при використанні адитивних технологій.

Як була згадано вище, GE розпочала працювати над адитивним виробництвом з 2010 року. Перший прототип паливної форсунки для двигуна GE9X було розроблено в 2012 році [13, с. 5], [10]. На даний момент, друк паливних форсунок впроваджений в масове виробництво і станом на 2018 рік, було вироблено 30 тисяч друківаних паливних

форсунок [10]. Ефективність паливної форсунки залежить від внутрішньої геометрії каналів для палива. Для ефективного змішування повітря з паливом було спроектовано форсунку з 14 внутрішніми каналами. Деталь не можливо було виготовити за допомогою традиційних методів, тому деталь виготовили за допомогою 3D друку. Попередня паливна форсунка, виготовлена традиційними методами, складалась з 20 деталей, зараз ж це одна суцільна деталь. Адитивно виготовлена паливна форсунка має на 25% меншу вагу, в 5 разів міцніша, та на 30% економніша [10].

Для адитивного виробництва вищеперахованих деталей використано наступні матеріали: сплав CoCr, сплав TiAl, сплав F357 (Al-Si-Mg) [8].

Датчик температури та тиску сертифікований FAA в 2015 році і є першим сертифікованим адитивно виготовленим виробом [8, с. 5]. Двигун GE9X був сертифікований і використовується на літаках Boeing 777-8 та Boeing 777-9.

Використання адитивних технологій для виготовлення деталей для двигуна GE Catalyst, зумовило зменшення часу виготовлення з 12 місяців до 6, зменшення витрат палива на 20%, та зменшення ваги на 5%. 855 деталей виготовлених традиційними методами було замінено на 12 адитивно виготовлених деталей [13, с. 10].

Центр адитивних технологій GE в Пітсбурзі виготовив центральну частину корпусу двигуна a-CT7 [12]. Одна друкована деталь замінила збірку з 300 деталей [13, с. 4]. Для даної збірки, при традиційних методах виготовлення, було більше 50 постачальників деталей, залучено 60 інженерів, а для ремонту залучали потужності 5 підприємств. Натомість при АВ це одна суцільна деталь, 1 виробник, залучено 6-8 інженерів, 1 ремонтна база. Отже, окрім очевидної переваги зменшення ваги, адитивні методи виробництва зменшують кількість залучених інженерів та постачальників, пришвидшують цикл виробництва та ремонту.

GE розробляє і частково впровадила у промисловість ремонт зношених частин за допомогою методів адитивного виробництва [9]. Для ремонту коробок передач авіаційних двигунів використовують холодне осадження порошку. Порошок наносять зі швидкістю 4 Мах на ділянку ремонту, після чого проводять механічну обробку для відновлення необхідної геометрії. На даний момент це єдиний спосіб для ремонту коробок передач авіаційних двигунів. Зокрема, зварювання, не використовують для ремонту із-за негативного впливу термічної історії деталі на довговічність. В той час як нанесення металевого порошку під високим тиском не створює негативних термічних ефектів. Також в 2019 році GE розпочала використовувати адитивний метод DMLM для ремонту компонентів двигунів. Лазерне осадження використовують для відновлення зношених або зламаних частин деталей, зокрема для тонкостінних, які важко, а то й не можливо, відновити методами зварювання. GE наразі ремонтує лопаті турбін двигуна CF6 за допомогою лазерного осадження DMLM.

Ремонт лопатей двигуна відбувається за наступним алгоритмом [9]:

1. Пошкоджену деталь поміщають в робочу камеру п'яти осевого робота. Камеру заповнюють інертним газом (аргоном) для запобігання окисленню під час осадження металу.
2. Позиціонування деталі відбувається за допомогою розробленого програмного забезпечення. Сканери фіксують існуючу геометрію деталі і за допомогою методів триангуляції відтворюється тривимірний модель пошкодженої деталі.
3. Тривимірний модель пошкодженої деталі порівнюється з геометрією початкової деталі. Точність триангуляції до 65 мкм. Відсутня частина відновлюється осадженням матеріалу методом DMLM.
4. Механічна обробка для видалення надлишків осадженого матеріалу та створення необхідної геометрії.

Вищеописаний метод ремонту лопатей турбін авіаційних двигунів тестується і вдосконалюється з 2019 року і потребує додатково випробувань та сертифікації регулюючими органами для використання в експлуатованому парку літаків.

Boeing

Компанія Boeing використовує адитивно виготовлені деталі у виробництві літака 787 (Dreamliner) [6]. Це двомоторний пасажирський літак призначений для польотів на великі

відстані. Особливістю даного літака є його економічність та екологічність. Економічність виробництва та вартості польотів досягнуто зокрема за рахунок використання адитивних технологій при виготовленні деталей.

Аддитивні технології використано переважно для виготовлення різноманітних титанових кронштейнів та фітінгів (*secondary structure*). Традиційно такі деталі виготовляли шляхом фрезерування з суцільної плити титанового сплаву. Для деяких кронштейнів частка відходу матеріалу (стружки), після обробки становила 95%. Тобто, більша частина матеріалу видалялась шляхом механічної обробки. Зважаючи на вартість титану та його важко оброблюваність, фрезерувати з суцільної плити є не найкращим рішенням.

Друківані деталі для літака 787 виробляє компанія Norsk Titanium [6]. Компанія використовує запатентований процес швидкого плазмового осадження (*Rapid Plasma Deposition (RPD)*). Даний метод використовує плазмову дугу та дозволяє контролювати осадження титану з високою швидкістю. При традиційних методах виготовлення, відношення видаленого матеріалу шляхом механічної обробки до кінцевої ваги обробленої деталі може сягати 20:1. При адитивному виробництві це співвідношення в середньому було зменшено до 3:1. Але зменшення цього співвідношення до мінімального є не завжди доцільним. Наприклад, для фітінгів з тонкостінними елементами, в деяких випадках, більш доцільно друкувати з більшим допуском на механічну обробку. При другій надто тонкостінних елементів спостерігається короблення, розтріскування тощо, що зумовлено термічними напруженнями. Тобто іноді більш доцільно залишити більший припуск на механічну обробку, не зважаючи на збільшення витрат на інструмент та збільшення відходів (стружки).

Аддитивне виробництво це не лише про зменшення ваги та обсягів механічної обробки. Справжні переваги адитивного виробництва у можливостях змінювати геометрію деталей. Геометрію деталей можна змінити відносно традиційної, так як тепер менше обмежень на виготовлення. Як відомо, адитивне виробництво дозволяє виготовляти деталі більш складної форми. Вузли та зборки можна буде об'єднувати в одну суцільну деталь виготовлену методами АВ.

В літаку 787 використовуються деталі такої ж геометрії як і типові деталі, виготовлені традиційними методами [6]. Геометрія не була оптимізована із-за складності сертифікації деталей в яких одночасно велика кількість змін. На даний момент. Використання адитивних технологій зменшило вартість виробництва із-за зменшення вартості вихідної сировини та зменшення витрат на інструменти для механічної обробки.

Наступним кроком є оптимізація геометрії деталей та вузлів в цілому. За допомогою АВ можна задати необхідний напрям волокон, використати сплав з необхідними механічними властивостями тощо. Методи топології та DFAM дозволять зменшити вагу деталей.

Оптимізація маси та дизайну [5, 14]

Питання оптимізації маси та геометрії деталі існує з часів технічної революції. Використання традиційних методів виготовлення накладає суттєві обмеження на складність геометрії деталі. При адитивному виробництві геометрія деталі формується пошарово за рахунок додавання матеріалу (осадження), в той час як при традиційних (субтрактивних) методах виготовлення, матеріал видаляють пошарово із заготовки. Створення геометрії пошарово методами АВ є перевагою при створенні надскладної геометрії.

Паралельно із розвитком АВ розвивається і оптимізація геометрії деталі (топологія). В якості прикладу успішної оптимізації можна навести публічний конкурс від GE Aircraft для оптимізації геометрії кронштейна літака [14]. В завданні було надано поточну геометрію кронштейна, вимоги щодо міцності, та обмеження простору (габаритів) для оптимізованої деталі.

Оптимізована деталь була розроблена компанією Frustrum та надрукована компанією 3D Systems. В деталі було враховано всі початкові вимоги та зменшено вагу на 70% в порівнянні з початковим дизайном. Отже, адитивні технології суттєво розширили можливості для оптимізації деталей та їх маси. Прогнозується, що окрім авіації, оптимізацію ваги будуть

більш широко використовувати в інших галузях, таких як автомобільна, машинобудівна тощо.

Висновки

Розглянуті приклади впровадження адитивних технологій у виробництво та обслуговування літаків демонструють що основною проблемою є сертифікація таких деталей. Сертифікація деталей з принципово іншою геометрією в порівнянні з попередніми, традиційно виготовленими, займає багато часу. Тому на даний момент провідні авіа компанії працюють сумісно з FAA та EASA для пришвидшення сертифікації АВ деталей.

Іншим суттєвим недоліком є недоступність публічних механічних властивостей адитивно виготовлених матеріалів. Згідно [7] на даний момент розробляються стандартизовані механічні властивості і будуть опубліковані в розділі 2 MMPDS (Metallic Materials Properties Development and Standardization).

Зважаючи на вищепераховані успішні приклади впровадження АВ в авіаційній галузі, а також зважаючи на пришвидшення сертифікації та розроблення стандартизованих механічних властивостей, можна стверджувати, що АВ має перспективи для широкого впровадження в промисловість. Це дає можливість використати всі переваги АВ, включно з оптимізацією геометрії (топологією) і як наслідок зменшення ваги, вартості виробництва і відповідно вартості експлуатації та обслуговування.

ДЖЕРЕЛА ТА ЛІТЕРАТУРА

1. Bhaskar Dutta, Sudarsanam Babu, Bradley H. Jared. Science, Technology and Applications of Metals in Additive Manufacturing. 2019. 354 p.
2. David L. Bourell, William Frazier, Howard Kuhn, Mohsen Seifi. ASM Handbook, Volume 24: Additive Manufacturing Processes. USA, 2020. 475 p.
3. Titanium Powder Metallurgy and Additive Manufacturing. 2018. 284 p.
4. URL: https://en.wikipedia.org/wiki/CFM_International_LEAP
5. URL: <https://utw10945.utweb.utexas.edu/sites/default/files/2014-110-Carter.pdf>
6. URL: <https://www.additivemanufacturing.media/articles/what-is-the-role-for-additive-manufacturing-in-aircraft-structural-components>
7. URL: https://www.faa.gov/aircraft/air_cert/step/events/additive_mfg_workshop/proceedings
8. URL: <https://www.ge.com/additive/sites/default/files/2020-08/GE9X%20Additive%20parts.pdf>
9. URL: <https://www.ge.com/additive/stories/blade-runner-40>
10. URL: <https://www.ge.com/news/reports/transformation-3d-walnut-sized-part-changed-way-ge-aviation-builds-jet-engines>
11. URL: <http://www.inside3dprinting.co.kr/>
12. URL: <https://www.instagram.com/p/B60qq0-FMCN/>
13. URL: <https://www.slideshare.net/GEKorea/ge-additive-21st-century-paradigm-shifter-use-cases-in-ge>
14. URL: <https://www.3dsystems.com/learning-center/case-studies/topology-optimization-and-dmp-combine-meet-ge-aircraft-engine-bracket>

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор Воронцов Б. С.

ДОДАТОК В (Механічні властивості матеріалів використані в роботі)

MMPDS-2023, Vol. I
1 July 2023**Table 5.4.1.0(b₁). Design Mechanical and Physical Properties of Ti-6Al-4V Sheet, Strip, and Plate.**

Specification	AMS 4911 ^a					
Form	Sheet		Plate			
Condition	Annealed					
Thickness, in.	≤ 0.1875		0.1876-2.000		2.001-4.000	
Basis	A	B	A	B	A	B
Mechanical Properties:						
F_{tu} , ksi:						
L	134	139	130 ^b	135	130 ^c	137
LT	134	139	130 ^b	138	130 ^c	137
F_y , ksi:						
L	126	131	120	125	120	123
LT	126	131	120 ^b	131	120	129
F_{cy} , ksi:						
L	133	138	124	129	124	127
LT	135	141	130	142	130	140
F_{tu}^d , ksi: L, LT	87	90	79	84	79	84
F_{bru}^e , ksi: L, LT						
(e/D = 1.5)	213	221	206	214	206	217
(e/D = 2.0)	272	283	260	276	260	274
F_{bry}^e , ksi: L, LT						
(e/D = 1.5)	171	178	164	179	164	176
(e/D = 2.0)	208	217	194	212	194	209
e , percent (S-Basis):						
L	8 ^f	...	10	...	10	...
LT	8 ^f	...	10	...	10	...
E , 10 ³ ksi						
L	15.6-18.5 ^{g,h}		16.5-18.1 ^{i,j}			
LT	16.0-18.6 ^{g,j}		17.1-19.3 ^k			
E_c , 10 ³ ksi						
L	15.5-18.0 ^{g,l}		16.4 ^m			
LT	16.0-18.3 ^{g,n}		16.4 ^m			
G , 10 ³ ksi	6.0-7.1 ^{g,o}		6.3-7.4 ^{g,o}			
μ	0.31 ^o		0.31 ^o			

Specification	AMS 4911 ^a		
Form	Sheet	Plate	
Condition	Annealed		
Thickness, in.	≤ 0.1875	0.1876-2.000	2.001-4.000
Physical Properties:			
ω , lb/in. ³	0.160		
C and K	See Figure 5.4.1.0(a ₁)		
α , 10 ⁻⁶ in./in./°F	See Figure 5.4.1.0(a ₂)		

Last Revised: MMPDS-2023, Items 21-33 and 22-11. Material allowable properties were last confirmed and revised July 2023.

a Mechanical properties also met previous MIL-T-9046, Comp. AB-1.

b A-Basis value is specification minimum. The rounded T_{99} values are as follows: $F_m(L) = 131$ ksi, $F_m(LT) = 132$ ksi, and $F_y(LT) = 123$ ksi.c A-Basis value is specification minimum. The rounded T_{99} values are as follows: $F_m(L) = 133$ ksi and $F_m(LT) = 133$ ksi.

d Shear test method unknown. See Section 1.4.6.

e Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1. Grain and loading direction per ASTM E238.

f 6% for 0.008 up to 0.025, 8%—0.025 to 0.062 in. and 10%—0.063 in. and above.

g Modulus values for Ti-6Al-4V are known to vary depending on amount of texturing.

h E(L) sheet sample size = 39, average = 16.9 x 10³ ksi, standard deviation = 0.64.i E(L) plate sample size = 31, average = 17.3 x 10³ ksi, standard deviation = 0.41.j E(LT) sheet sample size = 39, average = 17.3 x 10³ ksi, standard deviation = 0.59.k E(LT) plate sample size = 12, average = 18.2 x 10³ ksi, standard deviation = 0.56.l E_c(L) sheet sample size = 39, average = 16.7 x 10³ ksi, standard deviation = 0.59.

m Historical value. No current data.

n E_c(LT) sheet sample size = 39, average = 17.2 x 10³ ksi, standard deviation = 0.55.o The range for G is calculated based on the range of elastic modulus values. Refer to Sections 1.4.3.1 and 1.4.6.1 for discussion of potential variability in μ and G values when elastic modulus values vary with direction.

Table 5.4.1.0(e). Design Mechanical and Physical Properties of Ti-6Al-4V Extrusion.

Specification	AMS 4935 ^a				AMS 4934 ^a						
Form					Extrusion						
Condition	Annealed			Solution treated and aged							
Thickness or diameter, in.	≤2.000		2.001-3.000	≤0.500		0.501-0.750		0.751-1.000		1.001-2.000	2.001-3.000
Basis	A	B	S	A	B	A	B	A	B	S	S
Mechanical Properties:											
F_{tu} , ksi:											
L.....	130 ^b	137	130	155	163	151	157	147	153	140	130
LT ^c	130 ^b	137	130	155	163	151	157	147	155	140	130
F_{ty} , ksi:											
L.....	116	120	120	138	147	138	143	133	140	130	120
LT ^c	116	120	120	138	147	138	145	133	142	130	120
F_{cy} , ksi:											
L.....	120 ^b	129	120	147	157	147	153	142	150	139	128
LT ^c	125	130	...	147	157	147	155	139	152	139	128
F_{tu}^d , ksi:	84	88	...	94	99	92	96	89	93	85	79
F_{bru}^a , ksi:											
(e/D = 1.5).....	214	226	...	243	256	237	246	231	240	220	204
(e/D = 2.0).....	264	278	...	311	327	303	315	295	307	281	261
F_{by}^a , ksi:											
(e/D = 1.5).....	174	180	...	208	222	208	216	201	212	196	182
(e/D = 2.0).....	203	210	...	242	257	242	250	233	245	228	210
e , percent (S-Basis):											
L.....	10	...	10	6	...	6	...	6	...	6	6
LT ^c	8	...	8	6	...	6	...	6	...	6	6
RA , percent (S-Basis):											
L.....	20	...	20	12	...	12	...	12	...	12	12
LT ^c	15	...	15	12	...	12	...	12	...	12	12
E , 10 ³ ksi.....	16.9										
E_c , 10 ³ ksi.....	17.2										
G , 10 ³ ksi.....	6.5										
μ	0.31										
Physical Properties:											
ω , lb/in. ³	0.160										
C and K	See Figure 5.4.1.0(a ₁)										
α , 10 ⁻⁶ in./in./°F.....	See Figure 5.4.1.0(a ₂)										

Issued: Dec 1968, MIL-HDBK-5A CN3, Item 68-19. Last Revised: Apr 2014, MMPDS-09, Item 12-93.

Material allowables for AMS 4935 were last reviewed and revised in Item 09-34, MMPDS-05.

a Properties were based on MIL-T-81556.

b A-Basis value is specification minimum. The rounded T_{99} values are higher than specification values as follows: F_{tu} (L) and (LT) = 132 ksi, and F_{ty} (L) = 124 ksi.

c Applicable, providing LT dimension is ≥2.500 inches.

d Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1.

Table 5.4.1.0(g). Design Mechanical and Physical Properties of Ti-6Al-4V Titanium Alloy Casting.

Specification	AMS 4992					
Form	Investment Casting					
Temper	HIP and Annealed					
Thickness, in.	<0.500		0.500-1.500		1.501-4.000	
Basis	A	B	A	B	A	B
Mechanical Properties:						
F_{tu} , ksi	125	129	123	127	120	124
F_{ty} , ksi	111	116	112	116	110	115
F_{cy} , ksi	117	122	119	123	117	124
F_{sw} , ksi	86	89	85	87	85	87
F_{bru}^a , ksi:						
(e/D = 1.5)	201	207	196	202	192	199
(e/D = 2.0)	252	260	246	254	242	250
F_{by}^a , ksi:						
(e/D = 1.5)	172	180	174	180	172	182
(e/D = 2.0)	207	216	210	217	209	220
e , percent (S-Basis)	5	...	4	...	3	...
RA , percent (S-Basis)	...	...	19	...	12	...
E , 10 ³ ksi	16.9					
E_c , 10 ³ ksi	17.4					
G , 10 ³ ksi	...					
μ	...					
Physical Properties:						
ω , lb/in. ³	0.160					
C , Btu/(lb)(°F)	See Figure 5.4.1.0(b)					
K , Btu/[(hr)(ft ²)(°F)/ft]	...					
α , 10 ⁻⁶ in./in./°F	See Figure 5.4.1.0(b)					

Last Revised: July 2022, MMPDS-17, Item 21-50.

a Bearing values are "dry pin" values per Section 1.4.7.1.