

Національний технічний університет України
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені Ігоря Сікорського»
НАВЧАЛЬНО - НАУКОВИЙ МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ
ІНСТИТУТ
Кафедра технології машинобудування

«На правах рукопису»
УДК 621

«До захисту допущено»
Завідувач кафедри
_____ Олександр Охріменко
(підпис) (власне ім'я, прізвище)
“ ” _____ 2024р.

Магістерська дисертація
на здобуття ступеня магістра
за освітньо-науковою програмою «Технології
машинобудування»
зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»
на тему: Забезпечення точності складання вузла «Модуль фари»
Виконав:
студент 2 курсу, групи МТ-31мп

Солонка Володимир Васильович

(прізвище, ім'я, по батькові)

(підпис)

д.т.н., проф. Воронцов Б.С.

Науковий керівник _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)

(підпис)

к.т.н., доц.каф. КМ Красновид Д.О.

Рецензент _____

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

(підпис)

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

Студент _____

(підпис)

Київ – 2024

**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-науковою програмою «Технології машинобудування»

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри
Олександр Охріменко
«__» _____ 2024р.

**ЗАВДАННЯ
на магістерську дисертацію студенту
Солонка Володимир Васильович**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Забезпечення точності складання вузла «Модуль фари»

науковий керівник: д.т.н., проф. Воронцов Б.С.
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «07» листопада 2024р.
№ 5000-с

2. Термін подання студентом дисертації «_05_» грудня 2024р.

3. Об'єкт дослідження: процес складання вузла «Модуль фари» на
стенді зі зварної рами

4. Вихідні дані: наукові дослідження та статті, фахова література
присвячена дослідженню забезпечення точності складання високоточних
вузлів

5. Перелік завдань, які потрібно розробити: розробити математичну модель накопичення похибок при складанні та знайти рішення для корекції цих похибок

6. Перелік ілюстративного матеріалу: 18 слайдів MS Power Point

7. Орієнтовний перелік публікацій: 1 наукова стаття

8. Дата видачі завдання 5 жовтня 2023 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Термін виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Огляд літературних джерел	Вересень 2024	
2	Постановка задачі, вибір та ознайомлення з програмними продуктами для розрахунку математичних моделей	Жовтень 2024	
3	Планування експерименту	Жовтень 2024	
4	Проведення експерименту	Листопад 2024	
5	Обробка результатів та розрахунок математичних моделей	Листопад 2024	
6	Розробка стартап проєкту	Грудень 2024	
7	Оформлення дисертації та ілюстративного матеріалу	Грудень 2024	

Студент

Володимир СОЛОНКА

Науковий керівник

Борис ВОРОНЦОВ

РЕФЕРАТ

Солонка В.В. Забезпечення точності складання вузла «Модуль фари»

Дисертація містить 83 сторінки пояснювальної записки, 38 рисунків, 12 таблиць, список використаних джерел із 15 найменувань.

Актуальність

Сучасне автомобілебудування потребує високоточного складання вузлів, таких як модуль фари, які забезпечують естетичний вигляд та аеродинамічні характеристики автомобіля. У випадку контрольно-вимірювальних пристроїв, що відтворюють зовнішні поверхні деталей, особливо важливою є точність позиціонування модулів і дотримання геометричних допусків, що знижує виробничі витрати та покращує якість складання.

Мета дослідження

Розробка інноваційного підходу для вирішення проблем похибок при складанні вузла "Модуль фари" на зварну раму шляхом створення математичної моделі контролю похибок складання залежно від допусків проміжних елементів.

Задачі дослідження

1. Провести аналіз літературних джерел із теми.
2. Розробити та перевірити математичну модель накопичення похибок при складанні.
3. Запропонувати інноваційне рішення для корекції похибок складання.
4. Розробити бізнес-план стартапу на основі дослідження.

Об'єкт дослідження

Процес складання вузла «Модуль фари».

Предмет дослідження

Методи забезпечення точності складання вузла «Модуль фари».

Наукова новизна

У роботі вперше розроблено математичну модель, яка дозволяє точно оцінити вплив розмірних відхилень на точність складання вузла. Застосовано інноваційний підхід, що включає створення компенсуючої пластини, яка імітує відхилення зварної рами, для подальшого забезпечення точного позиціонування модулів.

Практичне значення

Результати дослідження можуть бути використані для вдосконалення процесів складання в автомобільній промисловості, зокрема, для забезпечення точності контрольно-вимірювальних пристроїв, що імітують зовнішні поверхні автомобільних компонентів. Запропонований метод сприяє зниженню похибок, підвищенню якості складання та зменшенню виробничих витрат.

Ключові слова: точність складання, модуль фари, розмірні допуски, математична модель, компенсуюча пластина, автомобільна промисловість, зварна рама, контрольно-вимірювальний пристрій.

ABSTRACT

Solonka V.V. Achieving the assembly accuracy of the "Rear Lamp Module"

Unit

Master's Thesis Topic: *Achieving the Assembly Accuracy of the 'Headlamp Module' Unit*

The thesis consists of 83 pages of explanatory notes, 38 figures, 12 tables, and a list of 15 references.

Relevance

Modern automotive manufacturing requires high-precision assembly of units such as the headlamp module, which ensures the vehicle's aesthetic appearance and aerodynamic characteristics. For control-measuring devices reproducing the external surfaces of parts, accurate positioning of modules and adherence to geometric tolerances are particularly important. This reduces production costs and improves assembly quality.

Objective

To develop an innovative approach to solving the problem of assembly errors in the "Headlamp Module" unit on a welded frame by creating a mathematical model to control assembly errors depending on the tolerances of intermediate assembly elements.

Research Tasks

1. Conduct a literature review on the research topic.
2. Develop and validate a mathematical model of error accumulation during assembly.
3. Propose an innovative solution for correcting assembly errors.
4. Develop a business plan for a startup based on the research.

Object of Study

Errors arising during the assembly of high-precision control-measuring devices.

Subject of Study

Methods for developing a mathematical model to control assembly errors.

Scientific Novelty

The study introduces a mathematical model that accurately evaluates the impact of dimensional deviations on the accuracy of unit assembly. An innovative approach has been applied, including the creation of a compensating plate that simulates the deviations of the welded frame, ensuring accurate module positioning.

Practical Significance

The research results can be applied to improve assembly processes in the automotive industry, particularly to ensure the accuracy of control-measuring devices simulating the external surfaces of automotive components. The proposed method reduces errors, enhances assembly quality, and decreases production costs.

Keywords: assembly accuracy, headlamp module, dimensional tolerances, mathematical model, compensating plate, automotive industry, welded frame, control-measuring device.

ЗМІСТ

ВСТУП	10
Розділ 1. Опис вимірювального стенду для контролю точності та якості зовнішніх деталей автомобіля.....	11
1.1. Загальний опис пристрою.....	11
1.2. «Модуль фари»: призначення та вимоги	13
1.3. Технологія виготовлення.....	17
Розділ 2. Дослідження точності складання модуля фари	24
2.1. Опис проблеми.....	24
2.2. Аналіз допусків при складанні.....	26
2.2.1. Метод аналізу допусків при складанні.....	26
2.2.2. Математичне моделювання поверхонь в залежності від допусків.....	28
2.2.3. Метод симуляції складання.....	30
2.2.4. Статистичний розподіл відхилення збірки	32
2.3. Використання зварних просторових конструкцій	34
2.4. Загальний підхід	37
2.5. Метод компенсації.....	39
2.6. Результати	47
2.7. Підсумок	53
2.8. Автоматизація процесу складання.....	53
Розділ 3. Підвищення точності складання просторових рам	60
3.1. Перевірка математичної моделі	60
3.2. Запропоноване рішення	61
3.3. Висновок.....	67
Розділ 4. СТАРТАП	69

4.1. Опис ідеї	69
4.2. Технологічний аудит.....	71
4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску	72
4.4. Розроблення ринкової стратегії	75
4.5. Розроблення маркетингової програми	77
4.6. Висновки до розділу.....	80
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	81

ВСТУП

Сучасне автомобілебудування є однією з найдинамічніших і найтехнологічніших галузей, де точність виготовлення та складання компонентів має вирішальне значення. Контрольно-вимірювальні пристрої, які використовуються для перевірки геометрії зовнішніх деталей автомобіля, вимагають особливої уваги до точності, оскільки навіть мінімальні відхилення можуть призводити до зниження якості кінцевого продукту та збільшення витрат на доопрацювання.

Особливо важливою є точність складання вузлів, таких як "Модуль фари", які відповідають за естетичний вигляд, аеродинамічні характеристики та функціональність автомобіля. Зважаючи на складність конструкцій, вплив відхилень геометричних параметрів вузлів стає критичним, що вимагає розробки нових методів контролю та усунення похибок на етапі складання.

Традиційні методи складання, засновані на стандартизованих допусках, часто не забезпечують необхідної точності через накопичення похибок проміжних елементів. Це зумовлює необхідність у розробці математичних моделей, які дозволять прогнозувати та компенсувати похибки на різних етапах складання.

Актуальність даної роботи визначається потребою у вдосконаленні процесів складання контрольно-вимірювальних пристроїв, що забезпечують якісну перевірку зовнішніх поверхонь автомобільних деталей. Розробка інноваційного підходу до моделювання похибок складання та їх компенсації дозволить підвищити точність і ефективність виробничих процесів.

Розділ 1. Опис вимірювального стенду для контролю точності та якості зовнішніх деталей автомобіля

1.1. Загальний опис пристрою

Контрольні пристрої відіграють важливу роль в автомобільній промисловості, особливо для зовнішніх частин, таких як двері, капоти, панелі та бампери. Ці пристосування забезпечують відповідність цих частин жорстким стандартам щодо зовнішнього вигляду, міцності та точності посадки, що сприяє як естетичній привабливості, так і функціональності автомобіля. Ось детальніше, чому вони важливі для зовнішніх компонентів:

1. Точність та Повторюваність

Для зовнішніх частин точність посадки є ключем до досягнення однорідного зовнішнього вигляду та запобігання таким проблемам, як шум від вітру, протікання або перекоси. Контрольні пристосування дозволяють виробникам перевіряти кожен компонент на відповідність розміру та форми, забезпечуючи ідеальне прилягання частин, таких як кузовні панелі та двері, на кожному автомобілі. Така точність допомагає підтримувати естетику та функціональність автомобіля, що особливо важливо для послідовності бренду.

2. Безпека та Надійність

Хоча зовнішні частини можуть здаватися менш критичними для безпеки порівняно з внутрішніми компонентами, вони відіграють важливу роль у загальній міцності та структурній цілісності автомобіля. Наприклад, точне розташування кузовних панелей і бамперів є важливим для належного опору ударам. Контрольні пристосування допомагають гарантувати, що зовнішні частини виготовляються та встановлюються відповідно до стандартів безпеки,

підвищуючи здатність автомобіля захищати пасажирів у разі зіткнення.

3. Ефективність Виробництва

Масове виробництво зовнішніх частин автомобілів потребує швидкого та надійного процесу перевірки, щоб підтримувати високу продуктивність без шкоди для якості. Контрольні пристосування розроблені для швидких і повторюваних перевірок, що значно скорочує час перевірки. Така швидкість забезпечує підтримку високих темпів виробництва, що є необхідним для конкурентоспроможності автомобільних компаній. Автоматизація, наприклад, автоматичні сканери та цифрові інструменти вимірювання, ще більше прискорює ці процеси, дозволяючи перевіряти зовнішні частини точно і в великих обсягах.

4. Адаптивність до Нових Дизайнів

У зв'язку з переходом на електромобілі (EV) і новими вимогами до дизайну зовнішні частини автомобілів постійно розвиваються, щоб відповідати новим естетичним і функціональним стандартам. Модульні пристосування адаптовані до різних дизайнів, що дозволяє виробникам перевіряти різні частини для різних моделей з мінімальними переналаштуваннями. Така гнучкість дозволяє плавно переходити між різними дизайнами автомобілів, підтримуючи тенденції, що змінюються, без високих витрат на інструменти для кожної нової моделі.

Загалом, контрольні пристосування забезпечують високі стандарти точності, безпеки, ефективності, адаптивності та стійкості для зовнішніх частин автомобілів, допомагаючи виробникам створювати естетично привабливі та функціональні транспортні засоби, які відповідають очікуванням споживачів і нормативним вимогам.

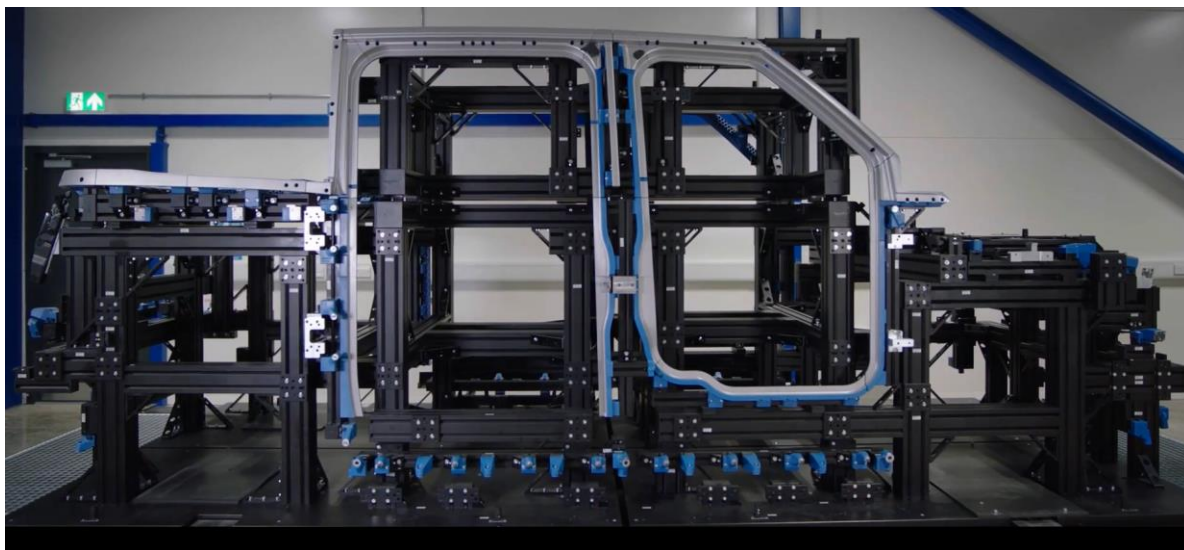


Рис. 1.1.1. Пристрій для контролю якості панелей

1.2. «Модуль фари»: призначення та вимоги

Модуль фари функціонує як універсальний інструмент, який повністю повторює зовнішню поверхню ідеальної фари, поверхні, розташовані на стиках з іншими деталями, а також місця кріплення інших елементів зі справжньою фарею. Застосовується для точного позиціювання, вирівнювання та перевірки посадки і зазорів сусідніх деталей автомобіля в контексті фар. Ось як можна ефективно використовувати цей модуль:

1. Точне позиціонування та вирівнювання

- **Інтеграція у стійку:** Модуль можна встановити на велику стійку, де також розташовані суміжні деталі, такі як заднє крило, бампер або

кришка багажника. Це дозволяє перевірити розташування і вирівнювання цих компонентів відносно задньої фари, забезпечуючи їх ідеальну посадку.

- **Налаштування для різних моделей:** Модульність дозволяє швидко налаштовувати модуль для різних версій або варіантів фар без потреби переналаштування всієї стійки. Ця гнучкість є цінною для перевірки нових дизайнів або варіантів моделей, а також суттєво економить кошти на виготовлення пристосувань.

2. Перевірка зазорів та перепаду

- **Вимірювання зазорів:** Завдяки встановленню модуля можна використовувати інструменти для вимірювання зазорів між форою та сусідніми деталями, такими як бампер чи кришка багажника. Це забезпечує рівномірність зазорів для якісного вигляду та правильності посадки, що є критично важливим для аеродинаміки та естетики.
- **Перевірка перепаду:** Дослідження глибини посадки задньої фари та суміжних панелей допомагає впевнитися, що фара знаходиться на одному рівні з навколишніми поверхнями, що важливо як для зовнішнього вигляду, так і для зменшення опору повітря.



Рис. 1.2.1. Зазор та перепад

3. Перевірка функціонального простору

- **Перевірка доступу:** Модуль дозволяє переконатися, що навколо задньої фари є достатньо простору для правильної установки без перешкод від сусідніх деталей. Це важливо, особливо якщо можуть виникати вібрації або невеликі переміщення, що можуть спричинити

контакт з іншими частинами та пошкодити справжню фару чи навколишні компоненти.

- **Простір для з'єднувачів і проводів:** пристосування допомагає забезпечити достатній простір для з'єднувачів, проводів та кріплень, щоб уникнути можливих проблем під час встановлення або обслуговування.

4. Тестування та перевірка збірки

- **Перевірка встановлення та зняття:** Використовуючи модуль задньої фари на фіксаторі, можна протестувати легкість встановлення і зняття оточуючих деталей в контексті фари, гарантуючи, що вони будуть надійно закріплені та доступні для обслуговування або заміни.
- **Перевірка точок кріплення:** Модуль також можна використовувати для перевірки того, чи всі точки кріплення на фарі правильно вирівняні з попередньо просвердленими отворами або місцями для кріплення на кузові автомобіля.



Рис. 1.2.2. Приклади модулів фари

Цей модуль дозволяє комплексно перевіряти посадку, зазори та вирівнювання в фіксаторі, одночасно забезпечуючи гнучкість для адаптації до різних дизайнів. Такий підхід допомагає гарантувати, що всі сусідні частини працюватимуть гармонійно, що сприяє високоякісному виробництву та злагодженій збірці.

1.3. Технологія виготовлення

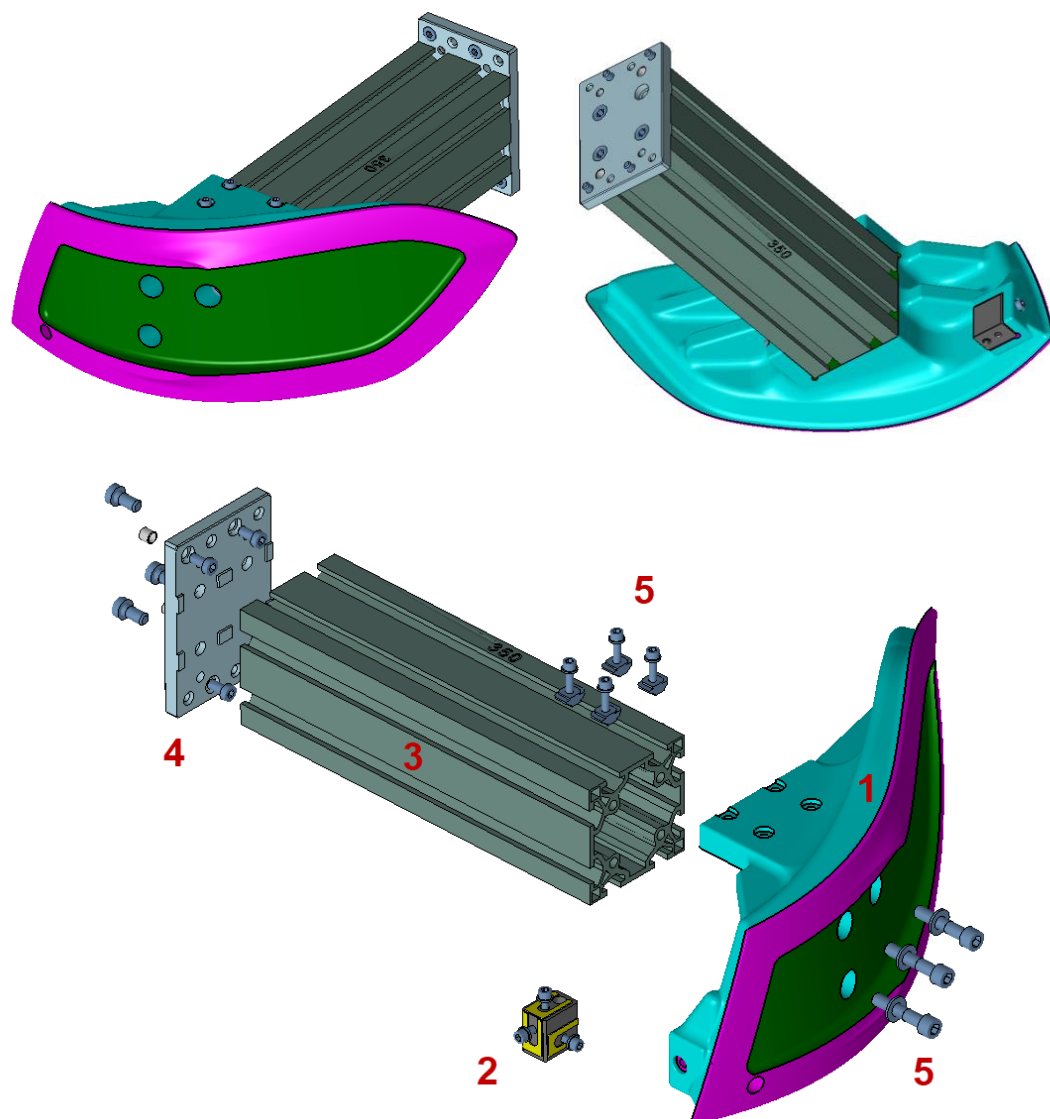


Рис. 1.3.1. Модуль фари: 1 – друкований прототип; 2 – блок; 3 – алюмінієвий профіль; 4 – адаптер; 5 – кріплення.

Сам модуль складається з друкованого прототипу номінальної фари 1, до якого кріпиться блок 2, який повторює елементи кріплення номінальної фари. Сам прототип встановлюється на алюмінієвий профіль 3 та кріпиться гвинтами та Т-гайками 5. Весь модуль кріпиться та базується на стійці за допомогою адаптера 4, який складається з пластини, двох втулок та гвинтів.

Величину похибки для зібраного вузла можна визначити наступним чином:

$$\Delta = \Delta_W + \Delta_{WD} + \Delta_{DB} + \Delta_{BA} + \Delta_A$$

де Δ – похибка вузла, що складається

Δ_W – похибки виготовлення зварної рами

$\Delta_{WD} = T_f + T_R + T_D$ – похибка взаємної ув'язки рами та адаптера

T_f – похибка площинності дотичних поверхонь

T_R – похибка позиціонування круглого штифта

T_D – похибка позиціонування зрізаного штифта

Δ_{DB} – похибка взаємної ув'язки адаптера та профіля

Δ_{BA} – похибка взаємної ув'язки профіля та 3-Д друкованої деталі

Δ_A – похибка виготовлення 3-Д друкованої деталі

Так як критичні поверхні на 3-Д друкованій деталі оборблюються в зборі (адаптер, профіль та 3-Д друкована деталь) на високоточному 5-осьовому верстаті з ЧПК, деякі похибки, які мають вплив на точність складання можна прирівняти до 0 та переписати формулу у такому вигляді:

$$\Delta = \Delta_W + \Delta_{WD}$$

Таким чином залишається вирішити проблему неточності складання між адаптером та зварною рамою.

1. Прототип фари

Являє собою деталь, виготовлену за допомогою 3Д-друку за допомогою технології SLS (спікання порошку). Матеріал **PA-AF (Aluminum Filled)**, суміш поліаміду та алюмінієвого порошку. Для друку використовується EOS P770 з робочим об'ємом 700 x 380 x 580 mm.



Рис. 1.3.2. 3D-принтер EOS P770

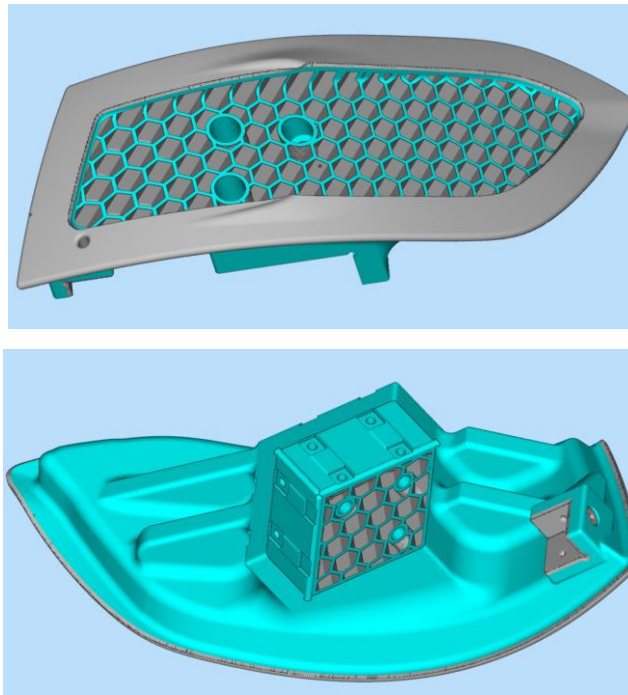


Рис. 1.3.3. Підготована до друку 3Д модель прототипу

Перед друком 3Д модель потребує підготовки, а саме додається сотова внутрішня структура для зменшення маси виробу, а також додається припуск 3мм на поверхні, які потребують подальшої пост-обробки.

2. Блок з кріпленням

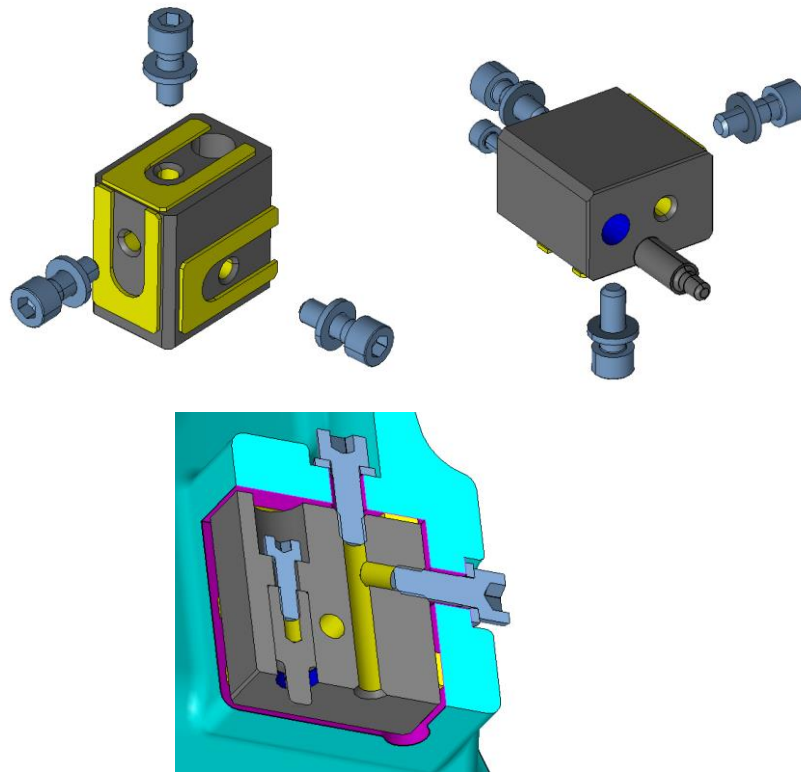


Рис. 1.3.4. Блок з кріпленнями

Складається з алюмінієвого блоку та штифта, кріпиться на прототип та може калібруватись в трьох напрямках за допомогою використання точних пластин різної товщини. Слугує місцем кріплення для кронштейна бампера.

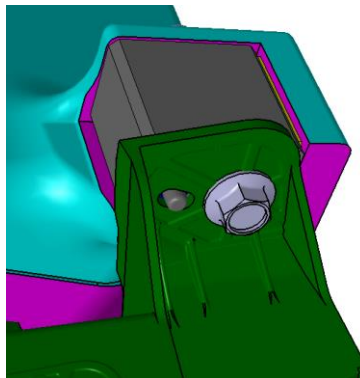


Рис. 1.3.5. Кріплення кронштейна на блок

3. Алюмінієвий профіль

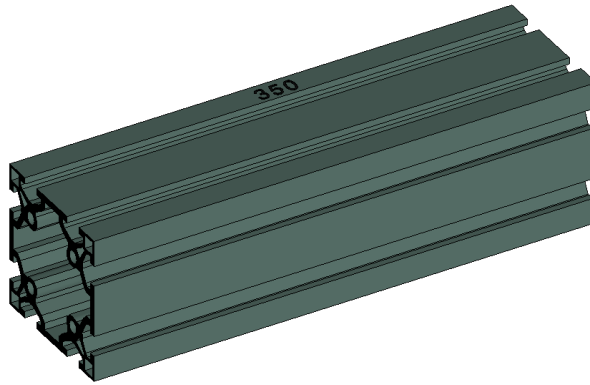


Рис. 1.3.6. Квадратний алюмінієвий профіль 100x100мм

Замовляються партіями різних довжин та зберігаються на складі, при потребі можна розрізати на одиниці меншої довжини.

4. Адаптер

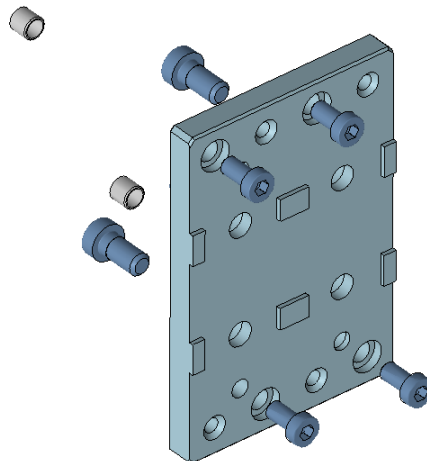


Рис. 1.3.7. Збірка адаптера

Являє собою алюмінієву пластину, яка позиціонується на балці за допомогою виступів та прикручується до неї гвинтами. В саму пластину запресовані 2 сталеві втулки, які спозиціонують модуль на рамі, в яку вкручені зрізаний та циліндричний пальці.

5. Кріплення

Кріпиться прототип до профілю за допомогою гвинтів та Т-гайок

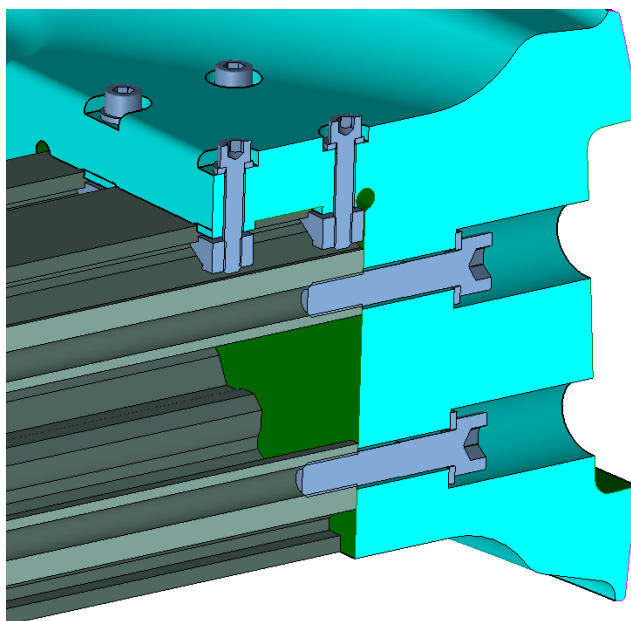


Рис. 1.3.8. Кріплення прототипу у перерізі

Після збору всіх складових, модуль фари, разом із суміжними модулями, які повторюють інші деталі, встановлюється на зварну раму за допомогою гвинтів для подальшої пост-обробки (фрезерування контурів, свердління отворів під блок).

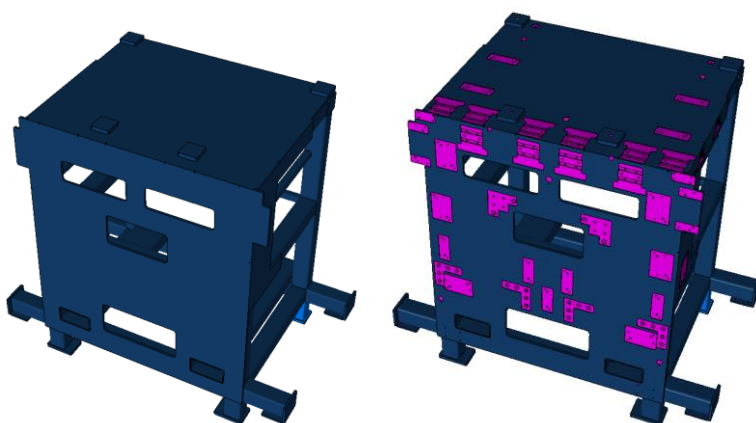


Рис. 1.3.9. Зварна рама

Рама представляє із себе зварну конструкцію із профілів різних розмірів. Також на рамі фрезеруються кишені та кріпильні отвори в місцях встановлення модулів.

Подальша обробка модуля відбувається на 5-осьовому верстаті з ЧПК портального типу Zimmermann FZ33. Розміри робочої зони верстата: 2500x4000x1500 мм, швидкість обертання шпинделя до 30000 об/хв.



Рис. 1.3.10. Zimmermann FZ33

Рожевим кольором позначені поверхні, які повинні бути оброблені та для яких створюється керуюча програма для верстата.

Таким чином вдається забезпечити точність контуру в глобальній системі координат автомобіля. Для забезпечення точності кріплення для кронштейна також передбачені додаткові пластини для калібрування блоку після встановлення за трьома координатами.

Розділ 2. Дослідження точності складання модуля фари

2.1. Опис проблеми

Так як зварна рама є досить великогабаритною та точність розмірів для обробки призначається за ISO 2768 fine [1], місце встановлення модуля на раму не досягає потрібної точності. Це унеможлиблює обробку модуля окремо від стійки на меншому верстаті. Рішенням стає обробка всього модуля після складання зі стендом, проте є декілька суттєвих недоліків щодо самої модульності, а також використання великого верстата, такого як Zimmermann FZ33, для обробки модуля безпосередньо на стійці, хоч і технічно можливо, є недоцільним з точки зору вартості, доступності обладнання та впливу на ефективність виробничого процесу.

1. Неможливість заміни

При потребі заміни чи модифікації самого модуля, доведеться знову обробляти новий модуль в зборі. А так як вся стійка відправляється замовнику, модульність практично зникає, так як заміна лише одного модуля стає неможливою.

2. Необхідність доступу для обробки всіх поверхонь

Зникає можливість обробити поверхню, до якої може бути недостатньо доступу для інструменту, так як обробка модуля окремо від рами неможлива. Це створює додаткові обмеження при проектуванні модуля, а також складності для калібрування.

3. Висока вартість

Zimmermann FZ33 — це преміальний 5-осьовий порталний фрезерний верстат, який зазвичай використовують для обробки великих деталей з високою точністю, таких як компоненти для авіації або кузова автомобілів. Використання такого дорогого обладнання для обробки

відносно невеликих компонентів, як модуль задньої фари, є економічно недоцільним. Крім високої вартості самого верстата, також значні витрати на його обслуговування та експлуатацію.

4. Неефективне використання ресурсів

Потужність FZ33 значно перевищує потреби, необхідні для обробки модуля задньої фари. Цей верстат розроблений для роботи з великими пристосуваннями, що робить його надто великим для таких завдань. Використання такого обладнання для менших деталей призводить до менш ефективного використання верстата, адже він займатиметься деталями, які могли б оброблятися на меншому обладнанні, залишаючи інші великі деталі в черзі.

5. Просторові обмеження та знижена гнучкість

Великі верстати, як FZ33, займають значну площу, що обмежує гнучкість на виробництві. Установка та обробка малих деталей на великому верстаті не лише споживає дорогоцінний виробничий простір, але й знижує доступність цього обладнання для задач, що дійсно потребують його унікальних можливостей. Велика стійка також обмежує варіанти використання інших верстатів, що звужує гнучкість у випадку, коли потрібно обробляти різні типи деталей.

6. Тривалий час налаштування та переобладнання

Обробка малих деталей на великому фіксаторі може вимагати значного часу на налаштування для правильної фіксації та калібрування верстата для потрібної точності модуля фари. Крім того, великі верстати, такі як FZ33, часто мають довший час на переналаштування через складність їх конфігурації. Цей додатковий час може підвищити виробничі витрати і знизити загальну продуктивність робіт з обробки на ЧПУ.

2.2. Аналіз допусків при складанні

2.2.1. Метод аналізу допусків при складанні

Геометричні допуски призначені для обмеження допустимих геометричних відхилень деталі (рис. 1.5.1а). Поверхні деталі не є ідеальними, як показано на рис. деталі не є ідеальними, як показано на рис. 1.5.1б. Геометричні відхилення суттєво впливають на функціональність та якість механізму не тільки через накопичення геометричних відхилень, але й через фізичну поведінку поверхонь, що сполучаються. Поверхонь, що сполучаються. Як показано на рис. 1.5.1г, д, вплив взаємодії між локальною контактною деформацією і геометричними відхиленнями на штабелі відхилень не є незначними, особливо при прикладенні монтажного навантаження. Фактичні точки контакту фактичні точки контакту зміняться після прикладання навантаження межа. Зі збільшенням додаткового навантаження точки контакту піддаються, і відносно положення поверхонь, що сполучаються знову змінюється. Запропонований метод має на меті підвищити достовірність аналізу допусків шляхом моделювання комбінованого впливу геометричних відхилень і контактної деформації.

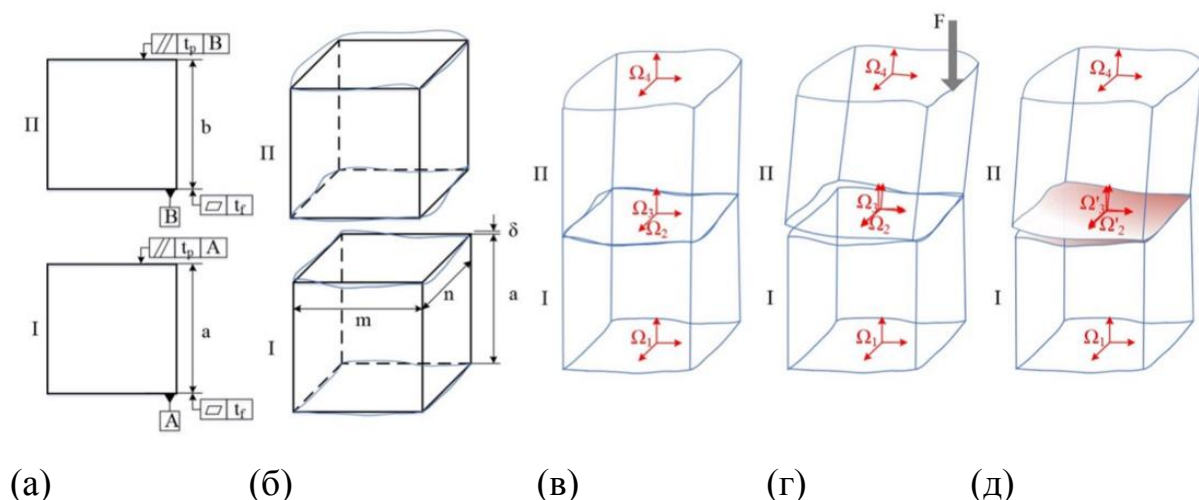


Рис. 2.2.1. Процедура складання з дефектом форми та умовами навантаження

Основні процедури запропонованого методу аналізу допусків пропонованого методу аналізу допусків проілюстровано на рис. 1.5.2 Для об'єднання геометричних відхилень у симуляції збірки, моделі поверхонь (МП) деталей були згенеровані на основі допусків на форму, розташування та орієнтацію. Аналіз допусків проводився за допомогою повного моделювання збірки на основі методу Монте-Карло. З точки зору геометричних відхилень метод квадратичної оптимізації був використаний для моделювання багатотільної збірки на основі МП та визначення взаємного розташування поверхонь, що сполучаються. Точки контакту несуть додаткове навантаження і додатково деформуються, як це пояснюється теорією контакту Герца. Згодом взаємне розташування деталей буде ще більше змінюватися під впливом контактних деформацій. Якщо з'являються нові точки контакту, виконується ще одна ітерація квадратичної оптимізації з деформованою МП та зменшеним навантаженням. Після того, як всі навантаження збалансовано, ітерація зупиняється, і деталі збираються. Після повторення наведеної вище симуляції складання кілька разів, тобто моделювання за методом Монте-Карло, можна оцінити остаточний розподіл відхилень при складанні для аналізу допусків.

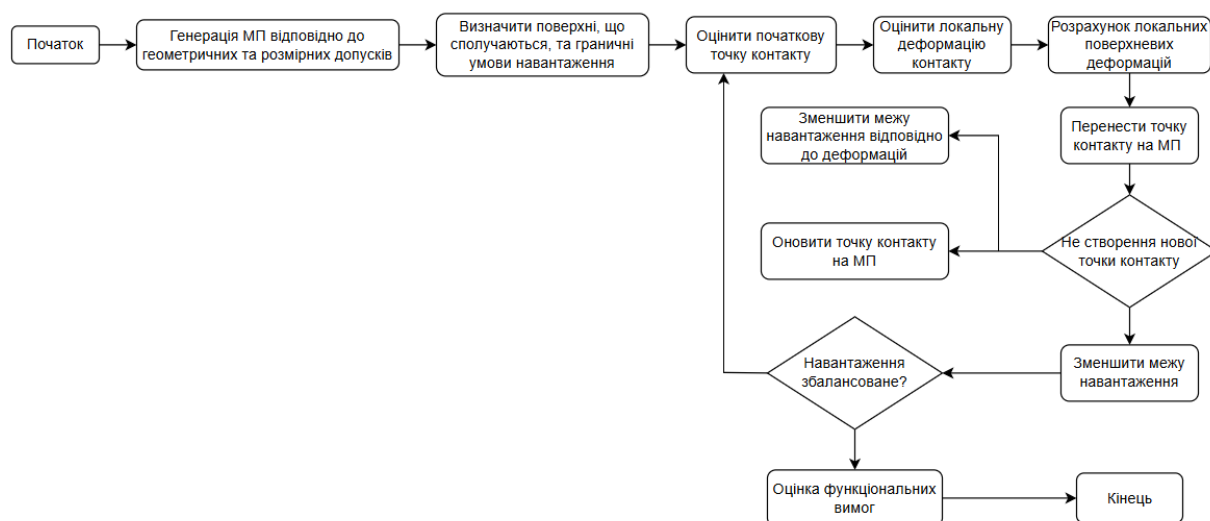


Рис. 2.2.2. Загальна процедура запропонованого методу

2.2.2. Математичне моделювання поверхонь в залежності від допусків

Загалом, геометричні відхилення є комбінацією систематичних і випадкових відхилень. Характер систематичних відхилень є детермінованим, передбачуваним і відтворюваним [2]. На відміну від них, випадкові відхилення спричинені непередбачуваними коливаннями виробничого процесу. Розроблений допуск може обмежити геометричні відхилення для контролю якості та функціонування збірки. У цьому випадку перевага надається використанню МП для створення репрезентативних профілів поверхонь, що наближаються до реальних поверхонь.

МП для моделювання геометричних відхилень можуть бути створені або за допомогою математичних підходів, таких як форми другого порядку і метод випадкових полів [3], або в результаті моделювання виробничого процесу або вимірювань прототипів деталей [4]. Таким чином, наступний підхід полягає в тому, щоб забезпечити відповідність еквівалентної поверхні МП заданим допускам. Першим кроком генерації МП є сегментація для обробки кожної поверхні незалежно. До кожної поверхні додаються геометричні відхилення, які генеруються відповідно до заданих допусків.

Різні допуски обмежують різні типи геометричних характеристик, наприклад, допуски форми, які обмежують внутрішні характеристики, і допуски орієнтації та розташування, які обмежують ситуаційні характеристики. За допомогою МП можна представити геометричні відхилення і додати їх до вихідної номінальної моделі. Тоді номінальна точка на поверхні МП відхиляється від свого ідеального положення p_i і стає «зміщеною точкою» p'_i зі зміщеним вектором Δ_i .

$$p'_i = p_i + \Delta_i$$

Як правило, зони допуску форми покриваються зонами допуску орієнтації, які, в свою чергу, покриваються зонами допуску розташування [5]. Після цього кожна дискретна поверхня геометричних МП масштабується відповідно до допуску розташування, потім допуску орієнтації і, нарешті, допуску форми. допуск на форму.

На прикладі куба на рис. 1.5.1а, кожен зміщений вектор відхилення жирності t_f можна оцінити наступним чином:

$$\Delta_i = \mathbf{n} \times \mathbf{r} \cdot \lambda_i t_f / 2$$

$$s. t. \max(-t_f/l_y, -t_f/l_x) \leq \frac{|\mathbf{n} \times \mathbf{r}|}{|\mathbf{n}||\mathbf{r}|} \leq \min(t_f/l_y, t_f/l_x)$$

де $\mathbf{n}$ - вектор нормалі до номінальної поверхні, $\mathbf{r}$ - вектор обертання, а λ_i - випадковий коефіцієнт, що генерується в діапазоні $[-1, 1]$. Обертання $\mathbf{n}$ обмежено між t_f/l_x та t_f/l_y , де l_x та l_y - довжина та ширина, відповідно, прямокутної поверхні.

Зсув вектора відхилення паралельності t_p можна знайти наступним чином:

$$\Delta_i = \mathbf{p}_i^{\text{ref}} + (b + \lambda_i t_p) \mathbf{n} - \mathbf{p}_i$$

де $\mathbf{p}_i^{\text{ref}}$ - точка відображення на асоційованій площині опорного елемента, а $\mathbf{b}$ - нормальна відстань між цією асоційованою площиною та опорним елементом. На основі вектора зсуву можна змоделювати геометричне відхилення на кожній поверхні.

Після трьох кроків - сегментації, додавання геометричного відхилення та рекомбінації, як показано на рис. 1.5.3, - генерується МП із заданим допуском. Геометричне відхилення приєднується до номінальної поверхні за допомогою зміщеного вектора в кожній точці зразка. Неплощинність МП на наступних рисунках була масштабована для зручності перегляду геометричних відхилень.

2.2.3. Метод симуляції складання

На поверхнях, що сполучаються, контактна деформація і відносне положення залежать один від одного. Точки контакту визначаються відносним положенням поверхонь, що сполучаються; однак, відносне положення поверхонь, що сполучаються, змінюється залежно від контактної деформації. Для прискорення розв'язання задачі відносного положення, МП вважається жорсткою. Для розрахунку початкових точок контакту між двома поверхнями обшивки використовується теорія малих переміщень торсора для переміщення жорсткого тіла. У цій теорії переміщення поверхні, виражене в центральній точці, має вигляд наступним чином:

$$SDT = [r \ t]^T = [\alpha \ \beta \ \gamma \ u \ v \ w]^T$$

де r і t - обертання і переміщення твердого тіла відповідно. r містить три кути повороту α , β і γ навколо напрямків x , y і z відповідно. u , v і w - переміщення вздовж напрямків x , y і z відповідно.

У галузі метрології та допусків переміщення зазвичай дуже малі і, як правило, лінеаризуються. Для будь-якого нормального вектора $n_{j,i}$ дискретної поверхні S_j після переміщення жорсткого тіла його напрямок змінюється наступним чином:

$$n'_{j,i} = n_{j,i} - n_{j,i} \times r_j$$

Відстань між поверхнями, що сполучаються, є суттєвим для знаходження початкових точок контакту. Для вершини $A_{j,i}$ на поверхні S_j вона проектується на найближчу проекцію $A_{j+1,i}$ на S_{j+1} вздовж напрямку нормалі цього відрізка ($n_{j+1,i}$), як показано на Рис. 1.5.4. Відстань $d_{j,i}$ між точками $A_{j,i}$ та $A_{j+1,i}$ можна виразити наступним чином:

$$\begin{aligned} d_{j,i} &= \overrightarrow{A_{j+1,i}A_{j,i}} \cdot n_{j+1,i} \\ d'_{j,i} &= [n_{j+1,i} \times \overrightarrow{A_{j,i}C_j} n_{j+1,i} \overrightarrow{A_{j+1,i}C_{j+1}} \times n_{j+1,i} - n_{j+1,i}] \\ &\cdot [r_j \quad t_j \quad r_{j+1} \quad t_{j+1}]^T + d_{j,i} = \alpha \cdot \begin{bmatrix} SDT_j \\ SDT_{j+1} \end{bmatrix} + d_{j,i} \end{aligned}$$

де C_j та C_{j+1} - центральні точки S_j та S_{j+1} , відповідно.

Для всієї збірки обмеження на відстані можна реорганізувати у матричній формі наступним чином:

$$d' = A \cdot \text{SDTs} + d$$

Завдяки припущенню про жорстке тіло, між поверхнями, що сполучаються, взаємопроникнення між поверхнями, що сполучаються, не відбувається. Таким чином, $d'_{j,i}$ повинні бути більшими або рівними нулю.

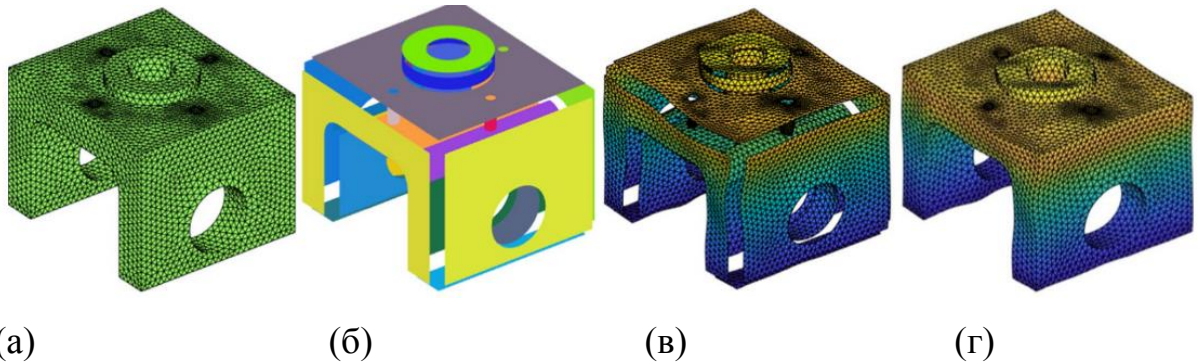


Рис. 2.2.3. Процеси генерації МП: а) номінальна сіткова модель; б) номінальна модель після сегментації; в) геометричне відхилення, прикріплене до кожної поверхні; г) комбінована форма моделі

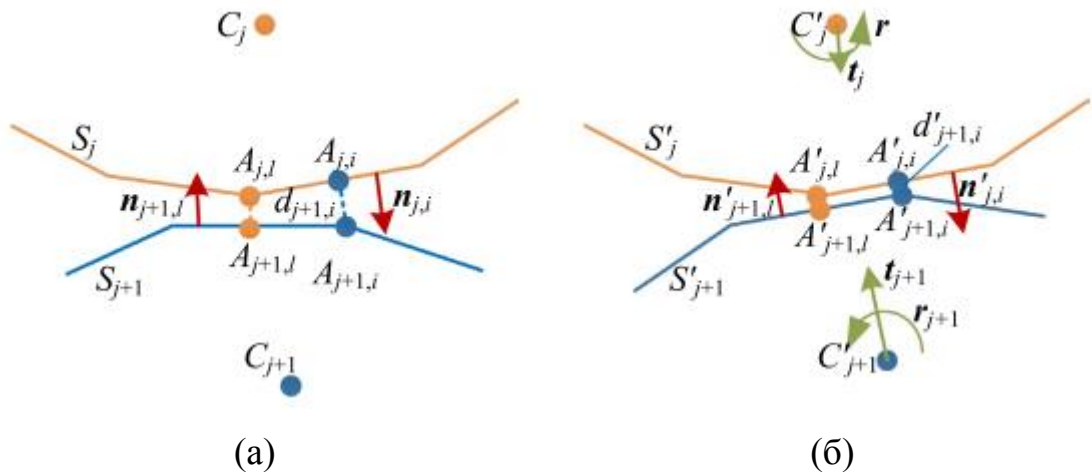


Рис. 2.2.4. Поверхні спряження МП та відносні переміщення у 2D: а) до переміщення; б) після переміщення

2.2.4. Статистичний розподіл відхилення збірки

Метою є порівняння накопичених відхилень при складанні деформованих поверхонь, що сполучаються, і недеформованих поверхонь. Аналіз допусків на основі методу Монте-Карло був проведений для того, щоб показати вплив геометричних відхилень і локальних контактних деформацій на відхилення збірки. Розглядалася збірка, названа RGB (рис. 1.5.5), яка складалася з трьох плоских деталей. Допуски поверхонь, що сполучаються, становили 0,3 мм. Між гранями Gr та B8 було визначено функціональну вимогу ($X=100+1,5$ мм). Відповідно до геометричних допусків всі реалістичні конфігурації з дефектами деталей були представлені у вигляді МСЕ згідно з представленим методом. Моделювання методом Монте-Карло було проведено 1000 разів, щоб показати, як геометричні відхилення та локальні контактні деформації впливають на значення функціональної вимоги X.

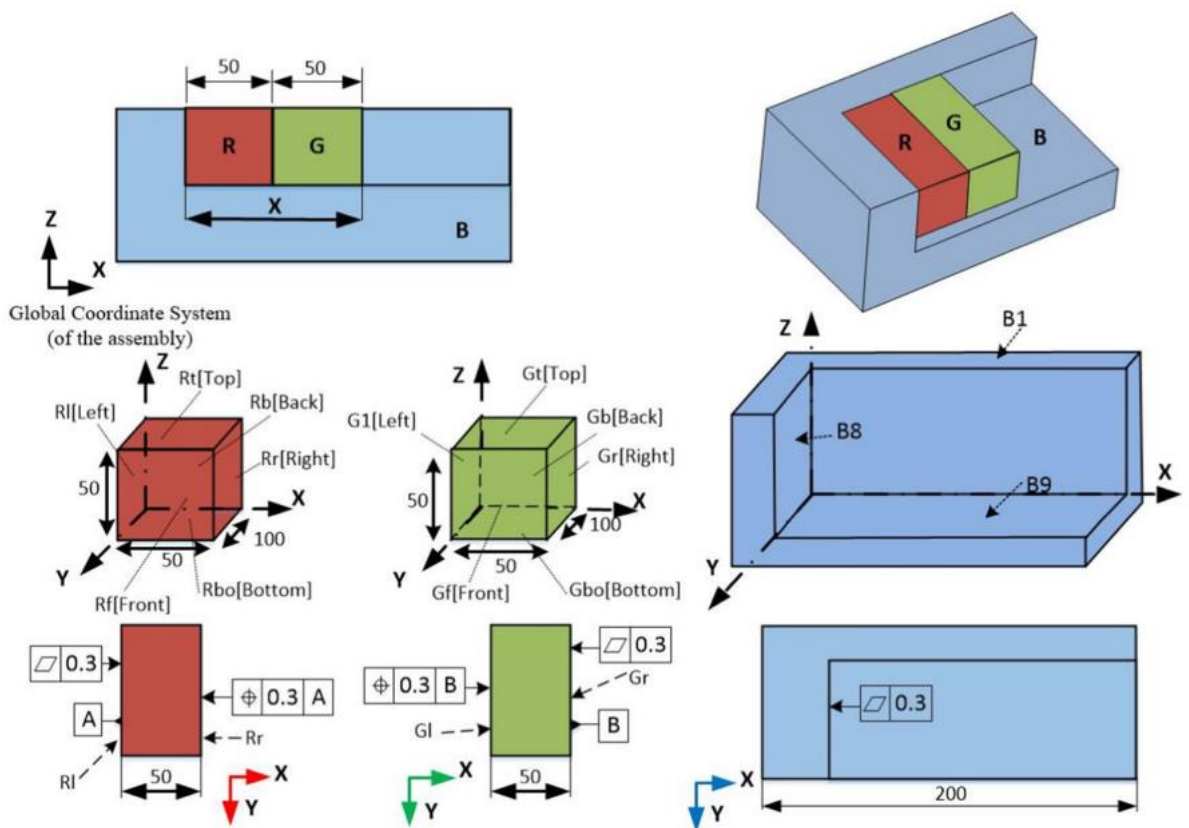


Рис. 2.2.5. Номінальна збірка RGB

Розподіл X за результатами 1000 симуляцій показано на рис. 1.5.6. Аналіз допусків, використовуючи початкові значення допусків ($t_p=0,3$ мм і $t_f=0,3$ мм) і враховуючи деформацію деталі, показав, що X відповідає функціональним вимогам.

Щоб показати вплив контактної деформації, розподіл X був розрахований без контактної деформації з тих же 1000 прогонів моделювання. Контактні деформації мали значний вплив на X , що свідчить про те, що в цьому прикладі вплив контактної деформації був значним. Цей результат підтвердив наше початкове припущення. Однак, оскільки поверхні, що сполучаються, були потовщені зусиллям складання, значення допуску може бути визначене в більшому діапазоні, ніж при традиційному підході, що також гарантує, що X задовольняє функціональним вимогам. Більше того, більший допуск може значно зменшити виробничі витрати. Зокрема, у випадку збірки з великою кількістю компонентів ефект, безумовно, буде більш значним.

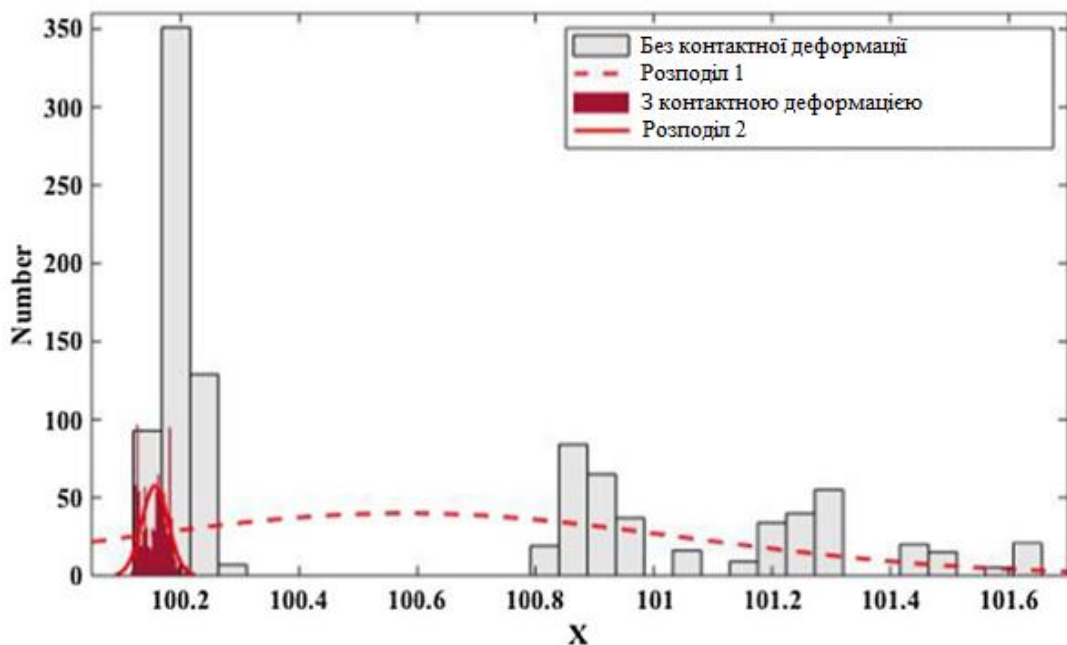


Рис. 2.2.6. Порівняння розподілу f_t для X з контактною деформацією та без

2.3. Використання зварних просторових конструкцій

Використання легких рамних конструкцій з екструдованих алюмінієвих профілів є значним внеском у зменшення ваги. Індивідуальні вимоги клієнтів, а також нові концепції приводів призводять до поділу кількості деталей на кілька варіантів і, отже, все частіше призводять до дрібносерійного виробництва цього виду просторових рамних конструкцій. Завдяки використанню інноваційних процесів і дрібносерійному виробництву, під час виготовлення окремих профілів зазвичай виникають великі відхилення. Ці відхилення є серйозним викликом для точного та автоматизованого складання. У цій статті буде представлено метод компенсації відхилень, пов'язаних з виробництвом, при складанні просторово-рамних конструкцій. Загальний підхід полягає в механічній обробці торцевих сегментів. На першому етапі буде проаналізовано цільову структуру. На основі цього аналізу всі профілі класифікуються відповідно до їх ступенів свободи і пов'язаної з ними придатності до компенсації. Відхилення, що виникають, стають видимими на ранній стадії шляхом порівняння їх з фактичними виміряними даними профілю. На основі цього можна визначити стратегію компенсації наявних відхилень. Таким чином, реалізація кореляцій у гнучкому середовищі дозволяє оптимізувати окремі профілі за різних базових умов, що призводить до підвищення точності просторово-рамної конструкції, яку необхідно зібрати.

Легкі просторово-рамні конструкції з екструдованих алюмінієвих профілів сьогодні все частіше використовуються в автомобілебудуванні та авіабудуванні. Використання таких полегшених концепцій також відіграватиме вирішальну роль у майбутньому, коли мова йтиме про зменшення споживання палива [6]. Це призводить до більшої різноманітності продукції, а отже, до розбиття загальної кількості на велику кількість різних варіантів. Таким чином, виробничий процес все більше

зміщується в бік дрібносерійного виробництва [7]. Підходи до автоматизації виготовлення просторово-рамних конструкцій для дрібносерійного виробництва можуть бути адаптовані до великомасштабного виробництва лише в дуже обмеженій мірі, оскільки необхідна висока гнучкість та адаптивність виробничих потужностей. Тому метою роботи є розробка наукових методів і принципів для автоматизованого і гнучкого до вимог замовника дрібносерійного виробництва легких просторово-рамкових конструкцій. Основна увага приділяється процесу «екструзії криволінійного профілю». За допомогою цієї технології можна виготовляти багатовимірні криволінійні профілі за одну технологічну операцію. Окрім встановлення прототипу технологічного ланцюжка, розглядаються питання моделювання цих технологій, а також проектування та оптимізації просторово-рамкових конструкцій і пов'язаних з ними процесів.

Зокрема, збірка є одним з найбільш затратних етапів у дрібносерійному виробництві, а тому окремі процеси збірки повинні бути більш гнучкими та адаптивними [8]. Сьогодні дрібносерійні просторово-рамні конструкції здебільшого збираються вручну та за допомогою частково затратних пристроїв, які часто становлять 10-20 % від загальної вартості виробництва [9]. Вимоги до високої якості та відтворюваності під час складання просторово-рамної конструкції, що стосуються точного вирівнювання окремих профілів, а також виконання високоточних місць з'єднання, часто неможливо гарантувати при ручному процесі [10]. Тому автоматизоване складання без багатьох додаткових пристроїв повинно здійснюватися з урахуванням цих аспектів. Для того, щоб мінімізувати кількість використовуваних профілів, геометрія окремих профілів стає все більш складною [11]. Однією з можливостей виробництва армованих і неармованих складних тривимірних профілів є використання процесу

«екструзії криволінійних профілів». При використанні таких нових та інноваційних виробничих процесів можуть виникати підвищені відхилення від цільової геометрії окремих компонентів, оскільки виробничі процеси загалом схильні до варіацій і тому ніколи не можуть вважатися досконалими [12]. Ці відхилення посилюються тим, що запуск процесів підвищення стабільності здебільшого неможливий для невеликих партій або можливий лише в обмеженому обсязі. Існуючі відхилення окремих профілів у процесі складання можуть збільшуватися настільки, що автоматизоване, малонапружене і в основному безприладне складання стає неможливим. Через частково великі розміри окремих профілів та їх складну геометрію, навіть невеликі локальні похибки щодо точності контуру та довжини можуть призвести до великих відхилень при складанні конструкції. Оскільки наявні похибки точності здебільшого стають помітними лише в процесі складання або на готових виробах [13], що призводить до подальших, а отже, економічно не вигідних подальших робіт, бажаними є заходи з раннього виявлення та усунення можливих похибок. Ці заходи можуть здійснюватися на різних етапах технологічного ланцюжка. Однією з можливостей мінімізації помилок і підвищення економічної ефективності в процесі складання є використання підходів проектування для складання (DFA). Тут ідеальна форма компонентів за різних умов визначається за допомогою різних методів [14], що призводить до більш надійних процесів і, таким чином, до підвищення точності під час складання. Основою для простого і точного складання, а також для процесу проектування для складання є аналіз і синтез допусків, що узагальнюється терміном «управління допусками» (Tolerance Management). За допомогою цих аналізів забезпечується функціональність між окремими компонентами. Вони пропонують ефективну процедуру оцінки допусків і визначення їх таким чином, щоб забезпечити відповідність вимогам в

рамках збірки, зберігаючи при цьому витрати під контролем. Ці підходи до мінімізації впливів, що спричиняють відхилення, є недостатніми, залежно від сфери застосування, оскільки через технологічний процес не всі впливи, а отже, і відхилення, можуть бути виявлені [15]. Тому підходи, які стосуються виявлення та компенсації відхилень у компонентах, стають все більш важливими у складних виробничих процесах.

2.4. Загальний підхід

Загальною можливістю компенсації відхилень, спричинених виробництвом екструдованих профілів з декількома вигинами, є механічна обробка кінців цих профілів. Вкорочуючи початок і кінець профілю, а також вставляючи скошені краї, профіль можна відрегулювати в просторі відповідно до використовуваної технології з'єднання. На рисунку 1 це схематично показано на прикладі двовимірного вигнутого профілю, який закріплений на панелі. На реальному профілі (рис. 1, ліворуч) видно відхилення довжини та радіуса кривизни порівняно з цільовим контуром. Обрізавши початок і кінець профілю та відрегулювавши кут на початку профілю, оптимізований профіль (Рис. 1, праворуч) можна вирівняти в просторі таким чином, щоб звести до мінімуму відхилення кінцевих точок і контуру. Таким чином, профілі можуть бути адаптовані індивідуально, а точність просторово-рамкової конструкції може бути підвищена. На основі даних виміряних профілів за допомогою віртуальної збірки можна визначити відхилення окремих профілів і, таким чином, всієї конструкції. Згодом, після оптимізації профілів, можна генерувати дані обробки. Якщо в будь-якому випадку необхідна подальша обробка, наприклад, вставка вирізів, то тут є ефективний інструмент для підвищення точності, оскільки інтеграція ще одного етапу обробки має лише незначний вплив на загальний час процесу. У наступних поясненнях буде представлено методичну процедуру для визначення даних обробки та підвищення точності при

складанні просторово-рамкової конструкції. Фундаментальні можливості компенсації пояснюються на основі аналізу цільової структури. Після цього буде розроблено стратегію оптимізації окремих профілів. Застосовуючи знайдені таким чином кореляції, можна отримати дані обробки для конкретно виміряних профілів і перевірити загальну методологію. Основна увага зосереджена на гнучкому виготовленні просторових каркасних конструкцій з алюмінієвих профілів. Тому наступні пояснення стосуються саме цих алюмінієвих профілів. Описаний підхід також може бути застосований до профілів, а отже, і до просторових каркасних конструкцій, побудованих з інших матеріалів.

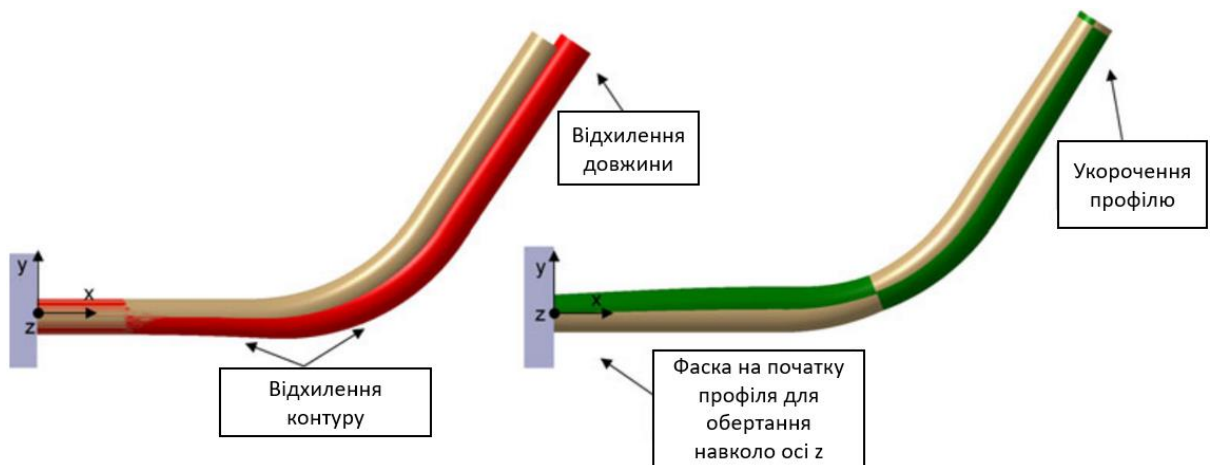


Рис. 2.4.1. Загальний підхід до компенсації відхилень шляхом обробки торців профілю

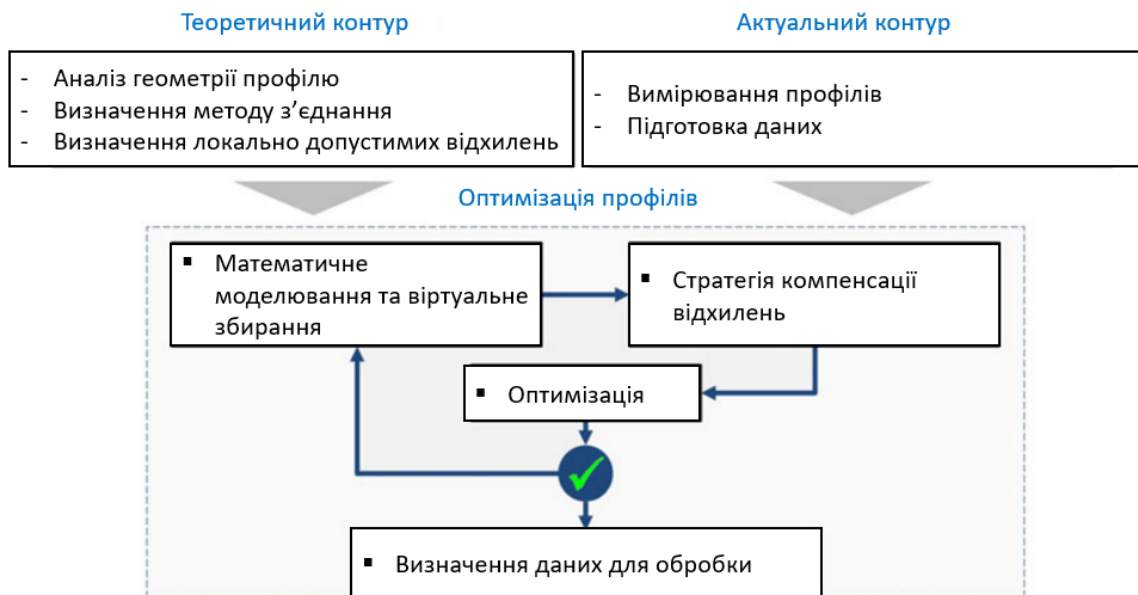


Рис. 2.4.2. Послідовність компенсації відхилень, пов'язаних з виробництвом, для каркасно-рамкових конструкцій

2.5. Метод компенсації

Методична процедура компенсації виробничих відхилень на просторово-рамній конструкції показана на рис. 2 і включає шість етапів:

1. За допомогою теоретичного контуру визначаються всі профілі, а також всі типи технологій з'єднання і, отже, всі ступені свободи для профілів. Крім того, визначаються всі геометричні характеристики і всі області з певними допустимими відхиленнями.
2. Щоб мати можливість порівняти теоретичний і фактичний контур, необхідно мати фактичні дані всіх окремих профілів. Тому на другому етапі необхідно виконати вимірювання всіх профілів. Залежно від вимірювальної системи може знадобитися підготовка даних.
3. Математичне моделювання, яке містить моделювання окремих профілів, а також кореляції між теоретичним і фактичним контуром, слід розуміти як етап всього процесу. Таким чином,

фактично третій крок містить віртуальну збірку фактичного контуру. Порівняння з теоретичним контуром дозволяє узагальнити помилки, спричинені відхиленнями окремих профілів.

4. Враховуючи основні умови, які є результатом реального процесу складання, необхідно розробити стратегію просторової адаптації профілів. Це, по суті, означає визначення порядку, в якому профілі будуть згодом оптимізовані. Очевидно, що порядок завжди повинен йти від профілів з низьким числом DOF до профілів з високим числом DOF, щоб забезпечити максимальну можливість «закриття» конструкції.
5. На п'ятому кроці виконується оптимізація окремих профілів за допомогою інструменту оптимізації, реалізованого для цієї мети. Всі профілі оптимізуються з точки зору їх просторового вирівнювання відносно теоретичного контуру в порядку, визначеному на четвертому кроці. Фактична оптимізація здійснюється на основі методу найменших квадратів. Використовуючи цей підхід, можна врахувати всі різні типи відхилень змінних. Крім того, для розрахунку компенсації не потрібен прототип деталі. Всі розрахунки можуть бути виконані безпосередньо з готовими профілями, необхідними для складання.
6. Після досягнення заданої точності, дані обробки для окремих профілів будуть остаточно розраховані на останньому етапі.

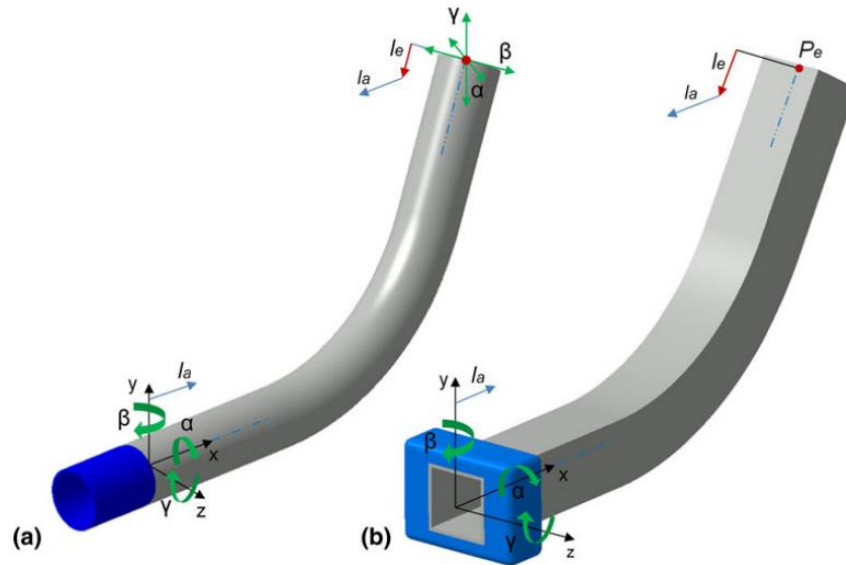


Рис. 2.5.1. Ступені вільності двовимірного круглого профілю а та квадратного профілю б

3.1. Теоретичний контур

За допомогою теоретичного контуру можна визначити всі дані, які є важливими для подальшої оптимізації профілів. Ці дані містять всю інформацію про всі профілі, які з'являються в просторово-рамковій структурі. Наприклад, це контур профілю, поперечний переріз профілів, а також геометрична інформація, така як кінцеві точки і локальні області, які повинні відповідати визначеним вимогам точності. Крім інформації про профіль, визначаються всі використані технології з'єднання, які представляють собою з'єднання між окремими профілями. Наприклад, визначається, чи з'єднані два профілі за допомогою з'єднання «профіль-стик» або безпосередньо за допомогою з'єднання «профіль-профіль», оскільки ця інформація впливає на ступені свободи для кожного окремого профілю (Рис. 3). Завдяки цій інформації доступні всі ступені свободи щодо можливої обробки кінцевих ділянок. Двовимірний профіль з круглим поперечним перерізом у з'єднанні профіль-профіль має п'ять ступенів свободи (DOF). Це максимальна кількість DOF для просторового регулювання (Рис. 3а)

Видно, що всі зміни на початку і в кінці профілю впливають на вирівнювання профілю. Крім того, профіль можна повертати навколо всіх трьох осей на кути α , β і γ , і таким чином можна визначити просторовий кут, який зміщує контур, а разом з ним і кінцеву точку. На відміну від цього, прямокутний двовимірний профіль у з'єднанні «профіль-шарнір» (рис. 3б) має лише два примикання Табл. DOF. Завдяки прямокутному поперечному перерізу і з'єднанню «профіль-шарнір», очевидно, що поворот профілю неможливий. Тому доступні лише два поступальні ступені свободи.

Цей аналіз може бути проведений для кожного профілю і кожного типу з'єднання в заданій просторово-рамній конструкції. Якщо підсумувати ступені свободи, з'являються різні класи профілів з точки зору придатності для оптимізації. Ці різні характеристики мають значення, оскільки помилка при замиканні конструкції повинна бути компенсована профілем, який має максимальну кількість DOF.

Складову частину демонстраційної конструкції показано на рис. 4а. Загалом вона складається з восьми прямокутних профілів, тоді як профілі 1, 3, 7 і 8 є двовимірно вигнутими.

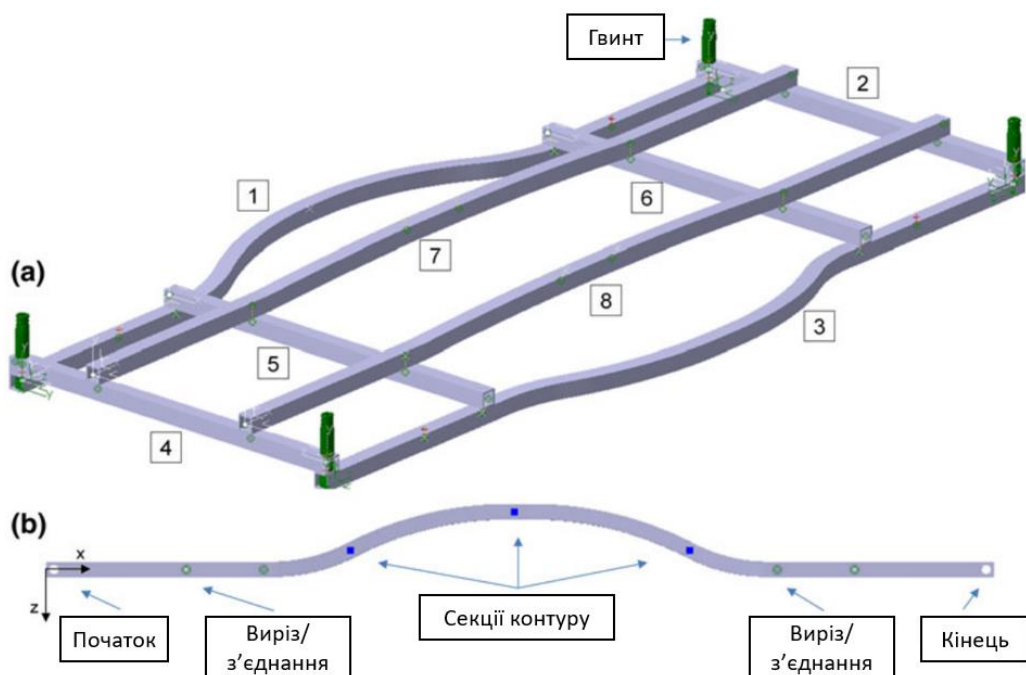


Рис. 2.5.2. Досліджувана конструкція

На основі цієї структури можна зчитувати цільові параметри і зберігати їх у базі даних. Для наведеного вище прикладу структури виникають такі параметри та значення:

- Зовнішня структура профілів 1-4 утворює основну конструкцію. Всі з'єднання виконані у вигляді зварних швів, а профілі додатково закріплені болтами. Крім укорочення кінців профілю, осі y і z можуть бути визначені як змінні параметри для повороту. Обертання навколо осі z слід уникати з теоретичної точки зору, оскільки метою при використанні з'єднання є рівна опорна поверхня. Оскільки профілі показують відхилення в напрямку y , цей стан не буде досягнутий під час складання. Тому цей поворот також можна використовувати для компенсації.
- Профілі 5-8 також виконані за допомогою зварних з'єднань, але не закріплені болтами. Укорочення та осі обертання y і z також є змінними параметрами. У цьому контексті профілі утворюють кріплення для зовнішньої конструкції.
- Перерізи, що враховуються для оптимізації, відрізняються залежно від профілю. Нарешті, враховується кінцева точка для кожного профілю, а також точки або, точніше, ділянки з просвердленими отворами або з підключеними до них іншими профілями. Ці дані зчитуються і зберігаються в локальній системі координат. Приклад областей для першого профілю наведено на Рис. 4b.

Потім ця інформація буде перенесена в базу даних і буде постійно доступна як цільові дані для оптимізації.

3.1. Фактичний контур

Дані вимірювань профілів слугують вхідними параметрами. Вимірювання можна проводити за допомогою різних вимірювальних систем. У розглянутому випадку профілі були виміряні за допомогою координатно-вимірювальної руки компанії FARO Technologies. В якості

вхідних даних доступні діаграми розсіювання різних профілів, які повністю описують профіль в системі координат i , в кінцевому підсумку, показують напрям профілю. Кількість точок повинна, таким чином, відображати точність верстата, на якому профілі будуть остаточно оброблені. При необхідності можна апроксимувати більше точок вздовж напрямної профілю. У наведеному вище прикладі середня відстань становить приблизно 0,15 мм. Дані фактичних профілів згодом зчитуються в інструмент для оптимізації просторово-рамкової структури і присвоюються цільовим даним.

На рис. 5 теоретична структура порівнюється з виміряною фактичною структурою. При цьому профілі об'єднуються у вузлових точках у глобальній системі координат. Ті профілі, які утворюють зовнішню і замкнуту каркасну структуру, завжди встановлюються в кінцеву точку сусіднього фактичного профілю. Профілі, що представляють стійки конструкції, вже встановлюються в точку, яка вже має мінімальну відстань до цільової точки на реальній конструкції.

Стає очевидним, що всі профілі мають відхилення по довжині, а щодо глобальної КС - відхилення у від'ємному напрямку осі u .

Тут слід зазначити, що профілі 1 і 3 були навмисно виготовлені з великим відхиленням по довжині. Таким чином, ці похибки не слід розуміти як репрезентативні для виробничого процесу «екструзії криволінійного профілю». Крім цього відхилення по довжині, з даних видно, що існує відхилення в напрямку u , а також похибка в напрямку z , спричинена радіусною аберацією. Через довжину профілю 3 050 мм ці - локально видимі - невеликі похибки спричиняють високе відхилення кінцевих точок, що, з можливим додаванням похибок, перешкоджає замиканню конструкції з низьким напруженням.

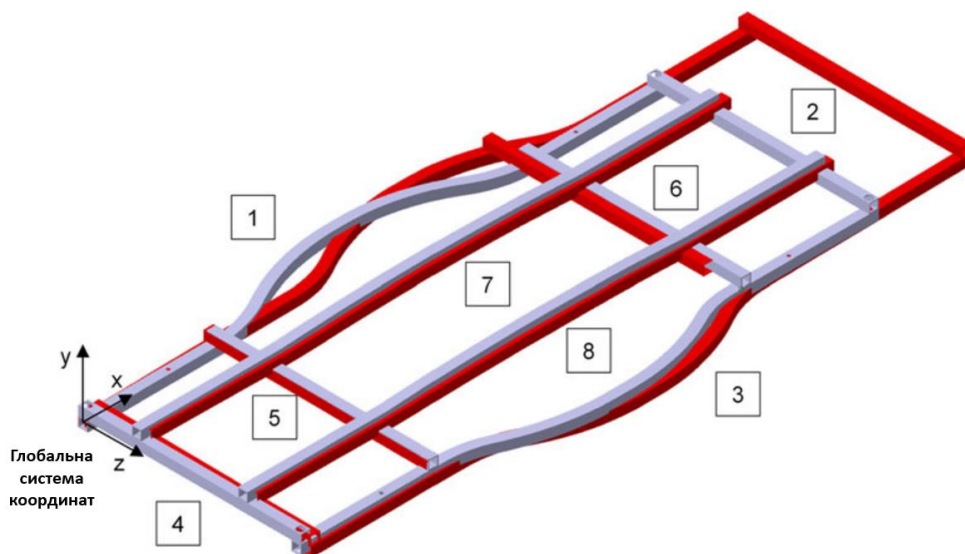


Рис. 2.5.3. Зіставлення даних цільової та фактичної (черв.) структур

3.1. Оптимізація профілів

Кореляції між цільовими та фактичними даними, а також алгоритми розв'язання власне оптимізаційної задачі були реалізовані в програмі Matlab. Інструмент для оптимізації профілів складається з двох областей. В області вводу можна ввести всі цільові та фактичні дані і призначити їх. Ця віртуальна конструкція відображається на екрані і дозволяє розрахувати і зобразити всі відхилення профілю. Друга область є власне інструментом оптимізації. Тут користувач може змінювати порядок оптимізації або параметри, враховуючи основні та граничні умови. У реалізованому інтерфейсі відображається різноманітна інформація про структуру, а також численні альтернативи щодо оптимізації окремих профілів. Крім того, всі відхилення відображаються в початковому стані, так що профілі, які є достатньо точними і не потребують подальшої оптимізації, можуть бути проаналізовані. Таким чином, користувач може вільно вибирати, які профілі відображати при оптимізації. Після кожної оптимізації одного профілю дані про відхилення всієї структури розраховуються заново і оновлюються, щоб завжди мати можливість актуального порівняння даних. Перераховані дані про відхилення включають всі профілі і відстань між їх

кінцевими точками і відповідним цільовим профілем, а також всі точки (області) і відхилення між відповідним профілем і цільовим профілем. На Рисунку 6 показано зразкову структуру, а також отримані дані про відхилення щодо кінцевих точок для профілів 1-4 у початковому стані (а) і після оптимізації профілів 1 і 2 (б). Завдяки новому розрахунку всіх відхилень користувач має гнучку можливість безперервно аналізувати зміну відхилень і коригувати стратегію або параметри оптимізації перед наступним кроком.

Відхилення вибраних ділянок профілю також відображаються і розраховуються, а отже, можуть бути проаналізовані перед оптимізацією і після кожного кроку. В оптимізації можуть бути розглянуті всі ділянки профілю. Для цього вибираються відповідні точки, які потім оцінюються з коефіцієнтом від 0 до 1. На практиці це означає, що крім оптимізації відстані між кінцевими точками, можна гнучко враховувати точність контуру профілю, в залежності від існуючих умов. Наприклад, присвоївши вибраній точці коефіцієнт 1, ця точка повністю враховується в цільовій функції подальшої оптимізації.

Власне оптимізація профілю здійснюється на основі методу найменших квадратів. Загалом, це мінімізація функції, яка визначає суму квадратів за формулою:

$$\min_x \|F(x)\|_2^2 = \min_x \sum_i F_i^2(x)$$

У базовому випадку це квадрати відстані для тих точок, які були обрані для оптимізації. Додатково виконується ранжування квадратів відстані за допомогою коефіцієнта w_i (зі значенням від 0 до 1 для кожної обраної точки), який згодом масштабується на:

$$w_i = \frac{\tilde{w}_i}{\tilde{w}_i + \dots + \tilde{w}_n}$$

Після оптимізації профілів можна розрахувати дані для обробки. Ці дані складаються з відповідних значень довжини, на яку потрібно скоротити профіль на початку або в кінці, а також з трьох кутів, на які профіль повертається відносно цільового контуру. Ці три кути потім відповідають фаскам на початковій ділянці профілю. На завершення, дані можуть бути передані в CAD-систему або безпосередньо доставлені на верстат у відповідному форматі.

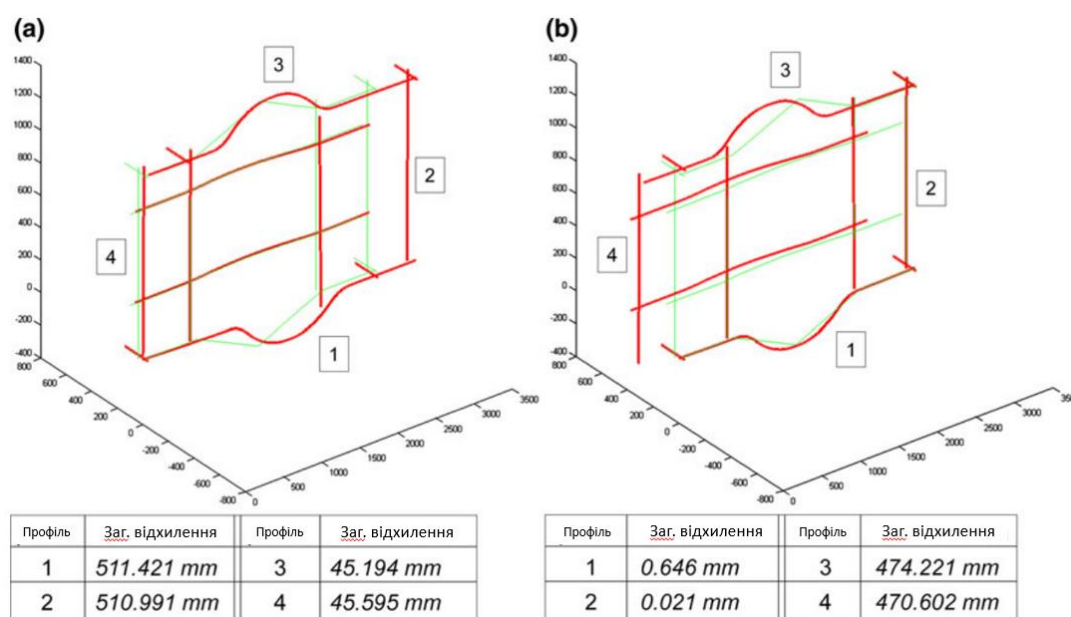


Рис. 2.5.4. Абстрактне відображення структури а) у початковому стані
б) після оптимізації профілю 1 та 2

2.6. Результати

Для валідації робіт було проаналізовано вузол демонстраційної конструкції за представленою методологією. Згодом виміряні профілі були оптимізовані за різних умов в реалізованому інструменті оптимізації. Вихідною та цільовою системою була CAD-система, в якій графічно зображувалася теоретична, фактична та оптимізована конструкція і в якій переглядалися параметри, що підлягали визначенню для обробки. На рисунку 5 порівнюються виміряні профілі цільової структури. Відхилення кінцевих точок профілів зображені в Табл. 1.

Табл. 1. Відхилення кінцевих точок всіх профілів

Підбірка початкового стану				
Профіль	Відхилення x, мм	Відхилення y, мм	Відхилення z, мм	Загальне відхилення, мм
1	510.544	-11.793	-27.521	511.4212
2	510.35	-15.052	-20.696	510.9912
3	37.502	-20.268	15.013	45.1949
4	41.185	-11.41	15.891	45.5951
5	-0.483	-6.192	-6.727	9.1557
6	51.534	0.455	-110.686	122.0957
7	38.843	-25.357	25.933	53.1439
8	36.085	-33.072	9.538	49.8684

Як показано на Рис. 5 вже ілюструє, профіль 1 і 3 навмисно показують велике відхилення довжини в напрямку x. Однак значення x знову вилучається для відхилень, які виникають при замиканні конструкцій профілем 1-4, оскільки профіль 1 і 3 мають різні знаки. Таким чином, стає очевидним, що саме контурні відхилення профілів, які розвиваються в напрямках y і z, призводять до помилок в точності. Величина, яка має першочергове значення для складання замкненої зовнішньої конструкції рами, є результатом додавання похибок. Таким чином, це відхилення профілю 4 від нульової точки. У даному випадку це значення становить 45,59 мм.

Після цього всі вісім профілів були оптимізовані з різними бічними умовами. Ступенями свободи всіх профілів були вкорочення профілю, а також обертання навколо осей y і z. Таким чином, для профілів 1 і 3 всі цікаві області (Рисунок 4) були інтегровані в оптимізацію в якості побічних умов. Точки, що забезпечують точність контуру, були оцінені з коефіцієнтом 0,7, а отвори для подальших з'єднань - з коефіцієнтом 0,5. Для профілів 7 і 8 в якості побічних умов розглядалися по три точки на контурі

з коефіцієнтом 0,6. Як вже було описано, коефіцієнт, за допомогою якого оцінюються вибрані точки, є мірою того, наскільки сильно ці точки враховуються при оптимізації. Значення, вибрані в цьому прикладі, не є спеціальними і можуть бути змінені індивідуально, залежно від того, наскільки сильно користувач хоче скоригувати весь контур, що означатиме вищі значення для вибраних точок. Всі подальші одновимірні профілі були оптимізовані без будь-яких додаткових побічних умов. Таким чином, цільова функція просто створюється відстанню між кінцевими точками.

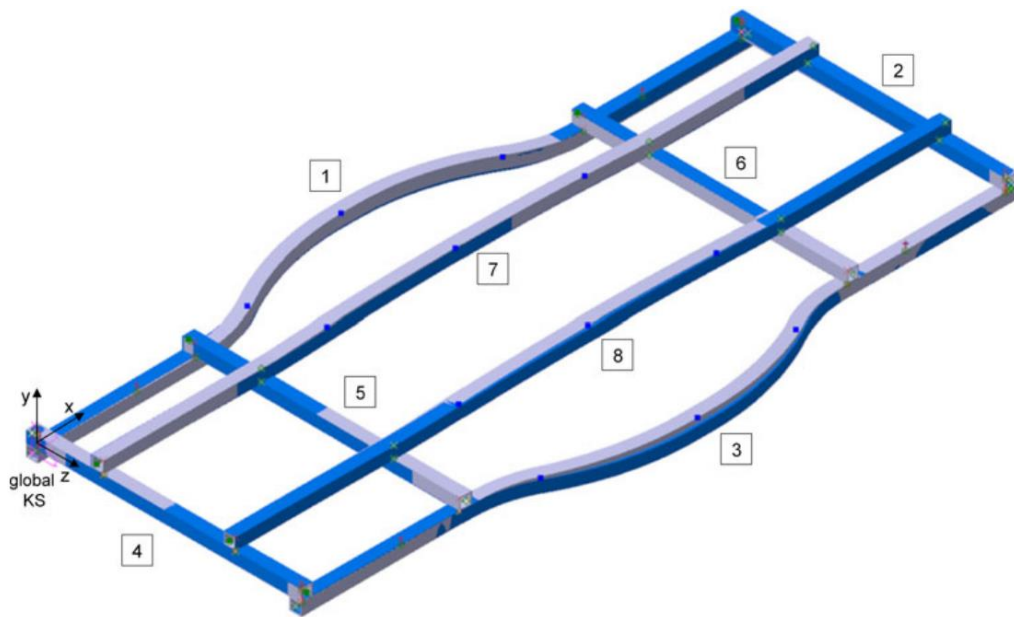


Рис. 2.6.1. Порівняння оптимізованої структури просторової рами (синій) з цільовою структурою

На рисунку 7 показано порівняння оптимізованої складальної групи з цільовою геометрією. Для цього цільові профілі були адаптовані в CAD-системі із заданими параметрами обробки, а потім віртуально з'єднані під розрахованими кутами.

Можна чітко помітити всебічне підвищення точності окремих профілів у порівнянні з початковою структурою (Рисунок 5). Значення відхилень кінцевих точок всіх профілів зображені в Табл. 2.

Табл. 2. Відхилення кінцевих точок всіх профілів після оптимізації

Підбірка після оптимізації				
Профіль	Відхилення x, мм	Відхилення y, мм	Відхилення z, мм	Загальне відхилення, мм
1	0.1037	0.0487	1.5677	1.5719
2	0.0001	0.0001	-0.0729	0.0729
3	-0.1234	0.2987	-2.5284	2.549
4	0.0005	0.0005	0.0708	0.0708
5	-0.0005	-0.0002	0.0105	0.0105
6	-0.0009	-0.0047	-2.8992	2.8992
7	-1,414	-0.7721	0.0.273	1.634
8	-2.4335	1.6414	-1.1409	3.1492

Значення показують, що всі профілі оптимально вирівняні один з одним з огляду на їхню довжину та орієнтацію в просторі за заданих базових умов. Зокрема, відхилення, яке є важливим для закриття структури профілю 4, можна мінімізувати з приблизно 45 до 0,07 мм. В рамках зображених результатів спочатку була оптимізована зовнішня структура (1-4), а потім внутрішні профілі (5-8). Отже, дані обробки профілів відрізняються залежно від послідовності оптимізації. Значення, наведені в табл. 2 показують кінцевий стан структури після повної оптимізації.

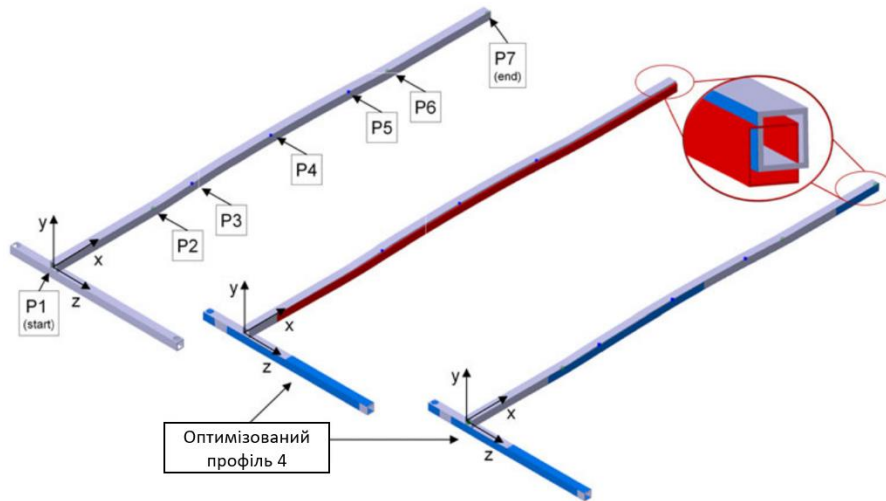


Рис. 2.6.2. Початковий стан та оптимізований стан профілю 7

Щоб проілюструвати кореляції, а також показати досяжні рівні точності, на рис. 8 показано початковий та оптимізований стан профілю 7 після оптимізації зовнішньої структури. У порівнянні з наведеними значеннями в *табл. 2*, які показують лише відхилення кінцевих точок усіх профілів, рис. 8, а також значення в *табл. 3* тепер відображають відхилення і можливу точність всіх розглянутих точок на одному профілі. Існуюче відхилення початкової точки є наслідком початкової точки, яка впливає з уже оптимізованого профілю 4.

У *табл. 3* порівнюються всі точки початкового та оптимізованого стану, які були розглянуті на цьому профілі. Відхилення окремих точок розраховуються в початковому стані таким чином, що точка, яка показує мінімальну відстань до цільового контуру, вже визначена на цьому етапі на цільовому профілі. Крім того, зображуються визначені дані обробки.

Показані значення реалістично відображають можливості та межі підвищення точності профілю. Тут початкова точка профілю залишається незмінною, оскільки вона буде визначена остаточним вирівнюванням профілю 4. Ця точка вже є мінімальною порівняно з цільовою структурою. За базових умов (оцінка трьох точок контуру з коефіцієнтом 0,6) можна

досягти збільшення точності кривизни профілю (точки 3-5) в середньому на понад 50 %.

Точність точок контуру може бути ще вищою, якщо збільшити значення коефіцієнта, який визначає, наскільки сильно точки враховуються при оптимізації. Таким чином, точність кінцевих точок зменшиться, оскільки дотримання цих граничних умов для оптимізації зростає. Вибраний коефіцієнт 0.6 є зразковим значенням, яке показує добре збалансований результат для підвищення точності як кінцевої точки, так і контуру.

Однак слід зазначити, що ця компенсація похибки в напрямку у відбувається за рахунок погіршення якості з'єднання, оскільки паралельна опорна поверхня більше не може бути забезпечена. Оскільки значення повороту в цілому дуже малі, завдяки довгим профілям, розщепленням, що виникає в місці з'єднання, можна знехтувати. Приєднувальні розміри для подальших профілів також були принципово покращені. Незважаючи на базові умови, положення кінцевої точки можна покращити до 1,63 мм. Як показують окремі значення спрямованості, це в першу чергу пов'язано з довжиною профілю, яка вже в початковому стані трохи вкорочена. Це також відображено в даних обробки, оскільки ніякого вкорочення основного профілю не виконується. Відбувається лише обертання навколо осей у та z.

Точність усіх профілів базової складальної групи можна частково значно підвищити за допомогою представленого методу. Таке підвищення точності є передумовою для переважно автоматизованого, малонапруженого складання замкнутих просторово-рамкових конструкцій без використання додаткових пристосувань.

2.7. Підсумок

Таким чином ми розглянули метод компенсації виробничих відхилень при складанні алюмінієвих просторово-рамних конструкцій. Загальний підхід полягає в підвищенні точності окремих профілів шляхом окремої обробки кінцевих ділянок профілю. Вкорочення початку і кінця профілю, а також регулювання кута за рахунок зняття фаски на початковій ділянці профілю створює гнучку можливість просторового регулювання профілів і, відповідно, підвищення точності окремих профілів, а отже, і каркасно-рамної конструкції в цілому. Було розроблено методичний підхід для визначення даних обробки кожного профілю. На першому етапі аналізується основна просторово-рамкова структура. Потім визначені дані, а також дані вимірювань профілів інтегруються в базу даних. Математичні кореляції були реалізовані в Matlab. За допомогою реалізованого інструменту оптимізації можна виконати аналіз існуючих помилок і здійснити гнучку стратегію оптимізації окремих профілів або всієї просторово-рамкової структури. На основі цільових даних були виміряні реальні профілі та оптимізовані за різних побічних умов в реалізованому середовищі. Таким чином, було досягнуто фундаментального поліпшення вирівнювання окремих профілів у просторі. Завдяки зменшенню цих відхилень значно покращується низьконапружена та автоматизована збірка просторових рамних конструкцій.

2.8. Автоматизація процесу складання

Як уже зазначалося, автоматизоване складання просторово-рамкових конструкцій є кращим з огляду на якість та економічні аспекти. Одним із способів вирівняти з'єднувальні елементи без спеціальних пристроїв і, отже, автоматизувати збірку є використання промислових роботів.

Загалом, вимоги до точності для кожного процесу з'єднання різні. Одним з часто використовуваних процесів з'єднання космічних каркасних

конструкцій є лазерне зварювання. Точність, необхідна для цього процесу з точки зору максимально допустимого зазору при лазерному зварюванні, становить 0,2 мм. Таким чином, вирівнювання партнерів по з'єднанню повинно бути дуже точним, щоб забезпечити дотримання необхідних допусків.

Враховуючи той факт, що проблеми з точністю збірки, які виникають в процесі виробництва, контролюються за допомогою представленого методу, все ще існують відхилення, які викликані точністю робота, а також помилки, пов'язані з неточністю захоплення з'єднувального партнера. Однак всі типи помилок разом складають відхилення, що перевищують 1 мм у місці з'єднання для кожного профілю. Тому досягнуте вирівнювання не є достатнім для необхідного процесу з'єднання. Для складання за допомогою промислових роботів потрібна додаткова система з більш високою точністю, щоб забезпечити правильне вирівнювання компонентів.

Тому в Інституті виробничих наук wbk був розроблений підхід, заснований на маркуванні, притаманному компонентам. Маркування, яке наноситься на профіль під час виробничого процесу «екструзія криволінійного профілю», являє собою 3D-систему координат. Під час процесу складання два профілі грубо розташовуються, а маркування можна зафіксувати за допомогою системи стереокамер. Таким чином, положення та орієнтація компонентів можуть бути точно визначені. Після цього можна визначити відхилення між двома партнерами по з'єднанню і за допомогою впровадженого замкнутого контуру управління промислові роботи можуть виконати компенсаційний рух для точного вирівнювання партнерів по з'єднанню. Підхід був підтверджений у перших експериментах, де один профіль був вирівняний промисловим роботом, а інший профіль був зафіксований у пристрої.

Навіть відмова від спеціальних пристроїв вимагає фіксації з'єднувальних партнерів під час процесу з'єднання. Таким чином, використання одного затискного пристрою є дуже важливим. Пристрій повинен мати максимальну гнучкість, забезпечуючи при цьому точне вирівнювання двох партнерів по з'єднанню один щодо одного. З цієї причини був розроблений затискний захват, який забезпечує як високу гнучкість щодо різних типів з'єднань, так і можливість точного вирівнювання. Тому в затискний захват була інтегрована система стереокамер, яка утворює замкнутий контур управління в поєднанні з системою маркування компонентів і промисловим роботом. На рисунках 4 і 5 показано прототип затискного пристрою. Захват має форму квадрата і встановлюється на промисловому роботі. Система стереокамер закріплена на двох лінійних осях. Таким чином, створюється великий робочий простір і можна обробляти різні типи профільних з'єднань. Крім того, камера завжди може бути ідеально сфокусована на профілі.

Для створення різних профільних з'єднань також необхідно, щоб затискні пристрої можна було регулювати в робочій зоні. Тому обидва пристрої встановлені на двох осях на нижній стороні рами, які можуть незалежно переміщатися до осей камер. Щоб мати можливість виконувати з'єднання профілів в діапазоні від 0° до $\pm 90^\circ$, обидва затискні пристрої можуть також обертатися навколо осі z . Малюнок 5 ілюструє описаний контекст і показує два зразкові типи з'єднань.

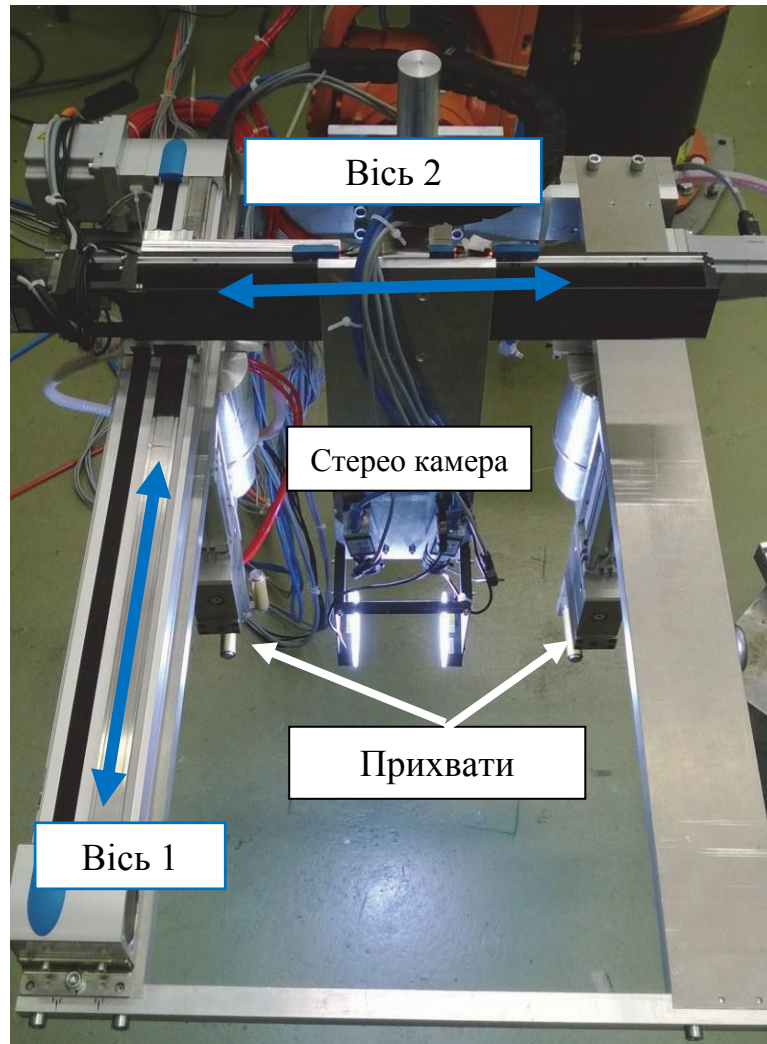


Рис. 2.8.1. Прототип робота-прихвата

З'єднання профіль-профіль з двотавровим з'єднанням, де обидва затискні пристрої мають однакове положення і орієнтацію (вгорі) і з'єднання профіль-профіль з Т-подібним з'єднанням (внизу), де обидва пристрої відрізняються по положенню і орієнтації. Непрямі з'єднання профілю з профілем за допомогою з'єднувальних елементів також можуть бути виконані за допомогою захвату. Таким чином, показана конструкція має високий ступінь гнучкості щодо різних профільних з'єднань.

Сам процес вирівнювання двох профілів складається з шести етапів:

1. Дані для програмування промислових роботів і захвату визначаються з автономної моделі. З цієї моделі визначаються дані для руху роботів, а також для окремих осей захвату.

2. Потім профіль 1 встановлюється і фіксується в затискному пристрої.
3. Профіль 2 - позиціонується. Тут профіль не встановлюється точно в цільову позицію, а розміщується на безпечній відстані, щоб уникнути зіткнень, які можуть виникнути через відхилення робота, а також через неточність точки захоплення профілю..
4. Визначається маркування обох профілів і розраховується відхилення між двома партнерами по з'єднанню.
5. За допомогою замкнутого контуру керування профіль 2 точно вирівнюється з профілем 1.
6. На останньому етапі профіль 2 фіксується затискним пристроєм для можливого подальшого з'єднання профілів. Необхідне зусилля для фіксації окремих профілів тут точно не вказано, оскільки можливий вплив на профіль з точки зору пружної деформації не є основною метою цієї презентації.

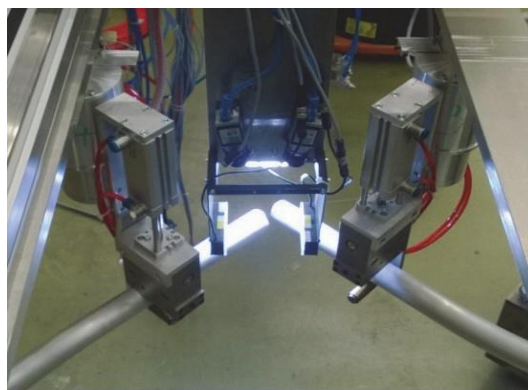


Рис. 2.8.2. Вирівнювання затискних пристроїв для різних профільних з'єднань

Система камер, а також затискний захват вже були протестовані окремо. Тут точне вирівнювання двох профілів за допомогою маркування, властивого компонентам, було успішно доведено. Компоненти затискача-захват були відкалібровані, що дозволило точно позиціонувати затискні пристрої, а також камеру. Інтеграція обох систем на промисловому роботі призвела до того, що система координат, визначена камерою, більше не може слугувати базовою для використовуваних роботів, оскільки тепер вона також просторово переміщується.

Тому поточні дослідження зосереджені на калібруванні всієї системи, що складається з різних осей захоплення, промислових роботів, а також камери. Для цього необхідно визначити базову систему координат, в якій завжди можна точно визначити систему координат камери. Таким чином, одна і та ж

Тому для кожного промислового робота призначається однакова базова система координат. Згодом інформація про положення кожної осі затисно-захоплювального пристрою, а також положення робота, на якому встановлений захват, зчитується і перетворюється в базову систему координат. Таким чином, всі розраховані відхилення і компенсація

переміщення робота можуть бути визначені відносно загальної бази.

Перші випробування калібрування всієї системи пройшли успішно, але планується проведення подальших заходів для підвищення точності всієї системи, щоб реалізувати весь процес належним чином.

Щодо виробничих відхилень окремих компонентів, які можуть складатися під час складання і, таким чином, перешкоджати автоматизованому «закриттю» просторово-рамної конструкції, був представлений новий підхід для компенсації цих відхилень. Загальний підхід полягає в механічній обробці торцевих сегментів профілю, що

дозволяє просторово вирівняти профілі, а отже, призводить до оптимізації всієї конструкції з точки зору точності.

Контролюючи ці відхилення, окремі профілі повинні бути точно вирівняні і зафіксовані для складання. При використанні промислових роботів для складання виникають проблеми з точністю цього етапу процесу. Тому було розроблено гнучкий затискний захват. Захват оснащений системою стереокамер, яка використовується для виявлення маркування компонентів на профілях. Таким чином, можна виявити відхилення в процесі вирівнювання. Замкнутий контур управління між системою камер і промисловим роботом дозволяє компенсувати відхилення під час процесу.

Розділ 3. Підвищення точності складання

просторових рам

3.1. Перевірка математичної моделі

У випадку досліджуваного вузла математична модель спрогнозувала, що складання в межах необхідних допусків є неможливим.

Фізична перевірка за допомогою координатно-вимірювальної машини (КВМ)

Для підтвердження результатів симуляції проводяться фізичні вимірювання реального пристосування. Для цього використовується координатно-вимірювальна машина (КВМ), яка дозволяє з високою точністю отримати тривимірні координати кількох точок на критичній поверхні. Процес вимірювання включає такі етапи:

1. **Встановлення пристосування:** Пристосування фіксується на робочій поверхні КВМ для забезпечення стабільності під час вимірювання. Орієнтація налаштовується відповідно до заданої опорної площини та структури баз.

2. **Калібрування щупа:** Проводиться калібрування щупа КВМ для забезпечення точності запису координат точок.

3. **Вимірювання точок:** Щуп проводить вимірювання заздалегідь визначених 10 точок на критичній поверхні. Координати цих точок записуються, що дозволяє визначити їх фактичне розташування у просторі.

4. **Розрахунок відхилень:** Для кожної точки обчислюється відхилення від її номінальної координати згідно з моделлю. Ці відхилення представлені у звіті, який зазвичай містить графічне та табличне відображення даних (Рис. 2.2.7).

Порівняння та висновки

Виміряні відхилення підтверджують прогноз симуляції, демонструючи, що критична поверхня не відповідає необхідним допускам.

Порівняння результатів симуляції та КВМ вимірювань встановлює кореляцію між теоретичними та фактичними результатами. Такий підхід підсилює валідність математичної моделі та надає практичні рекомендації щодо вдосконалення конструкції пристосування або процесів його виготовлення.

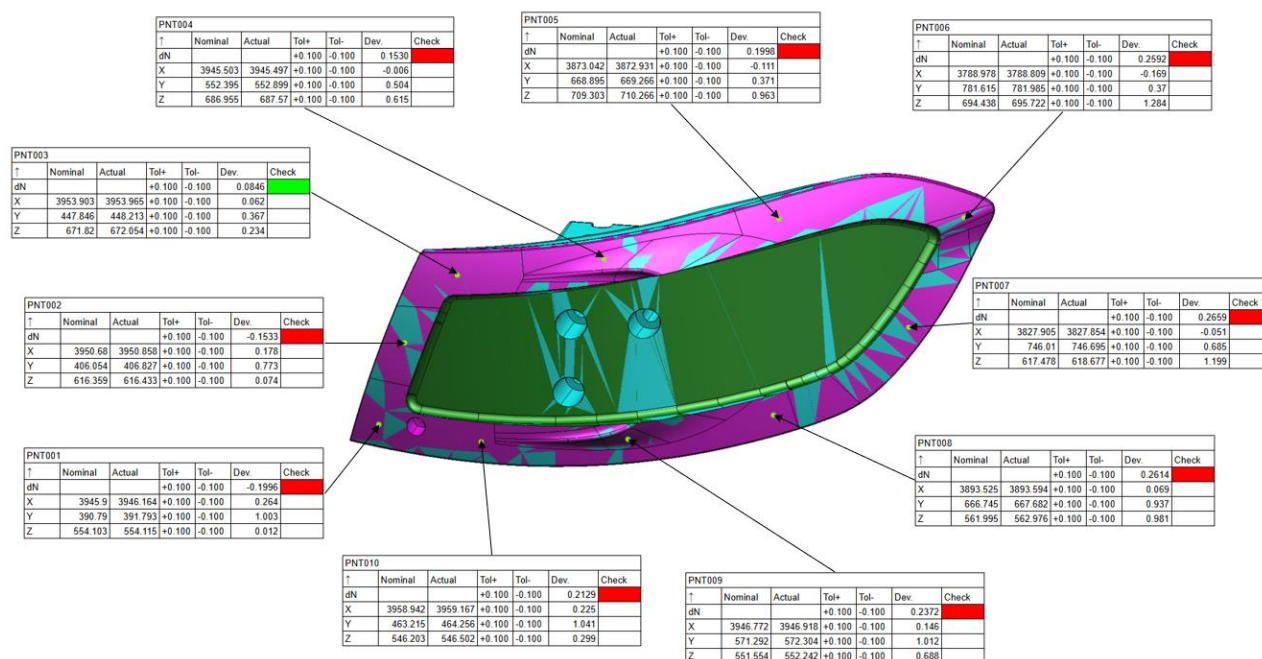


Рис. 2.2.7. Звіт, отриманий з вимірів КВМ

3.2. Запропоноване рішення

Для точного встановлення та вирівнювання модуля заднього ліхтаря на фіксаторі використовується детальний процес вимірювання за допомогою координатно-вимірювальної машини (СММ). Це допомагає підтримувати жорсткі допуски та забезпечує точну відповідність модуля з навколишніми компонентами. Нижче описано розширений покроковий процес:

1. Підготовка та встановлення модуля

- **Пластина фіксатора та елементи вирівнювання:** Модуль задньої фари встановлюється на спеціальну пластину, яка кріпиться до алюмінієвого профілю за допомогою гвинтів. Пластина має два типи

пальців для вирівнювання (циліндричний та зрізаний) та оброблену контактну площину, які є критичними для точного позиціонування модуля на стійці.

- **Втулки та гвинти:** Втулки на пластині забезпечують напрямні для точного кріплення модуля, що запобігає зміщенню.

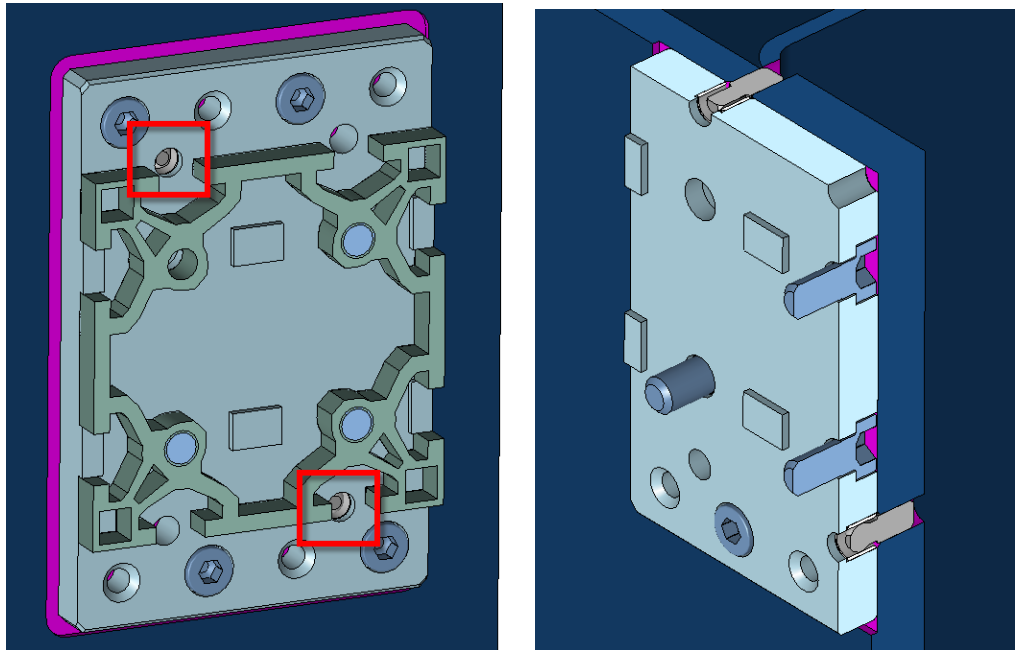


Рис. 2.3.1. Кріплення адаптера до стійки

2. Вимірювання координат штифтів

- **Позиціонування штифтів для вирівнювання модуля:** Круглий палець слугує основною точкою відліку, тоді як зрізаний дозволяє незначний рух, запобігаючи додатковим напруженням. За допомогою СММ точно вимірюються координати обох пальців для встановлення фіксованої системи відліку.
- **Процедура СММ:** Щуп машини торкається поверхні кожного штифта, щоб зняти кілька точок по їхніх колах. СММ обчислює точні центральні точки для обох штифтів на основі цих вимірів, визначаючи їх розташування в просторі відносно глобального «нуля».

Цей крок є важливим, оскільки штифти контролюють бічне та обертальне вирівнювання модуля на фіксаторі.



Рис. 2.3.2. СММ-машина LK HC90

3. Встановлення координат контактної площини

- **Вимірювання контактної площини:** Далі СММ вимірює чотири стратегічно розташовані кутові точки на обробленій контактній площині зварної рами. Ці точки дозволяють СММ створити середню площину, яка представляє поверхню вирівнювання для модуля задньої фари.
- **Розрахунок площини:** Записуючи координати чотирьох точок, СММ створює віртуальну площину через ці точки. Ця площина слугує орієнтиром, забезпечуючи, щоб модуль лежав рівно і не був нахиленим чи повернутим на стійці. Це вирівнювання є критичним для підтримки рівномірних зазорів та рівності з сусідніми зовнішніми деталями.

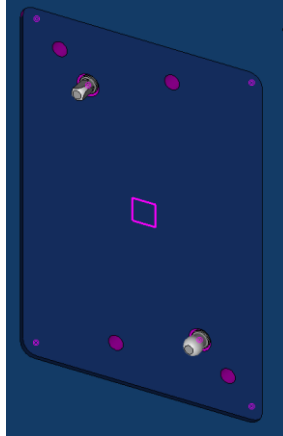


Рис. 2.3.3. Вимірювані точки та утворена площина

4. Перевірка та калібрування

- **Аналіз даних:** Після вимірювання координат штифтів і площини їх аналізують для перевірки відхилень від проєктних специфікацій. Цей крок допомагає виявити можливі відхилення, які можуть вплинути на посадку або вирівнювання модуля.

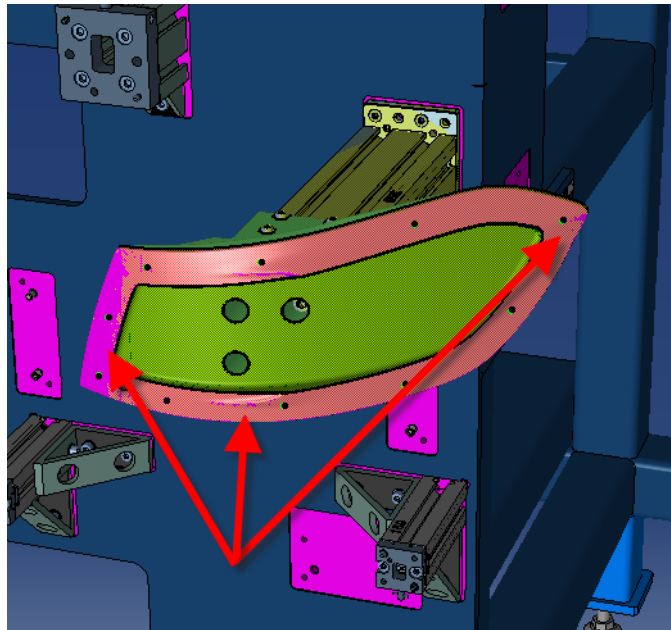


Рис. 2.3.4. Відхилення актуального положення модуля

- **Корекція керуючої програми:** Використовуючи ці передані координати, верстат з ЧПУ з високою точністю фрезерує кишені на новій пластині, яка використовуватиметься тільки для обробки самого модуля. Це зводить до мінімуму будь-які відхилення або

неспівпадіння, оскільки модуль розташовується відповідно до специфікацій пристосування у глобальній системі координат авто.

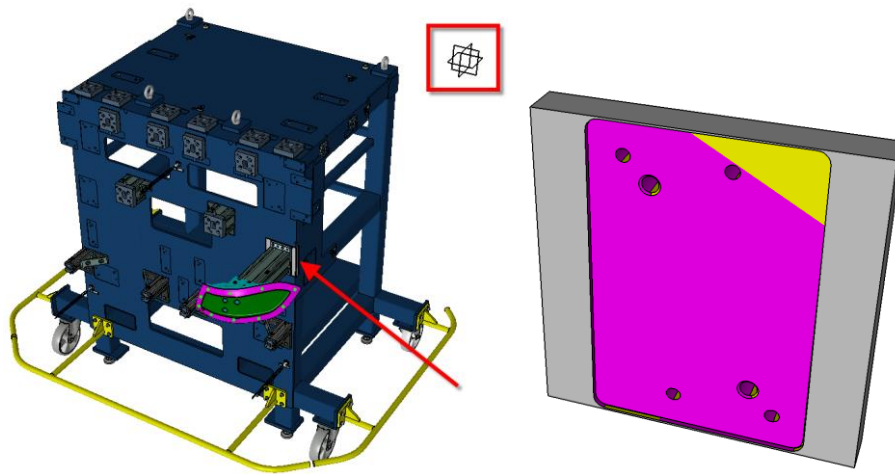


Рис. 2.3.5. Модель плити для фрезерування модуля та відхилення
актуального положення (жовтим) від номінального (рожевим)

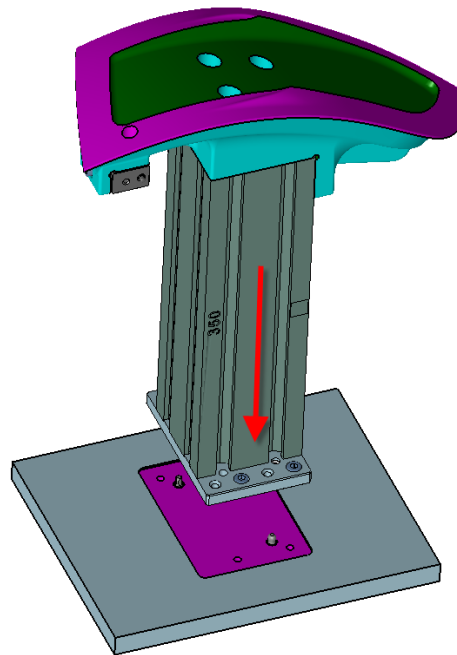


Рис. 2.3.6. Модуль фари на новій плиті з кишенею, фрезерованою
відносно актуальних вимірних координат



Рис 2.3.7. 5-осьовий верстат з ЧПК HAAS UMC-750

З прийняттям рішення об обробці модуля задньої лампи на окремій пластині використання Haas UMC-750 стає практичним вибором. UMC-750 добре підходить для цього застосування завдяки своїй комбінації розміру, точності та універсальності. Використання меншого фрезерного верстата, такого як UMC-750, для спеціалізованих завдань обробки може підвищити ефективність виробництва. Інтуїтивно зрозуміле управління машини та швидкі цикли обробки дозволяють швидко переходити між різними модулями, що робить її підходящою для різних виробничих запусків — від малих до великих обсягів.

Вибір UMC-750 замість більших машин знижує операційні витрати. Менші верстати зазвичай споживають менше енергії та потребують меншої площі на виробничому майданчику, одночасно забезпечуючи продуктивність, необхідну для точної обробки. Це веде до кращого управління витратами в процесі виробництва. Модульність використання окремих пластин для різних компонентів означає, що майбутні проекти або варіації модуля задньої лампи можуть бути легко адаптовані на тій же машині. Ця гнучкість дозволяє швидше адаптуватися до змін у дизайні.

5. Встановлення модуля та повторна перевірка

- **Фінальна перевірка встановлення:** Після підтвердження всіх вимірювань та необхідних корекцій модуль заднього ліхтаря можна встановлювати на стійку, будучи впевненим у його точному вирівнюванні. Може бути проведена остаточна перевірка, щоб упевнитися, що модуль розташований відповідно до вимог після монтажу.

Цей детальний процес за допомогою СММ перевіряє, що всі критичні елементи вирівнювання — штифти та контактна площа — знаходяться в необхідних межах допуску, забезпечуючи точну посадку та відповідність модуля із суміжними компонентами автомобіля.

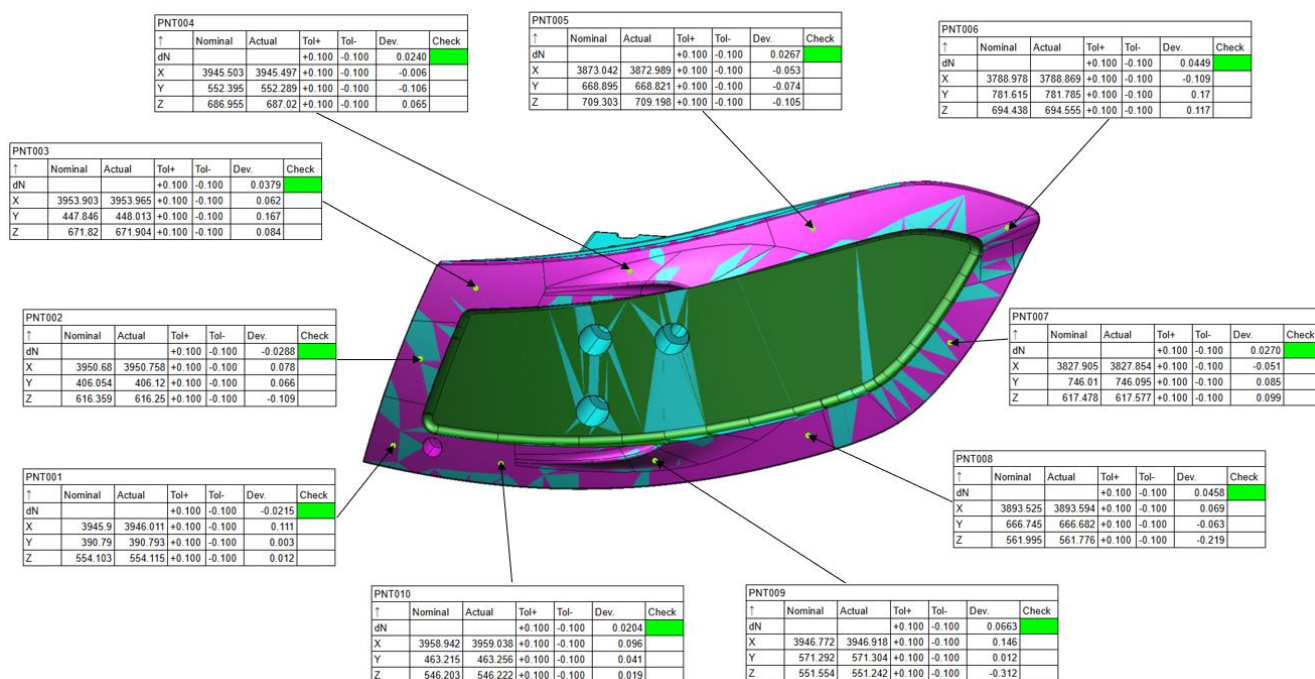


Рис. 2.3.8. Звіт, отриманий з вимірів KVM

3.3. Висновок

Проблема з обробкою модуля фари на великій зварній рамі вимагає застосування великогабаритного і дорогого верстата Zimmermann FZ33, що має низку суттєвих недоліків. Такий підхід позбавляє модульність конструкції, ускладнює доступ до всіх поверхонь для обробки та значно

підвищує витрати на виробництво. Використання великого обладнання для невеликих компонентів є неефективним, займає значну площу на виробничій ділянці і потребує тривалого часу для налаштування. Це рішення є економічно і ресурсно недоцільним, оскільки обробка на меншому обладнанні могла б бути більш ефективною та гнучкою для виробництва.

Для вирішення проблеми з точним позиціонуванням модуля задньої фари на великій зварній рамі було запропоновано обробляти модуль на окремій пластині. Цей процес передбачав використання координатно-вимірювальної машини (СММ) для вимірювання ключових точок та площини, що забезпечило точне встановлення модуля на пластину. Після цього координати використовувалися для фрезерування спеціальних кишень на новій пластині, яка призначалася тільки для обробки модуля.

Використання Haas UMC-750 стало оптимальним вибором для такої задачі, оскільки цей 5-осьовий верстат забезпечує точність та ефективність обробки при менших витратах, займаючи менше виробничого простору і споживаючи менше енергії. Модульний підхід дозволяє адаптувати майбутні варіації модулів без необхідності повної переналаштування, що забезпечує гнучкість виробничого процесу та полегшує адаптацію до змін у дизайні.

Розділ 4. СТАРТАП

4.1. Опис ідеї

Ідея цього стартапу полягає в розробці автоматизованої системи для складання просторових зварних рамних конструкцій за допомогою промислових роботів, яка забезпечує високу точність складання та вирівнювання компонентів. Система використовує інноваційні підходи для автоматизації процесу складання, які дозволяють досягти точності, необхідної для виробництва високоточних конструкцій, що використовуються в автомобільній, авіаційній та інших промислових сферах.

Основною перевагою цього стартапу є застосування 3D-маркування компонентів і використання стереокамер для точного визначення їхнього положення та орієнтації під час складання. Це дозволяє з високою точністю компенсувати відхилення, зумовлені неточностями в роботі робота або в захопленні компонентів, що забезпечує оптимальну якість з'єднання та мінімізацію виробничих дефектів.

Цей проект може бути корисним для таких компаній:

1. **Виробники промислових роботів:** Для них цей стартап може стати новим напрямком у розвитку технологій, що дозволяють підвищити точність роботи роботів при складанні складних конструкцій.
2. **Компанії, що виробляють зварні конструкції:** Підприємства, які займаються виготовленням зварних рам, можуть використовувати цей метод для поліпшення точності складання та зменшення відходів.
3. **Авіаційні та автомобільні компанії:** Високоточні зварні конструкції необхідні для виготовлення деталей, що мають критичне значення для безпеки і функціональності виробів, тому цей стартап може допомогти знизити витрати на виготовлення таких деталей, підвищивши їх якість.

4. Інтегратори автоматизованих систем: Компанії, які займаються розробкою та інтеграцією автоматизованих технологій, можуть скористатися цією технологією для вдосконалення своїх продуктів.

Цей стартап відрізняється від конкурентів тим, що використовує інноваційну технологію 3D-маркування компонентів під час їхнього виробництва, що дозволяє забезпечити високоточне вирівнювання та з'єднання в процесі автоматизованого складання. Інші рішення, які використовують промислові роботи для складання, не мають такої точності компенсації відхилень і можуть не забезпечити необхідну якість для критичних конструкцій.

Для реалізації цього стартапу важливо провести детальний аналіз ринку, щоб визначити компанії, які зацікавлені в покращенні своїх технологій складання та зварювання. Основними клієнтами можуть бути виробники деталей для авіаційної, автомобільної та будівельної промисловості, а також компанії, які займаються інтеграцією роботизованих систем у виробничі процеси. Крім того, варто провести дослідження конкурентів, щоб визначити, чи є на ринку подібні рішення, і в чому полягає унікальність цієї технології.

Фінансовий аналіз допоможе оцінити витрати на розробку і впровадження цієї системи, а також визначити потенційний обсяг продажів та прибуток від її використання. Важливо оцінити, скільки часу знадобиться для окупності проекту, а також яку додаткову цінність він принесе компаніям-клієнтам через оптимізацію процесу складання та зменшення витрат на виробництво. Такий аналіз дозволить точно оцінити рентабельність проекту та його перспективи на ринку.

Табл.4.1. - Опис ідеї проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Автоматизоване складання просторових зварних рамних конструкцій за допомогою промислових роботів, з використанням 3D-маркування для точного вирівнювання компонентів	Виробники зварних конструкцій, Авіаційна та автомобільна промисловість, Інтегратори автоматизованих систем	1. Підвищена точність складання
		2. Зниження витрат на матеріали і енергію через точність процесу
		3. Зменшення часу виробництва і підвищення ефективності за рахунок автоматизації.

4.2. Технологічний аудит

Аналіз технологічної здійсненності проекту є важливим етапом для оцінки, чи є необхідні технології доступними і чи можуть вони бути ефективно використані для реалізації запропонованої ідеї. У випадку стартапу з автоматизованого складання зварних рамних конструкцій за допомогою промислових роботів, ключовими технологіями для оцінки будуть наступні:

1. Промислові роботи

- **Технологія:** Використання промислових роботів для виконання зварювальних операцій та точного вирівнювання компонентів конструкції.

2. Системи стереокамер для маркування і позиціонування

- **Технологія:** Використання стереокамер для точного визначення положення компонентів за допомогою маркування. Це дозволяє забезпечити високу точність у вирівнюванні деталей перед зварюванням.

3. Технологія лазерного зварювання

- **Технологія:** Лазерне зварювання як метод точного з'єднання металевих частин з низьким рівнем теплових впливів.

4. Програмне забезпечення для автоматизації складання

- **Технологія:** Використання програмного забезпечення для моделювання процесу складання і точного налаштування роботи промислових роботів.

Висновки щодо технологічної здійсненності:

1. **Доступність технологій:** Всі ключові технології, необхідні для реалізації проекту, є доступними на ринку. Промислові роботи, лазерне зварювання, стереокамери та програмне забезпечення для автоматизації процесів — всі ці технології мають надійних постачальників та широко використовуються у промисловості.
2. **Ризики впровадження:** Проблеми можуть виникнути при інтеграції всіх технологій у єдину автоматизовану лінію. Важливо правильно налаштувати взаємодію між роботами, системами стереокамер і програмним забезпеченням, щоб мінімізувати ризики помилок і забезпечити точність виконання зварювальних операцій.
3. **Реалізація:** Загалом, технологічна здійсненність проекту є високою, проте потрібен ретельний аналіз і тестування для вибору оптимальних рішень для інтеграції та налаштування всіх елементів автоматизованої системи складання зварних конструкцій.

4.3. Аналіз ринкових можливостей запуску

Аналіз ринкових можливостей для запуску стартапу в області автоматизованого складання просторових зварних рамних конструкцій за допомогою промислових роботів дозволяє оцінити потенціал успіху і вигоди, що можуть бути отримані на основі потреб ринку, конкурентних умов і фінансової ситуації.

Табл. 4.2. - Характеристика ринку стартап-проекту

№	Показники стану ринку	Характеристика
1	К-сть гравців, од.	10-15 (Основні гравці на ринку автоматизованих систем для складання складних конструкцій)
2	Загальний обсяг продаж \$/од.	25 000 000 - 40 000 000 (Оцінка для ринку автоматизації складання та роботизованих виробничих процесів)
3	Динаміка ринку	Зростає (Ринок автоматизації та роботизації виробничих процесів зростає на 10-12% щорічно)
4	Специфічні вимоги до стандартизації	Необхідність сертифікації для застосування в автомобільній та аерокосмічній промисловості, а також дотримання стандартів безпеки робіт з промисловими роботами
5	Середня норма рентабельності в галузі (%)	18-22% (Висока рентабельність завдяки зниженню витрат на робочу силу і підвищенню точності виробництва)

Табл. 4.3. - Характеристика потенційних клієнтів

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1	Автоматизація складання просторових зварних рамних конструкцій	Автомобільні компанії, постачальники комплектуючих	Високі вимоги до точності, ефективності та скорочення витрат на виробництво	Висока точність, надійність, зменшення витрат на робочу силу та зменшення часу на складання
2	Вдосконалення технологій складання за допомогою роботів	Компанії з автоматизації та роботизації виробництва	Висока потреба в оптимізації та зменшенні витрат на робочу силу	Автоматизація, інтеграція з існуючими системами, можливість налаштування на різні типи конструкцій
3	Підвищення продуктивності складання зварних конструкцій	Малі та середні підприємства, стартапи	Потреба в гнучкості та швидкому прототипуванні	Гнучкість, доступність для малих підприємств, швидкість налаштування та запуску виробничого процесу

Табл. 4.4. - Фактори загроз

<i>№ n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
------------------	---------------	----------------------	---------------------------------

1	Конкуренція	Зростання кількості конкурентів у галузі автоматизації складання	Вдосконалення технологій, пропозиція унікальних рішень, покращення сервісу
2	Сертифікація та стандарти	Високі вимоги до сертифікації в автомобільній та інших галузях	Залучення сертифікаційних органів, відповідність міжнародним стандартам
3	Висока собівартість обладнання	Зростання вартості промислових роботів та обладнання	Пошук ефективних постачальників, оптимізація процесів, використання локальних компонентів
4	Слабка обізнаність ринку	Недостатнє розуміння переваг автоматизації складання серед клієнтів	Маркетингова діяльність, проведення демонстраційних заходів, навчальні курси

4.4. Розроблення ринкової стратегії

Розроблення ринкової стратегії проекту полягає в формулюванні чітких напрямків для виходу на ринок та досягнення конкурентних переваг. Ринкова стратегія має бути гнучкою і відповідати змінам на ринку, дозволяючи адаптувати бізнес до нових умов.

Табл. 4.5. - Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>№ п/п</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1	Виробники автомобільних та авіаційних компонентів	Висока	Зростаючий	Висока	Складна

2	Малі підприємства та стартапи у сфері робототехніки	Висока	Зростаючий	Низька	Легка
3	Інженерні компанії та консалтингові фірми, що займаються автоматизацією виробничих процесів	Висока	Стабільний	Середня	Середня

Які цільові групи обрано:

Обрано виробників автомобільних та авіаційних компонентів та малі підприємства/стартапи у сфері робототехніки як основні цільові групи через високий попит на автоматизацію складання, готовність впроваджувати нові технології та потенціал для розвитку на ринку автоматизації складних виробничих процесів.

Таблиця 4.6. - Визначення стратегії розвитку

<i>№ п/п</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспро- можні позиції відповідно до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1	Розширення частки ринку серед виробників автомобільних та авіаційних компонентів	Диференційований маркетинг	Висока точність, адаптивність під специфікації клієнта, інноваційні технології	Стратегія диференціації
2	Завоювання сегменту малих підприємств та стартапів	Концентрований маркетинг	Доступна ціна, швидкість виконання, гнучкість в налаштуванні процесу	Стратегія спеціалізації

4.5. Розроблення маркетингової програми

Таблиця 4.7. - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>№ n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1	Висока точність складання конструкцій	Забезпечення відповідності технічним стандартам і допускам	Використання роботизованих систем з високою точністю для зварки та складання
2	Індивідуалізація продукції	Можливість кастомізації конструкцій під специфікації клієнта	Гнучкість у дизайні та адаптація до запитів клієнтів
3	Скорочення часу виготовлення	Зниження часу виробництва за рахунок автоматизації	Швидка адаптація до змінних умов за допомогою автоматизованих технологій
4	Доступність ціни	Зниження витрат на виробництво	Оптимізація процесів виробництва та використання інноваційних методів

Таблиця 4.8. - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару	Сутність та складові
I. Товар за задумом	Виготовлення зварних рам за допомогою автоматизованого процесу складання. Основні функціональні вигоди: висока точність виготовлення, швидкість виконання, індивідуалізація продукції під потреби замовника.
II. Товар у реальному виконанні	Властивості/характеристики:
	1. Надійність: висока точність зварки і складання, що забезпечує відповідність технічним стандартам.
	2. Якість: відповідність нормативам і стандартам галузі, контроль якості на кожному етапі виробництва.
III. Товар із підкріпленням	4. Марка: унікальне брендування, що підкреслює інноваційність і точність процесу складання, підвищує впізнаваність серед цільових аудиторій.
	До продажу: індивідуальні консультації для вибору типу зварної конструкції, матеріалів і специфікацій, підготовка інженерних розрахунків.
	Після продажу: технічна підтримка, гарантія на продукцію, можливість коригування конструкцій у разі потреби.

Таблиця 4.9. - Витрати на створення стартапу

№	Витрати	Обсяг, тис. дол.
---	---------	------------------

1	Оренда обладнання	12
2	Оренда приміщення	5
3	Виготовлення програми	8
4	Заробітна платня	10
5	Тестування	2
6	Рекламна компанія	10

Таблиця 4.10. - Система збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1	Інженерні компанії (машинобудування, авіація, автомобілебудування): великі замовлення, регулярна потреба в точних і складних зварних конструкціях	Підтримка прямого контакту, індивідуальне узгодження специфікацій, технічна підтримка	Прямий (1 рівень)	Власна система збуту через відділ продажів, технічні консультанти
2	Малі підприємства та стартапи: нерегулярні замовлення, орієнтація на швидкість і доступність виробів	Швидка доставка, оптимізація вартості, технічні консультації	Непрямий (2 рівня)	Залучення посередників (дистриб'юторів або партнерів)
3	Великі виробничі компанії та постачальники комплектуючих: великі серії виготовлення та потреба в автоматизації для зниження витрат	Забезпечення ефективної автоматизації процесу складання, підтримка оптимальних витрат	Прямий (1 рівень)	Власна система збуту через партнерські відносини, спеціалізованих менеджерів

--	--	--	--	--

4.6. Висновки до розділу

Ідея стартапу з автоматизації складання високоточних зварних конструкцій за допомогою промислових роботів є перспективною та інноваційною, з потенціалом для значного впливу на ринок. Запропонована система використовує передові технології, такі як 3D-маркування та стереокамери для точної позиціонування і вирівнювання компонентів, що забезпечує високу точність складання і зменшує виробничі дефекти. Це дає суттєву конкурентну перевагу, особливо в критичних для безпеки сферах, таких як авіація та автомобільна промисловість.

Аналіз технологічної здійсненності показав, що всі ключові технології, необхідні для реалізації проекту, вже доступні на ринку, включаючи промислові роботи, стереокамери, лазерне зварювання та програмне забезпечення для автоматизації. Однак, інтеграція цих технологій в єдину автоматизовану систему потребує ретельного налаштування для досягнення максимальної точності.

Ринок для автоматизації складання зварних конструкцій зростає, і проект має великий потенціал для залучення клієнтів з автомобільної та авіаційної промисловості, а також компаній, що займаються роботизацією виробництва. Сильними сторонами продукту є висока точність, зниження витрат на матеріали, енергію і робочу силу, а також скорочення часу на виготовлення. Завдяки цим перевагам, стартап має шанси на успіх у зростаючому ринку автоматизації та роботизації виробничих процесів.

Особлива увага повинна бути приділена розвитку ринкової стратегії. Для забезпечення успішного виходу на ринок, стартап повинен зосередитись на двох основних цільових групах: великих виробниках автомобільних та авіаційних компонентів, що потребують високої точності і адаптивності технології, та малих підприємствах, які шукають гнучкість і швидкість запуску виробництва. Успішна реалізація стратегії диференціації і спеціалізації дозволить стартапу зайняти нішу у двох цих сегментах.

Усе це свідчить про те, що проект має високий потенціал для розвитку і здатен вирішити важливі задачі на ринку високоточних зварних конструкцій, покращуючи виробничі процеси, зменшуючи витрати і забезпечуючи високу якість кінцевої продукції.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Міжнародна організація зі стандартизації. ISO 2768-1: General tolerances – Part 1: Tolerances for linear and angular dimensions without individual tolerance indications. Женева: ISO, 1989. – 12 с.
2. Zhang, M. Discrete shape modeling for geometrical product specification: Contributions and applications to skin model simulation / École normale supérieure de Cachan – ENS Cachan. – 2011. – 17 жовтня.
3. Schleich, B., Anwer, N., Mathieu, L., & Wartzack, S. Skin model shapes: A new paradigm shift for geometric variations modelling in mechanical engineering // Computer-Aided Design. – 2014. – № 50. – С. 1–15. – DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cad.2014.01.001>.
4. Lindau B., Andersson A., Lindkvist L., Söderberg R. Using forming simulation results in virtual assembly analysis // Proceedings of the ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition. Volume 3: Design, materials and manufacturing, Parts A, B, and C. – Houston, Texas, USA, November 9–15, 2012. – С. 31–38.
5. Schleich B., Wartzack S. Evaluation of geometric tolerances and generation of variational part representatives for tolerance analysis // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2015. – № 79(5). – С. 959–983. – DOI: <https://doi.org/10.1007/S00170-015-6886-8>.
6. Kleiner M., Tekkaya A.E., Becker D., Pietzka D., Schickorra M. Combination of curved profile extrusion and composite extrusion for increased lightweight properties // Prod Eng. – 2009. – № 3(1). – С. 63–68.
7. Hu S.J. et al. Assembly system design and operations for product variety // CIRP Ann. – 2011. – № 60. – С. 715–733.
8. Krüger J., Surdilovic D. Robust control of forced-coupled human-robot-interaction in assembly processes // CIRP Ann. – 2008. – № 57. – С. 41–44.

9. Jonsson M., Ossbahr G. Aspects of reconfigurable and flexible fixtures // *Prod Eng.* – 2010. – № 4. – C. 333–339.
10. Feldmann K., Müller B., Haselmann T. Automated assembly of lightweight automotive components // *CIRP Ann.* – 1999. – № 48(1). – C. 9–12.
11. Fleischer J., Otter M. Compensation of shape deviations for the automated assembly of space frame structures // *Proceedings of the 4th CIRP conference on assembly technologies and systems.* – Michigan (USA), 2012. – C. 105–108.
12. Ding Y., Jin J., Ceglarek D., Shi J. Process-oriented tolerancing for multi-station assembly systems // *IIE Trans.* – 2005. – № 37(6). – C. 493–508.
13. Mantripraga R., Whitney D.E. The datum flow chain: a systematic approach to assembly design and modeling // *Res Eng Design.* – 1998. – № 10(3). – C. 150–165.
14. Naesung L., Kazuhiro S. Decomposition-based assembly synthesis of space frame structures using joint library // *J Mech Des.* – 2006. – № 128(1). – C. 57–65.
15. Xie K., Camelio J.A., Izquierdo L.E. Part-by-part dimensional error compensation in compliant sheet metal assembly processes // *J Manuf Syst.* – 2012. – № 31(2). – C. 152–16