

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

«На правах рукопису»

УДК 621.9

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

\_\_\_\_ Олександр Охріменко

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2022 р

**Магістерська дисертація**

на здобуття ступеня магістра

за освітньо-професійною програмою «Технології машинобудування»

зі спеціальності 131 «Прикладна механіка»

на тему: «Технологічні особливості виготовлення деталей зі складною  
внутрішньою поверхнею»

Виконав:

студент VI курсу, групи МТ-11мп

Ковальов Михайло Васильович \_\_\_\_\_

Науковий керівник:

професор, д.т.н., проф.,

Воронцов Борис Сергійович \_\_\_\_\_

Консультант з \_\_\_\_\_

Рецензент: \_\_\_\_\_

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

Студент \_\_\_\_\_

Київ – 2022 року

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

**Механіко-машинобудівний інститут**

**Кафедра технології машинобудування**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Спеціальність – 131. «Прикладна механіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_Олександр Охріменко

«\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ЗАВДАННЯ**

**на дипломний проект (роботу) студенту**

Ковальову Михайлу Васильовичу

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема проекту (роботи) Технологічні особливості виготовлення деталей зі складною внутрішньою поверхнею.

керівник проекту (роботи) д.т.н., проф. Воронцов Борис Сергійович

(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р. № \_\_\_\_\_

2 Термін подання студентом проекту (роботи) \_\_\_\_\_

3. Об'єкт дослідження – впускний колектор автомобіля Mazda MPS 6

4. Предмет дослідження – методика виготовлення деталі «ранери»

5. Вихідні дані: файл 3D сканування підкапотного простору авто, параметри деталей встановлених в двигун, параметри навісного обладнання.

6. Перелік завдань, які потрібно розробити:

*1. Ознайомитись з будовою перегонних автомобілей*

*2. Розробити конструкцію впускного колектора*

*3. Привести різні методики виготовлення*

*4. Проаналізувати кожну з методик виготовлення*

*5. Виконати порівняльний аналіз по доцільності використання методики виготовлення та запропонувати оптимальну*

6. Розробити стартап модель бізнесу.

7. Орієнтований перелік графічного (ілюстративного) матеріалу: 8-12

слайдів презентації

#### Календарний план

№ з/п	Назва етапів виконання дипломного проекту (роботи)	Строк виконання етапів проекту (роботи)	Примітка
1	Вибір і затвердження теми	26.10.22	виконано
2	Підбір і ознайомлення з літературою	27.10.22-29.10.22	виконано
3	Складання плану, розробка індивідуального завдання	30.10.22-31.10.22	виконано
4	Поглиблене вивчення літературних джерел і написання теоретичної частини	01.11.22-15.11.22	виконано
5	Розгляд технологічних процесів	16.11.22-22.11.22	виконано
6	Розробка стартап-проєкту	23.11.22-10.12.22	виконано
7	Подання роботи в ДЕК та її захист	12.12.22-26.12.22	виконано

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

Михайло Ковальов

Керівник проекту (роботи)

\_\_\_\_\_

(підпис)

Борис Воронцов

## Анотація

Дисертація на здобуття ступеня магістра за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут» ім. І. Сікорського. – Київ, 2022.

Робота на тему «Технологічні особливості виготовлення деталей зі складною внутрішньою поверхнею» містить 94 сторінки формату А4, 5 розділів, 17 таблиць, 55 рисунків, 18 джерел.

**Актуальність теми.** За останнє десятиліття розвиток автоспорту прискорив свої темпи. З ростом популярності перегонів збільшується потреба в виготовленні запчастин для спортивних автомобілях. Такі деталі часто мають унікальну будову і виробляються в одиничних екземплярах. Тому сьогодні є актуальною тема оптимізації виробництва та оптимізації ефективності технологічного процесу, шляхом розроблення методології виготовлення заточену під малосерійне та одиничне виробництво.

### **Мета і задачі дослідження.**

**Метою даної роботи** є визначення найдоцільнішого методу виготовлення деталі «ранери» при одиничному виробництві шляхом аналізу обраних методик.

Для досягнення мети необхідно вирішити такі задачі:

- *Ознайомитись з будовою перегонових автомобілей*
- *Розробити конструкцію впускного колектора*
- *Привести різні методики виготовлення*
- *Проаналізувати кожну з методик виготовлення*
- *Виконати порівняльний аналіз по доцільності використання методики виготовлення та запропонувати оптимальну*
- *Розробити стартап модель бізнесу.*

**Об'єкт дослідження** – технології виготовлення деталей впускних систем спортивних автомобілей.

**Методи дослідження** – загальнонаукові методи, такі як аналіз, методи порівняння, комп'ютерне моделювання.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Було проведено віртуальне числове моделювання в системі *Engine analyzer pro v3.9*, на основі яких було досліджено поведіння потоків повітря в колекторі, виконано розробку впускного колектора та зроблено перевірку в середовищі *SolidWorks Flow*

*simulation*. На основі чого було розглянуто технології виготовлення і запропоновано найдоцільніший варіант.

### **Апробація та публікації.**

1. Ковальов М., Воронцов Б. Розробка високопродуктивної впускної системи гоночного автомобіля / Михайло Ковальов, Борис Воронцов // Вітчизняна наука на зламі епох: Проблеми та перспективи розвитку: Зб. наук. праць. – Переяслав, 2022. – Вип. 81. – С. 74 - 80.

2. Цибуленко В.О., Ковальов М.В., Сонець О.В., Воронцов Б.С. Огляд гібридного аддитивного виробництва, поєднаного Laser Powder Bed Fusion і високошвидкістним фрезеруванням / В.О. Цибуленко, М.В. Ковальов, О.В. Сонець, Б.С. Воронцов // Комплексне забезпечення якості технологічних процесів та систем (КЗЯТПС – 2022): XII Міжнар. наук.-практ. конф., 26-27 травня 2022 р.: тези доп. – Чернігів : НУ «Чернігівська політехніка», 2022. – Т. 1. – С. 67.

3. Акт використання результатів магістерської роботи у науково-технічних розробках ТОВ «Гранд КБ»

**Ключові слова:** впускний колектор, ранери, ресівер, технологія виготовлення, фрезерування, 3D друк, лиття.

## **Abstract**

The dissertation on competition of a degree of the master on a specialty 131 – Applied mechanics. - National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute" named after I. Sikorsky. - Kyiv, 2022.

The work on the topic "Technological features of the production of parts with an atypical internal surface" contains 94pages of A4 format, 5 chapters, 17 tables, 55 figures, 18 sources.

**Actuality of theme.** Over the last decade, the development of motor sports has accelerated its pace. With the growing popularity of racing, the need for the production of spare parts for sports cars increases. Such parts often have a unique structure and are produced in single copies. Therefore, today the topic of optimizing production and optimizing the efficiency of the technological process, by developing a methodology for the production of sharpened steel for small series and single production, is relevant.

### **The purpose and objectives of the research.**

**The purpose of this work** is to determine the most appropriate method of manufacturing the "runner" part during single production by analyzing the selected methods.

To achieve the goal, it is necessary to solve the following tasks:

- Familiarize yourself with the structure of racing cars
- Develop the design of the intake manifold
- Give different methods of production
- Analyze each of the manufacturing methods
- Perform a comparative analysis on the expediency of using the manufacturing method and propose the optimal one
- Develop a startup business model.

**The object of the research** is the technology of manufacturing parts of intake systems of sports cars.

**Research methods** - general scientific methods, such as analysis, methods comparison, computer simulation.

**Scientific novelty of the obtained results.** A virtual numerical simulation was carried out in the Engine analyzer pro v3.9 system, based on which the handling of air flows in the manifold was studied, the intake manifold was designed and checked in the SolidWorks Flow simulation environment. On the basis of this, manufacturing technologies were considered and the most appropriate option was proposed.

**Approbation and publications.**

1. Kovalev M., Vorontsov B. Development of a high-performance intake system of a racing car / Mykhailo Kovalev, Boris Vorontsov // Domestic science at the turn of the century: Problems and prospects for development: Collection. of science works – Pereyaslav, 2022. – Issue 81. – P. 74 - 80.

2. Tsybulenko V.O., Kovalev M.V., Sonets O.V., Vorontsov B.S. Overview of hybrid additive manufacturing combined with Laser Powder Bed Fusion and high-speed milling / V.O. Tsibulenko, M.V. Kovalev, O.V. Sonets, B.S. Vorontsov // Comprehensive quality assurance of technological processes and systems (KZYATPS - 2022): XII International. science and practice conference, May 26-27, 2022: abstracts of add. – Chernihiv: Chernihiv Polytechnic University, 2022. – Vol. 1. – P. 67.

3. The act of using the results of the master's work in scientific and technical developments of "Grand KB" LLC

**Keywords:** intake manifold, runners, receiver, manufacturing technology, milling, 3D printing, casting.

## Зміст

Вступ.....	3
1. ПЕРЕГОНОВІ АВТОМОБІЛІ ДЛЯ ДРАГ-РЕЙСИНГУ .....	4
1.1. Драг-рейсінг .....	4
1.2. Конструкція та особливості дрегстерів.....	6
1.3. Підвищення потужності двигуна.....	7
Висновок: .....	8
2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИТНА .....	9
2.1. Будова впускного колектора .....	9
2.2. Автоспортивний впускний колектор.....	11
2.3 Методика розробки внутрішньої будови колектора .....	12
2.4 Розробка внутрішньої будови впускного колектора для Mazda MPS.....	16
2.5 Розробка твердотілої моделі колектора .....	30
Висновок: .....	36
3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ.....	37
3.1. Лиття в піщані форми по виплавлюваним моделям .....	37
3.1.1. Процес відливання деталі.....	38
3.1.2. Литі ранери колектора .....	40
3.2. 3D друк металом.....	45
3.2.1. Вплив змінних процесу на утворення дефектів структури.....	48
3.2.2. 3D друк в автоспорті.....	52
3.2.3. Друковані ранери колектора .....	56
3.2.4. Цінова політика на 3D друк .....	58
3.3. Фрезерування з суцільної заготовки.....	60
3.3.1. Фрезерування ранерів .....	60
3.3.2. Цінова політика фрезерування.....	63
3.4. Аналіз методів виготовлення .....	64



Висновок: .....	65
4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПІСЛЯ ОБРОБЛЕННЯ.....	66
4.1. Дослідницька робота .....	66
4.1.1. Розгляд існуючих досліджень .....	67
4.2. Моделювання методом скінчених елементів .....	70
4.2.1. Наукова складова дослідження.....	70
4.2.2. Вплив швидкості різання та подачі .....	74
4.2.3. Вплив параметрів інструмента .....	77
Висновок: .....	82
5. СТАРТАП – ПРОЄКТ .....	83
5.1. Опис ідеї проекту.....	83
5.1.1. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	84
5.2. Технологічний аудит ідеї проекту .....	85
5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	86
5.3.1. SWOT-аналіз стартап-проекту.....	87
5.3.2. Альтернативи ринкової поведінки .....	88
5.3.3. Визначення стратегії та охоплення ринку .....	88
5.3.4. Формування базової стратегії розвитку.....	89
5.3.5. Вибір стратегії конкурентної поведінки .....	90
5.3.6. Визначення цінових меж .....	91
5.3.7. Визначення оптимальної системи збуту.....	92
5.3.8. Розроблення концепції маркетингових комунікацій.....	92
ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ .....	94

## Вступ

В даній роботі розглянемо розробку високопродуктивної впускної системи спортивного автомобіля для встановлення світового рекорду.

З давніх-давен люди намагались довести свою перевагу в розумі, силі, винахідливості... тому, після винайдення автомобілів, невдовзі з'явилися автоспортивні змагання. Автоперегони з'явилися наприкінці XIX століття, але більшість перших заїздів мало на меті показати, що авто може бути альтернативою коню. Згодом автоперегони здобули визнання спільноти, це почало цікавити не тільки учасників змагань, а привертати увагу глядачів. З того часу, участь автовиробників в перегонах є невід'ємною частиною розвитку компанії, адже всі технології, які використовуються в сучасних авто, були винайдені автоспортивними інженерами. З плином часу автоспортивні змагання почали еволюціонувати, змінюватись, розгалужуватись. Так наприкінці минулого століття виникли перегони з прискорень- драгрейсинг, де головною метою є пройти пряму ділянку треку за мінімальний проміжок часу. Напочатку 2010 років виникло ще одне з підвидів змагань з прискорення, де за головну ціль беруть максимально швидке прискорення з 100км/год до 200км/год.

Залучившись підтримкою гоночного підрозділу компанії «GRAND KB», було прийнято рішення про створення спортивного автомобіля для встановлення рекорду з прискорення 100-200км/год для конкретного автомобіля, а саме: Mazda Performance Series 6. Проаналізувавши всі ключові складові автомобіля, було прийнято рішення про покращення динаміки автомобіля за рахунок збільшення потужності двигуна.

В цій роботі розглянемо методика створення моделі впускного колектора для спортивного автомобіля. Наведемо три методики виготовлення деталі «ранери»; виконаємо аналіз кожного з наведених методів виготовлення та приведемо порівняльний аналіз порівнявши технічні вимоги та економічну доцільність. А також виконаємо розробку моделі бізнесу для ведення торгівлі через інтернет мережу.

# 1. ПЕРЕГОНОВІ АВТОМОБІЛІ ДЛЯ ДРАГ-РЕЙСИНГУ

## 1.1. Драг-рейсінг

**Дрег-рейсінг** — перегони, що є спринтерським заїздом на дистанцію в 402 метри (1/4 милі). Рідше проводяться заїзди на 1/2 милі (близько 804 м), 1/8 милі (201 м) або на мірну милю (1609 м). По суті дрег-рейсінг, є перегонами на прискорення, що проводиться на прямій трасі. Особливу популярність перегони цього типу здобули в США, де вони проводяться вже більш як півстоліття. Найпоширенішими дисциплінами є перегони автомобілів і мотоциклів із поршневыми двигунами. Однак існують змагання для реактивних автомобілів і мотоциклів, електромобілів, скутерів, велосипедів і навіть тракторів і газонокосарок.[1]

Змагання із драг-рейсінгу проводять на найрізноманітнішій техніці, проте професійні змагання відбуваються на спеціально підготовлених автомобілях, які називають «драгстери». Основними конструктивними рисами є максимально полегшена конструкція з потужним двигуном, а органи управління дуже примітивні, адже змагання проводяться на прямій ідеально рівній трасі. Професійні автомобілі можуть досягати потужності 6000к.с.. Такі автомобілі проходять відрізок в четверть милі за 4,5-4,8 секунди зі швидкістю на виході 500-550км/год, а перші 100км/год розвивають за 0,2с.



Рис. 1.1.1 Драгстер потужністю 4000к.с.

Одним з підвидів драг-рейсингу є «roll on» перегони, основною відмінністю від класичного — старт з ходу ( при швидкості 50-100км/год). Такий вид перегонів виник на вулицях Сполучених Штатів Америки і довгий час був як нелегальний вид перегонів. Такі змагання набули широкого розповсюдження на потужних моноприводних автомобілях, бо для реалізації великої потужності для старту з місця не вистачає зчеплення з покриттям і машини замість прискорення просто зриваються в букс.

**Зазвичай, автомобілі, які приймають участь в змаганнях, діляться на класи:**

-*SL* — «*Вуличний легкий*» (Street Light). Серійний або серійний дороблений автомобіль будь-якого виробництва. 4-циліндровий. Об'єм двигуна до 1.600 см<sup>3</sup> включно[1]

-*FS A* — «*Вуличний швидкий А*» (Fast Street A). Серійний або дороблений серійний легковий автомобіль імпортного виробництва. 4-циліндровий. Об'єм двигуна 1.601-2.000 [1]

-*FS B* — «*Вуличний швидкий В*» (Fast Street B). Серійний або серійний дороблений легковий автомобіль імпортного виробництва. 4-циліндровий компресорний або 6-циліндровий атмосферний. Об'єм двигуна 2.000-2.500[1]

-*FS C* — «*Вуличний швидкий С*» (Fast Street C). Серійний або серійний дороблений легковий автомобіль імпортного виробництва. 4-циліндровий компресорний або 6-циліндровий атмосферний. Об'єм двигуна 2.500-3.000[1]

-*US* — «*Вуличний необмежений*» (Unlimited Street). Серійний або серійний дороблений легковий автомобіль імпортного виробництва. 6-циліндровий компресорний або 8-и й більше циліндровий атмосферний. Об'єм двигуна понад 3.000 см<sup>3</sup>[1]

-*SS* — «*Серійний полішениий*» (Super Stock). Серійний легковий автомобіль будь-якого виробництва, що проходить дистанцію 402 метра (1/4

милі) швидше 10 сек., підготовлений для дрег-рейсінга за технічними вимогами і специфікацією FIA SFI (Міжнародної федерації автомобільного спорту) або дорожній автомобіль будь-якого виробництва. 8-циліндровий і більше компресорний. Без обмеження об'єму двигуна. [1]

Для визначення класу автомобіля використовують додаткові коефіцієнти:

-двигун з компресором або турбокомпресором —1,6

-роторний двигун—1,8

-система вприску закису азоту—1,5



Рис 1.1.2 Дрегстер 1500к.с класу SS

## 1.2. Конструкція та особливості дрегстерів

**Дрегстер-** автомобіль підготовлений до змагань з прискорення, які проходять на дистанції в четверть милі (402м), півмилі (804м) або милю (1608м).

### Особливості конструкції:

-Полегшений кузов ( вийняті всі елементи обшивки салону, полегшені деталі обвісу)

-Підсилений кузов (проварені стики панелей кузова або вмонтований каркас безпеки)

-Велика потужність двигуна

-Доопрацьована підвіска для отримання максимального зчеплення.

В залежності від класу, в якому їде автомобіль, доопрацювання автомобіля дуже відрізняється, наприклад: автомобілі класу *SL*, *FS A*, *FS B*, *FS C* не дозволяють демонтувати обшивки салону, дозволено лише зняття задніх сидінь та обшивок багажного відсіку, а в класі *US та SS* дозволено будь-які зміни кузова та підвіски.

Так автомобілі, які беруть участь в змаганнях в класі *US та SS*, можуть бути обладнані каркасом безпеки, мати двигун змінений відносно того, який встановлювався на заводі, замінену підвіску на спортивну.

*Найбільшу увагу приділяють потужності двигуна, бо саме це показник дозволяє швидко прискорювати автомобіль. Часто потужність двигуна перевищує початкову в 5-6 разів. Це досягається встановленням порашених елементів, доопрацюванням огріхів фабричних деталей, підгонкою приєднаних компонентів.*

### **1.3. Підвищення потужності двигуна**

**Потужність двигуна внутрішнього згорання-** Потужністю називається робота, виконана за одну секунду. Вимірюють її у ватах (вт) або в кінських силах (к. с.). [2]

Для виконання роботи, двигуну потрібна енергія, а вона утворюється за рахунок спалення пального. Отже, для отримання більшої потужності, нам потрібно ефективно спалювати більше пального за одиницю часу. Для ефективного спалення палива нам потрібно відповідна кількість повітря, при спаленні однієї частини бензину нам потрібно 14,2-14,7 частин повітря. З цього

можна зробити висновок, що для збільшення потужності треба в двигун подати більшу кількість повітря і палива відповідно. [4]

*Основні методи підвищення потужності:*

- використання спортивного палива (з підвищеною стійкістю до взриву самотійно)
- використання палива на спиртовій основі
- пониження температури впускного повітря
- підвищення максимальних робочих обертів двигуна
- встановлення розподільчих валів з ширшими фазами та більшим підйомом клапану
- встановлення нагнітачів повітря (турбо чи звичайних компресорів)
- зменшення втрат енергії на терті компонентів
- збільшення робочого об'єму двигуна ( stroker kit)
- встановлення подачі закису азоту
- доопрацювання головки блоків циліндра, форм каналів, клапанів, форми та об'єму впускного колектора

Вищепродемонстрований список по підвищенню потужності двигуна розташований по рейтингу складності виконання цих доопрацювань (від простих до складних), деяким спортсменам достатньо виконати лише декілька з цих пунктів, але ентузіастам, котрі прагнуть встановлювати рекорди, кожна кінська сила цінна. Але ми зосередимо свою увагу на найскладнішому доопрацюванні.

**Висновок:** після проведеної роботи над першим розділом було опрацьована інформація про будову перегонових автомобілей; розглянуто методикку підвищення динаміки розгону автомобіля; вивчені шляхи збільшення потужності двигуна.

## 2. КОНСТРУКТОРСЬКА ЧАСТИТНА

### 2.1. Будова впускного колектора

**Впускний колектор** — елемент системи впуску багатоциліндрового поршневого двигуна внутрішнього згорання, який забезпечує рівномірне розподілення потоку паливо-повітряної суміші чи повітря (у двигунах з безпосереднім впорскуванням) до циліндрів. У бензинових двигунів у впускному колекторі потік повітря змішується з паливом, утворюючи паливо-повітряну суміш. [3]

Під час руху поршней вниз утворюється вакуум: потік суміші в колекторі впирається в закритий впускний клапан у такт двигуна. З ростом оборотів суміш у впускному колекторі відражається від перешкод і починає здійснювати «колебальні рухи». Після утворення таких рухів потік суміші рухається з більшою швидкістю. У визначених умовах такі коливання стають резонансними, в результаті чого суміш надходить у циліндри з великим тиском (процес називається резонансним наддувом).

Правильно спроектований колектор забезпечує кращу вентиляцію циліндрів. Це відбувається завдяки різності тисків у впускному та випускному тракці. Клапани на впуск і випуск газу мають певний крок роботи такта двигуна. Необхідно, щоб клапан був максимально відкритий або закритий в оптимальний момент, щоб за один цикл роботи циліндра на долю секунди клапан відкрився. Тиск на впуск стає трохи вище, ніж на випуску (де вже вийшов викид газу). Таким чином досягається більш ефективна продувка камери згорання.



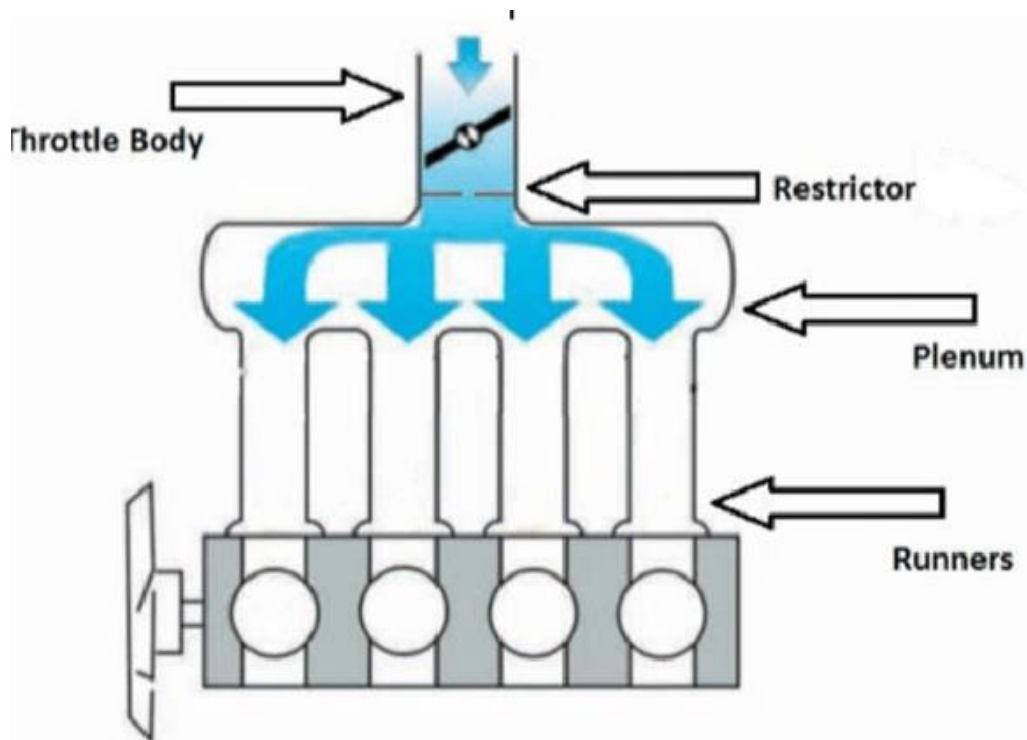


Рис 2.1.1 Схематичне зображення будови впускного колектора

За будовою розрізняють два основних види колекторів:

- Однокамерний
- Двухкамерний (Щільний)

Основною відмінністю в будові є те, що в однокамерному потік, який надходить від дроселя зразу розподіляється між циліндрами, а в двухкамерному спочатку потік рівномірно заповнює першу камеру, а потім через щілину потрапляє до основної (другої) камери, де вже розподіляється між циліндрами. За рахунок такої складної внутрішньої будови, щільний впускний колектор згладжує пульсації на впуску та сприяє рівномірному наповненню циліндрів у всіх режимах роботи двигуна. Повітряний потік оптимізовано поширюється на весь обсяг ресивера, цим запобігаючи паразитні завихрення. Зазвичай, щільні колектори використовують на спортивних автомобілях або на серійних, які є покращеною версією звичайних (BMW M power, Audi RS, Toyota GR, Ford RS).

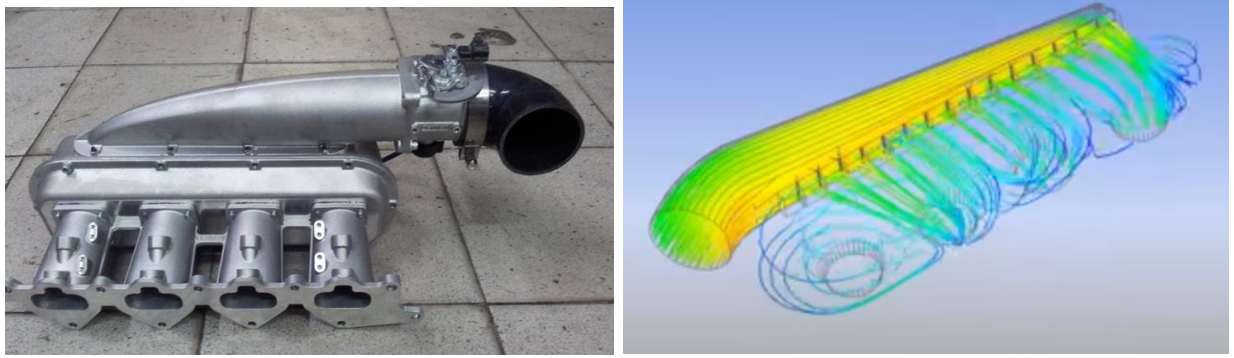


Рис 2.1.2 Щільний впускний колектор

## 2.2. Автоспортивний впускний колектор

Головною відмінністю впускних колекторів розроблених для автоспорту та для звичайних автомобілей є те, що *ефективний діапазон роботи* на автоспортивних автомобілях більш вузький, але більш високопродуктивний. На відміну, в цивільних автомобілях цей діапазон більш широкий(розподілений рівномірно на весь діапазон роботи двигуна), але й менш продуктивний, адже пересічному власнику автомобіля не потрібно різкий прихід потужності в конкретному діапазоні обертів двигуна.

Така відмінність зумовлена тим, що для змагань від двигуна треба отримати максимальну потужність, а це можливо зробити у вузькому діапазоні (800-1200 обертів/хв). Такого діапазону достатньо для того, щоб пілот міг тримати в «тонусі» двигун за рахунок правильно підібраних передаточних чисел коробки перемикання передач та головної пари. Для деяких автоспортивних змагань ефективний діапазон можуть розширювати, але він стає менш яскраво виражений характер. *Ефективний діапазон роботи* виражається в кількості обертів за хв (приклад: 6000-7000об/хв)

Іншим не менш важливим аспектом є *показник пропускної спроможності* системи. Спортивні впускні колектори мають пропускну спроможність вищу на 50-100% від своїх цивільних побратимів. Показник пропускної спроможності виражається в кількості повітря за одиницю часу (  $200\text{м}^3/\text{год}$  або закордонний формат 200 cubic feet per minute – 200CFM)

Останнім показником правильної роботи впускного колектора є *рівномірність розподілу наповнення між ранерами циліндрів*. Цей показник вказує максимальну нерівномірність наповнення по циліндрам і виражається у відсотках. Цей показник є дуже важливим, адже при нерівномірності наповнення не можна отримати максимальні значення потужності через те, що в деяких циліндрах співвідношення палива та повітря будуть неправильними, а вирівнювання цього показника по одному циліндру може призвести до критичної поломки двигуна.

### **2.3 Методика розробки внутрішньої будови колектора**

В більшості випадків, при підготовці автомобіля для змагань, команди розробляють велику кількість унікальних запчастин, іноді, деталі виготовляються конкретно за рекомендаціями пілота. Так і впускний колектор не є виключенням, далі розглянемо методику його розробки.

Перед процесом розрахунків та моделюванням колектора нам треба отримати велику кількість даних:

- Фізичні обмеження по розміру
- Бажана максимальна потужність
- Бажаний діапазон максимальної продуктивності
- Величину ступіню стиснення в камері згорання
- Параметри робочого ходу та діаметру поршня
- Розміри клапанів, їх кількість
- Параметри розподільчих валів та механізм зміни фаз
- Метод впорскування палива
- Характеристики палива
- Розміри турбіни та графік її роботи
- Характеристики випускної системи
- Розміри та особливості впускної системи
- Метод управління запаленням суміші

Після процесу збору даних переходимо до моделювання процесу роботи двигуна на автомобілі, цей процес виконується в програмному середовищі Engine analyzer pro v3.9

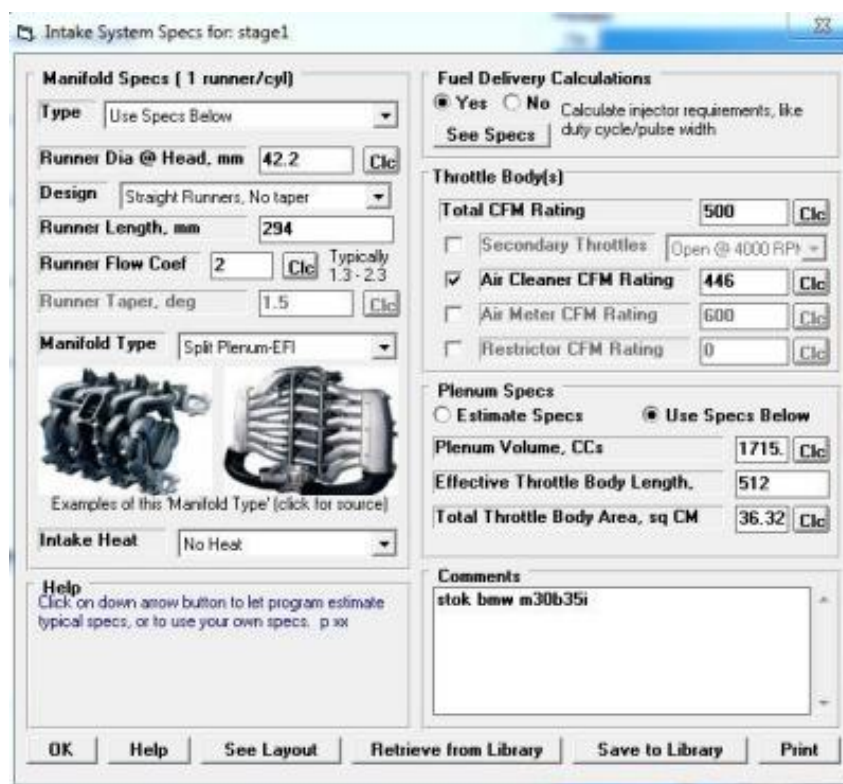


Рис 2.3.1 Діалогове вікно Engine analyzer pro v3.9.

Це програмне забезпечення створене винятково для розрахунків систем двигуна внутрішнього згорання. В програму вводяться всі параметри двигуна (хід та діаметр поршня, параметри газорозподільної системи, ступінь стиснення і тд) та навісного обладнання (параметри турбіни, впускного та випускного колектора, системи охолодження та ін.) (Рис. 2.3.1). З результатів розрахунку отримали значення об'ємної витрати повітря на вході та значення тиску на кожному ранері в залежності від обертів двигуна та положення колінчатого валу в кожную долю секунду (Рис. 2.3.2).



RPM = 6500 (data in inches)											
Cam Deg	Piston Depth	Int Lift	Exh Lift	Int PSI	Exh PSI	Cyl Temp	Cyl PSI	Int Clear	Exh Clear	Int Clash	Exh Clash
48	2,334	,000	,000	51,9	36,3	2860	351,9	2,334	2,333	0,000	0,000
49	2,395	,000	,001	51,5	36,3	2838	342,9	2,395	2,394	0,000	0,000
50	2,456	,000	,001	51,1	36,3	2816	333,8	2,456	2,455	0,000	0,000
51	2,515	,000	,001	50,7	36,3	2796	325,8	2,515	2,514	0,000	0,000
52	2,574	,000	,002	50,4	36,4	2775	317,7	2,574	2,572	0,000	0,000
53	2,630	,000	,003	50,0	36,4	2756	310,5	2,630	2,627	0,000	0,000
54	2,687	,000	,004	49,6	36,4	2737	303,4	2,687	2,683	0,000	0,000
55	2,740	,000	,005	49,2	36,5	2719	297,0	2,740	2,735	0,000	0,000
56	2,794	,000	,007	48,9	36,5	2702	290,5	2,794	2,788	0,000	0,000
57	2,846	,000	,009	48,4	36,6	2678	282,2	2,846	2,837	0,000	0,000
58	2,897	,000	,011	47,9	36,7	2654	273,9	2,897	2,886	0,000	0,000
59	2,945	,000	,014	47,6	36,8	2639	269,0	2,945	2,932	0,000	0,000
60	2,993	,000	,016	47,3	36,9	2624	264,2	2,993	2,977	0,000	0,000
61	3,039	,000	,020	47,1	37,0	2611	259,9	3,039	3,019	0,000	0,000
62	3,084	,000	,023	46,8	37,1	2597	255,6	3,084	3,061	0,000	0,000
63	3,127	,000	,027	46,6	37,2	2584	251,7	3,127	3,100	0,000	0,000
64	3,169	,000	,031	46,4	37,3	2572	247,8	3,169	3,138	0,000	0,000
65	3,208	,000	,035	46,3	37,7	2558	244,1	3,208	3,173	0,000	0,000
66	3,248	,000	,040	46,1	38,0	2545	240,5	3,248	3,207	0,000	0,000
67	3,284	,000	,046	46,0	39,4	2523	235,1	3,284	3,238	0,000	0,000
68	3,320	,000	,051	45,8	40,8	2501	229,8	3,320	3,269	0,000	0,000
69	3,353	,000	,057	45,7	42,1	2484	226,2	3,353	3,296	0,000	0,000
70	3,386	,000	,063	45,7	43,4	2467	222,6	3,386	3,323	0,000	0,000
71	3,416	,000	,070	45,7	45,3	2446	218,6	3,416	3,346	0,000	0,000
72	3,446	,000	,076	45,7	47,2	2425	214,7	3,446	3,369	0,000	0,000
73	3,472	,000	,084	45,7	49,7	2401	210,3	3,472	3,389	0,000	0,000
74	3,499	,000	,091	45,7	52,1	2377	206,0	3,499	3,408	0,000	0,000
75	3,523	,000	,099	45,8	55,5	2337	199,1	3,523	3,424	0,000	0,000
76	3,546	,000	,106	45,9	58,9	2298	192,2	3,546	3,440	0,000	0,000
77	3,567	,000	,115	46,0	60,4	2271	187,5	3,567	3,452	0,000	0,000
78	3,587	,000	,123	46,1	62,0	2245	182,9	3,587	3,464	0,000	0,000
79	3,604	,000	,132	46,3	64,1	2205	175,7	3,604	3,473	0,000	0,000
80	3,622	,000	,140	46,5	66,3	2166	168,5	3,622	3,481	0,000	0,000
81	3,636	,000	,149	46,6	66,9	2140	163,9	3,636	3,486	0,000	0,000
82	3,650	,000	,158	46,8	67,5	2115	159,2	3,650	3,492	0,000	0,000
83	3,661	,000	,167	47,1	67,9	2080	152,5	3,661	3,493	0,000	0,000
84	3,672	,000	,176	47,3	68,2	2044	145,7	3,672	3,495	0,000	0,000
85	3,680	,000	,186	47,7	67,8	2011	139,4	3,680	3,494	0,000	0,000
86	3,688	,000	,195	48,0	67,4	1978	133,0	3,688	3,493	0,000	0,000

Рис 2.3.2 Фрагмент даних отриманих в Engine analyzer pro v3.9

Ці дані дають змогу виконати розрахунок та симуляцію потоків повітря в колекторі. За рахунок того, що ми маємо данні по витраті повітря на вході в колектор та значення тисків на кожному ранері, ми можемо змодельовати повноцінний процес протікання потоків з усіма перехідними режимами.

Деякі розробники впускних систем роблять симуляцію потоків, в якій одночасно з усіх ранерів з однаковими показниками тисків виконується робота. За такої перевірки не можна адекватно оцінити роботоздатність системи, оскільки не утворюється процес симуляції перехідних режимів, котрі найнебезпечніші для утворення турбулентних потоків.

Наступним етапом є вибір концепції (п.2.1) впускного колектора враховуючи фізичні обмеження та рекомендації по вихідному продукту. Обравши

концепт будови, починається процес проектування першого прототипу. Він не потребує детального відтворення всіх дрібниць, а лише загальні форми, які враховують вільне місце в підкапотному просторі та місця приєднаних деталей (форсунки, дросель, датчики, штуцера).

Після цього починається процес симуляції протікання робочого циклу, для цього використовуємо програмне забезпечення *SolidWorks Flow simulation*. В виді таблиці в програму задаються вхідні дані, які будуть моделювати процес роботи двигуна.

Iteration	CriteriaType	CPUTime	PhysTime	Travels	Value	AvValue	MinValue	MaxValue	Delta	Criteria	Progress
1	0	1.31465477e-05	0.00700186331		-2.13529981e-44	-2.13529981e-44	-2.13529981e-44	-2.13529981e-44	0	0	0
2	0	2.30337168e-05	0.0140037266		0.00153191497	0.000657570921	-2.13529981e-44	0.00153191497	0.000657570921	0	0
3	0	3.29091236e-05	0.0210055899		0.00255061226	0.00122563689	-2.13529981e-44	0.00255061226	0.00122563689	0	0
4	0	4.29778315e-05	0.0280074532		0.0030323428	0.00164890613	-2.13529981e-44	0.0030323428	0.00164890613	0	0
5	0	5.38950208e-05	0.0350093165		0.00318874771	0.00196082255	-2.13529981e-44	0.00318874771	0.00196082255	0	0
6	0	7.40740741e-05	0.0420111798		0.00268755056	0.00215879577	-2.13529981e-44	0.00318874771	0.00215879577	0	0
7	0	0.000120479901	0.0490130431		0.00314730037	0.00253954288	-2.13529981e-44	0.00318874771	0.00253954288	0	0
8	0	0.000148148148	0.0560149065		0.00486656647	0.00297413936	-2.13529981e-44	0.00486656647	0.00297413936	0	0
9	0	0.000191493915	0.0630167698		0.0062791039	0.0037222374	-2.13529981e-44	0.0062791039	0.0037222374	0	0
10	0	0.000222222222	0.0700186331		0.0082465885	0.00434785283	-2.13529981e-44	0.0082465885	0.00434785283	0	0
11	0	0.000296296296	0.0770204964		0.0102522362	0.00582394866	-2.13529981e-44	0.0102522362	0.00582394866	0	0
12	0	0.00037037037	0.0840223597		0.0149790009	0.00765495911	-2.13529981e-44	0.0149790009	0.00765495911	0	0
13	0	0.000444444444	0.091024223		0.0196236449	0.00964974008	-2.13529981e-44	0.0196236449	0.00964974008	0	0
14	0	0.000518518518	0.0980260863		0.0241865574	0.0117264283	-2.13529981e-44	0.0241865574	0.0117264283	0	0
15	0	0.000588555318	0.10502795		0.0286338529	0.0137383749	-2.13529981e-44	0.0286338529	0.0137383749	0	0
16	0	0.000592592593	0.112029813		0.0327455874	0.0138678692	-2.13529981e-44	0.0327455874	0.0138678692	0	0
17	0	0.000666666667	0.119031676		0.0329803512	0.0159914783	-2.13529981e-44	0.0329803512	0.0159914783	0	0
18	0	0.000740740741	0.12603354		0.0372500418	0.0181173347	-2.13529981e-44	0.0372500418	0.0181173347	0	0

Рис 2.3.3 Фрагмент вхідних даних по одному циліндру для симуляції в *SolidWorks Flow simulation*

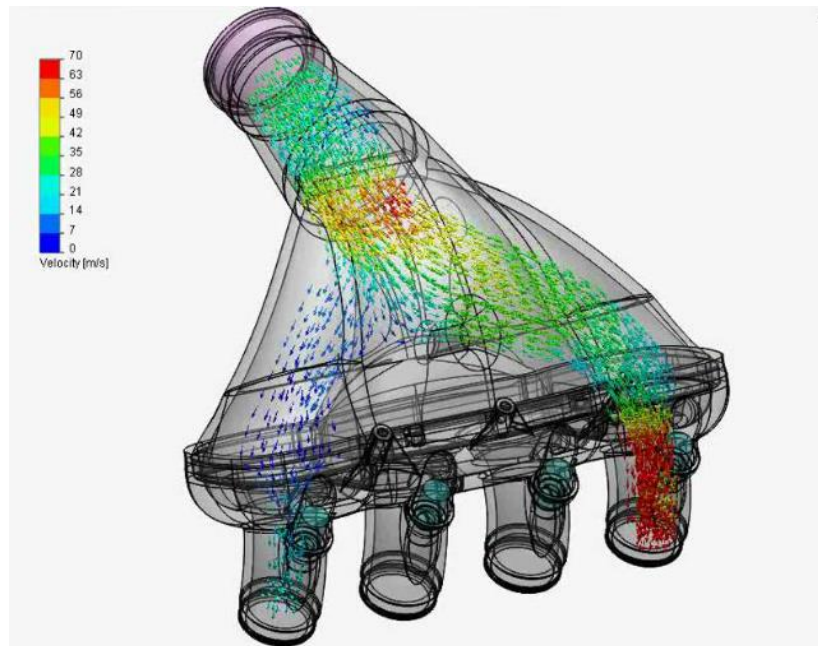


Рис 2.3.4 Скріншот симуляції в *SolidWorks Flow simulation*

В результаті отримуємо анімацію протікання потоків в колекторі та значення масової витрати повітря по циліндрам. З цього можемо зробити висновки по якості виконаної роботи, знайти слабкі місця, модернізувати будову та запустити повторний процес аналізу. Такий циклічний процес слід повторювати до отримання бажаного результату.

#### **2.4 Розробка внутрішньої будови впускного колектора для Mazda MPS**

Головною ціллю розробки є досягнення більшої пропускної здатності та кращої рівномірності наповнення ніж у найкращого представника, який існує на ринку, а саме JMF intake for Mazda 6 MPS.

Для розробки впускного колектора для проекту компанії «Grand KB» (ГКВ) нам треба виконати збір всієї необхідної інформації по наданому автомобілю.

**Першим** етапом був збір інформації характеристик компонентів двигуна та його навісного обладнання.

## Характеристики компонентів двигуна

Назва	Характеристика	
Двигун	Внутрішнього згорання, поршневий	
Кількість циліндрів	4	
Діаметр x хід поршня	87,5x94мм	
Робочий об'єм двигуна	2,3 літра	
Ступінь стиснення	9,5:1	
Розподільчий механізм	подвійний верхній розподільний вал, 4 клапана на циліндр, система зміни фаз	
Паливна система	Система прямого впорску бензину, портовий впорск бензину, портовий впорск метанолу	
Паливо	Високооктановий бензин А100 та водометанол з вмістом спирту 70%	
Впускний розподільчий вал Kelford Cams 247c	Максимальний підйом	10,85мм
	Положення в градусах при підйомі 1мм на відкриття	228*
	Кількість градусів при підйомі більше 1мм	64*
	Рекомендоване перекриття	0,3мм
	Максимальний підйом	10,9мм



Випускний розподільчий вал Kelford Cams 247c	Положення в градусах при підйомі 1мм на відкриття	236*
	Кількість градусів при підйомі більше 1мм	52*
	Рекомендоване перекриття	0,35мм
Впускний клапан	Діаметр 36мм, товщина стрержня 7мм	
Випускний клапан	Діаметр 31мм, товщина стрержня 7мм	
Діаметр дроселя	63мм	
Турбонагнітач	Garrett G30-770, twin scroll, A/R 0,83	
Випускний колектор	Рівнодовгий, твінскрольний діаметр ранерів 38мм, довжина ранерів 380мм	
Випускна магістраль від турбіни	Прямоточна( без компенсаційних камер), діаметром 81мм, довжиною 4,1м	
Фільтр впускного повітря	Нульового супротиву: K&N 691009TR, 102мм вихід, максимальна потужність 900к.с.	
Подача повітря до турбіни	Забір холодного повітря, Магістраль діаметром 102мм, довжина 760мм	
Подача повітря до охолоджувача	Діаметром 76мм, довжиною 1450мм	
Подача повітря після охолоджувача	Діаметром 76мм, довжиною 1120мм	

Охолоджувач стиснутого повітря	Фронтальний, системи повітря/повітря , об'єм 11л., фронтальне встановлення
Система керування двигуном	Link ECU

**Другим** етапом було сканування підкапотного простору та двигуна з навісним обладнанням. Цей етап є важливим, адже даний метод дозволяє виконати моделювання без фізичної наявності автомобіля поруч з інженером, а також дозволяє розробляти деталі в обмеженому просторі, враховуючи кожен елемент підкапотного відсіку.

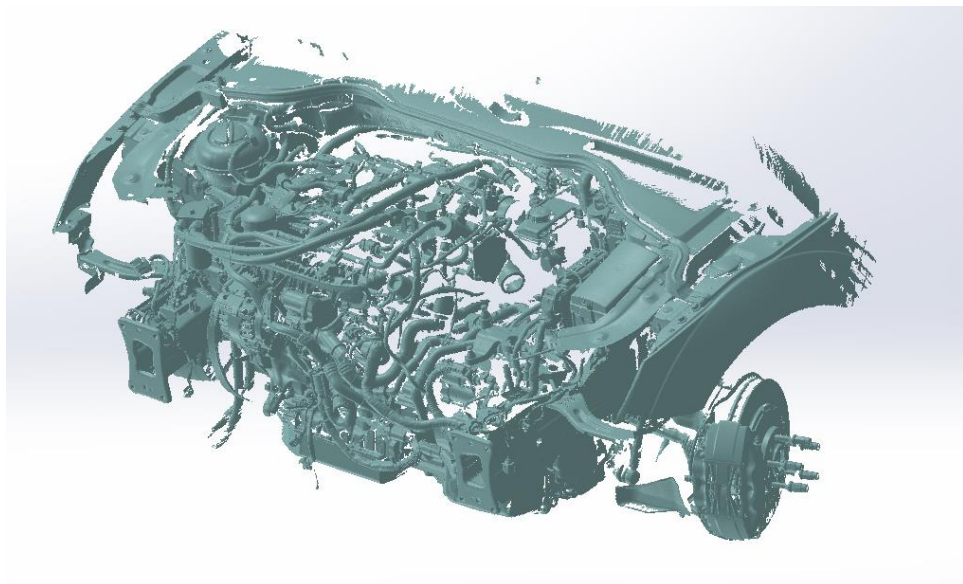


Рис 2.4.1 3D скан підкапотного простору

Застосування 3D скану автомобілей набуло широкого застосування серед заводських авто-спортивних команд, адже це єдиний метод отримати тривимірну модель фабричних деталей та вузлів (кузова, двигуна, елементів обвісу і тд.)

**Третім** етапом роботи є обробка сканів. В цей процес включається латання сигментів скану, які не відсканувались; виставлення координатів в кад системі; облегшення файлів; отримання площин, осей, точок геометрії; переведення

деталей в твердотільну модель (деталей, які мають критичне значення в своєму розташуванні. Які мають малі фізичні розміри, або встановлені з малим зазором). Для даного процесу використовуємо програмне забезпечення *Geomagic design X* та *Geomagic for solidworks*.

*Geomagic design X* дозволяє редагувати полігональну модель, в ній виконується спрощення ( зменшення кількості полігонів), адже в подальшому полігональна модель буде використовувати велику кількість оперативної пам'яті; знаходження та встановлення центру координатів; вирізання непотрібних елементів моделі; перетворення полігонів в площини методом апроксимації; створення сплайнів методом перерізу площиною; створення кривих поверхонь.

Надалі всі роботи з полігональною моделлю будуть відбуватись в доповненні до CAD системи *Geomagic for solidworks*. Це інтегрований модуль, який дозволяє виконувати прості процеси ( створення площин, осей, точок ) всередині програмного забезпечення *solidworks*. Таким чином це дозволяє розширювати можливості полігональної моделі не використовуючи побічних програм, що значно скорочує час на розробку деталей, адже уникається час на конвертацію файлів.

Кінцевим продуктом даного етапу є створення збірки сканованих компонентів в єдину модель в CAD системі.

**Четвертий** етап розробки включає в себе визначення фізичних обмежень накладених на впускний колектор та приєднувані компоненти. В результаті ми отримуємо модель «болванку», де зовнішня поверхня враховує зазори для рухомих деталей, відступи від термонавантажених елементів, простоту доступу для обслуговування навколишніх елементів та загальну компоновку підкапотного простору.

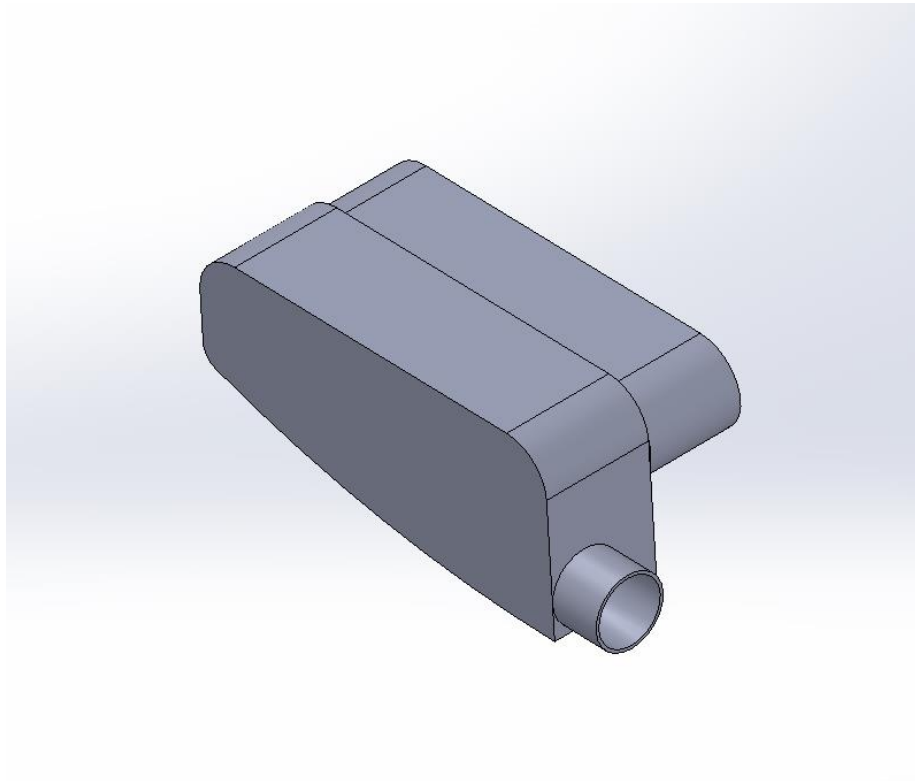


Рис 2.4.2 3D модель «болванка» впускного колектора

**П'ятим** етапом є визначення типу впускного колектора, який буде розроблятися, враховуючи обмеження які на нього накладаються. Так маючи відносно невеликі габаритні розміри та асиметричне розташування дросельної заслінки в межах корпусу впускного ресівера, було прийнято рішення по розробці *щільного колектора* (П2.1). Така конструкція дає змогу вирівняти рівномірність наповнення між ранерами за рахунок двухкамерної будови, а також можливість реалізації такої будови в умовах обмеженого простору.

На **шостому** етапі розробки починається процес створення перших прототипів впускних колекторів. Процес створення починається від площини змикання з головкою блока двигуна, створюється:

- Фланець, який приєднується до головки
- Ранери по яким йде підвід повітря для кожного з циліндрів
- Основна камера колектора

- До щільна камера колектора
- Щільне з'єднання камер
- Фланець дроселя

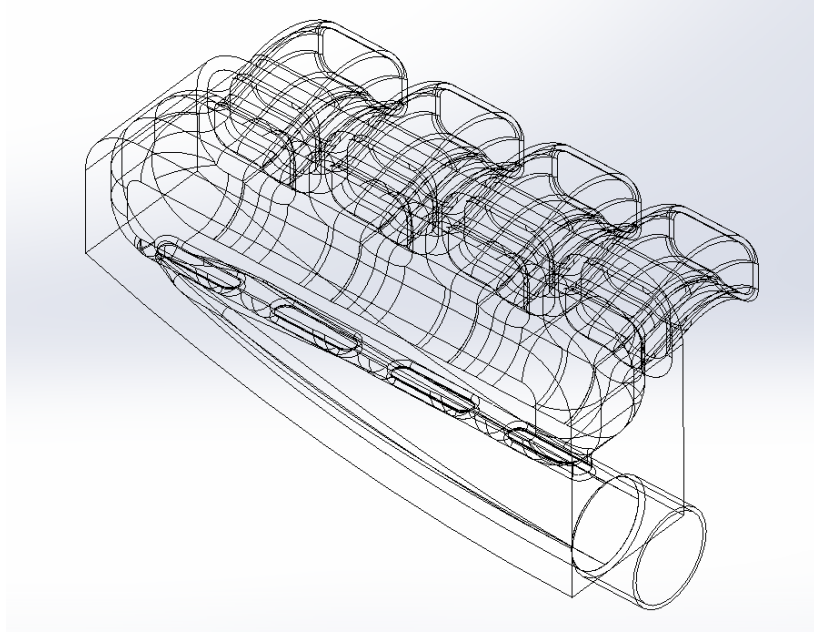


Рис 2.4.3 3D модель прототипу впускного колектора

До кожного з елементів моделі використовуємо базові вимоги правильної побудови:

- Фланець- має максимально точно повторювати контур каналів, які знаходяться на площині головки блока циліндрів
- Ранери- повинні мати максимально плавну форму та переходити в канали головки без зміни напрямку потоку (потік не має битись об стінки каналів головки); мати рівномірне невелике звуження в напрямку від основної камери до фланця
- Основна камера- мати максимально великий об'єм дозволений обмеженнями габаритів
- До щільна камера- мати маленький об'єм та рівномірне звуження в сторону від дроселя
- Щільне з'єднання- мати загальну площу перерізу сумірний з площею дросельної заслінки

- Фланець дроселя- мати площу як у дросельної заслінки та стикуватись з нею без сходинок.

Для повноцінної перевірки було спроектовано внутрішню будову каналів головки блоку циліндрів, це було зроблено для перевірки протікання потоку на стиці колектора і головки. Для виконання такого проектування було зроблено розріз головки блоку чарез площину проходження каналу та виконане вимірювання на координатній машині.

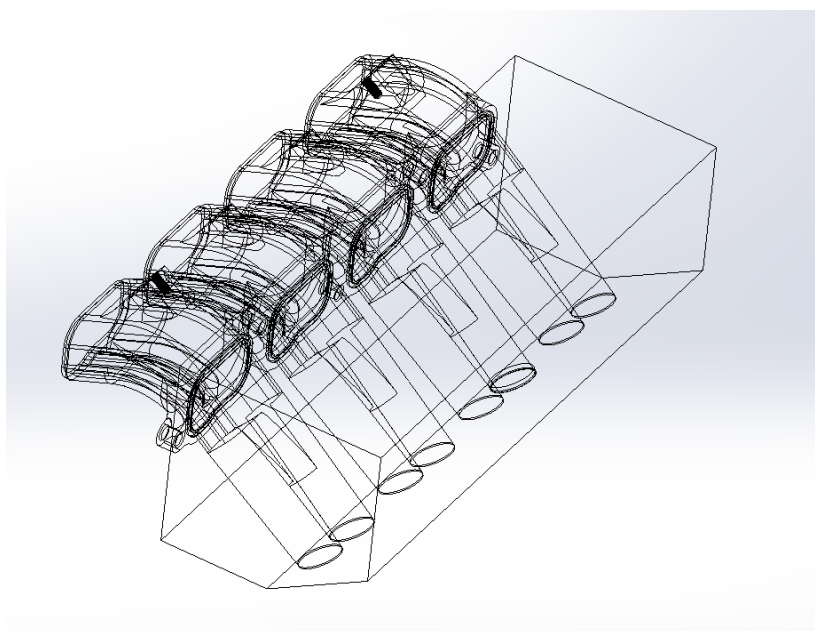


Рис 2.4.4 Спрощена 3D модель головки блоку циліндрів та частини ранерів колектора

Сьомим етапом є процес розрахунку даних, які потрібні для симуляції протікання потоків в колекторі.

Розрахунок масової витрати повітря:

$$V=P \cdot A/F \cdot BSFC/60$$

Де **V**- масова витрата повітря футів/хв (lb/min)

**P**- потужність двигуна в кінських силах (HP)

**A/F**- співвідношення робочої суміші двигуна

**BSFC**- питома витрата палива фут/К.С. • год (lb/hp•hr)

Мінімальне значення якості суміші для 98 бензину не може бути нижче 12:1, а якщо спортивне паливо (100-105 октан) – не нижче 12,5:1. Для метанолу це значення становить 5,0:1. Питома витрата (BSFC) для турбомоторів варіюється від 0,5 до 0,6 lb/hr•hr. Прийемо середнє значення 0,55.

$$V=800 \cdot 12 \cdot 0,55 / 60$$

$$V=88 \text{ lb/min}$$

Так знаючи питому витрату повітря та параметри компонентів двигуна (т.2.4.1) можемо перейти до програмного середовища Engine analyzer pro v3.9. та провести моделювання процесу прискорення автомобіля на 4 передачі ( що дає максимально достовірну інформацію про роботу двигуна).

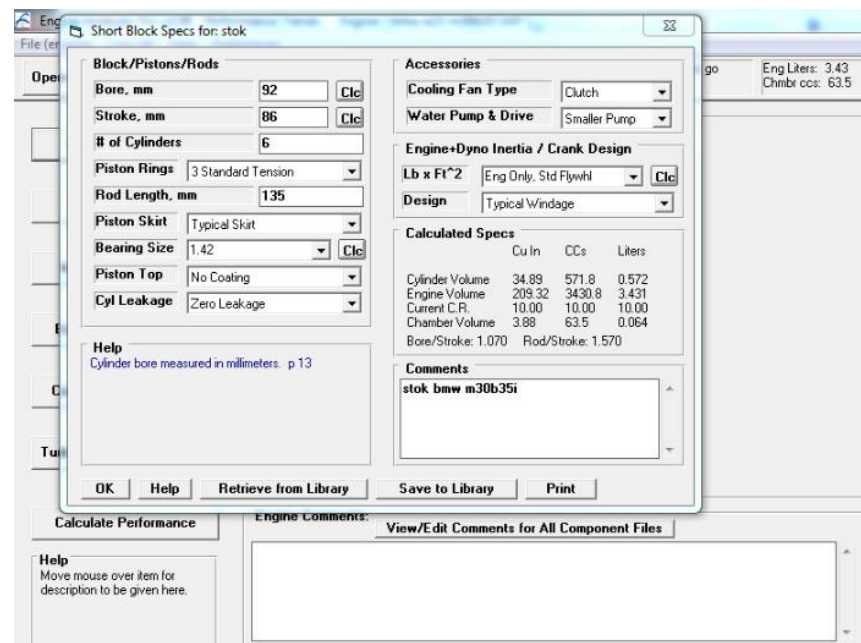


Рис 2.4.5 Діалогове вікно Engine analyzer pro v3.9 вибору параметрів блоку циліндрів

Зробивши віртуальний прогін автомобіля на стенді, ми маємо потрібні дані для того, щоб перейти до перевірки роботоzдатності колектора.

**Восьмим** етапом є процес симуляції потоків повітря всередині колектора. Для цієї операції використовуємо програмне середовище Solidworks, а саме його доповнення Flow simulation.



Спочатку формуються заглушки на всі відкриті отвори, потім на заглушку дросельної заслінки задається масовий розхід та тиск повітря, на вісім (по дві на один циліндр) заглушок циліндрів задається тиск в залежності від плинину часу. Розрахунки зосереджені на 6500об/хв, це діапазон максимально сприятливий для отримання максимальної потужності, оскільки турбіна знаходиться в острівку ефективності, розподільчі вали виходять на пік своєї продуктивності, тому колектор проектується під максимальну віддачу на цих обертах. Данні для розрахунку мають циклічний характер, цикл повторюється кожні 2 оберти, оскільки 4-х тактний двигун робить повний робочий цикл за 720°. Всі дані для виконання симуляції подаються в окремих текстових файлах, які мають нумерацію рядків, плин часу та змінні параметри (тиску чи масової витрати).

Iteration	CPUTime	PhysTime	Travels	Value	AvValue	MinValue	MaxValue	Delta
1	2.983516711e-06	0.00667839508	0.114107462	0.114107462	0.114107462	0.114107462	0.114107462	0
2	3.149226504e-05	0.0133567902	0.117889587	0.115396877	0.114107462	0.117889587	0.00128941557	
3	2.03878915e-05	0.0200351852	0.116814501	0.11577689	0.114107462	0.117889587	0.00166942834	
4	3.261305807e-05	0.0267135803	0.113351093	0.115243775	0.113351093	0.117889587	0.00166942834	
5	3.324545577e-05	0.0333919754	0.105422555	0.113330048	0.105422555	0.117889587	0.00244684206	
6	3.455256593e-05	0.0400703705	0.0574729694	0.0972926404	0.0574729694	0.117889587	0.0184842495	
7	3.60891721e-05	0.0467487655	0.0202662121	0.0733260223	0.0202662121	0.117889587	0.0424508676	
8	4.740740741e-05	0.0534271606	0.0274461908	0.0683803519	0.0202662121	0.117889587	0.047396538	
9	4.0000102968619	0.0601055557	0.00660616495	0.0510455848	0.00660616495	0.117889587	0.0647313051	
10	4.0000134975022	0.0667839508	0.0027349301	0.0395897595	0.0027349301	0.117889587	0.0761871304	
11	4.0000148148148	0.0734623459	0.0082253929	0.0368008839	0.0027349301	0.117889587	0.078976006	
12	5.0000203200646	0.0801407409	0.00104725815	0.027114269	0.00104725815	0.117889587	0.0886626209	
13	5.0000222222222	0.086819136	0.0043358675	0.025164504	0.00104725815	0.117889587	0.0906123858	
14	5.000027328837	0.0934975311	0.00104352579	0.0206573037	0.00104352579	0.117889587	0.0951195862	
15	5.0000296296296	0.100175926	0.00336627692	0.0193146252	0.00104352579	0.117889587	0.0964622647	
16	6.0000369215258	0.106854321	0.00048431553	0.0155956926	0.00048431553	0.117889587	0.100181197	
17	6.000037037037	0.113532716	0.00953216369	0.0155767817	0.00048431553	0.117889587	0.100200108	
18	6.000044143694	0.120211111	0.00091016759	0.0132156156	0.00048431553	0.117889587	0.102561274	
19	6.0000444444444	0.126889506	0.0104658831	0.0131970084	0.00048431553	0.117889587	0.102579881	
20	7.0000513166473	0.133567902	0.00104854148	0.0115701148	0.00048431553	0.117889587	0.104206775	
21	7.0000518518518	0.140246297	0.00988801718	0.0115527525	0.00048431553	0.117889587	0.104224137	
22	7.0000592592593	0.146924692	0.000889490464	0.0102198447	0.00048431553	0.117889587	0.105557045	
23	8.0000666666667	0.153603087	0.000498078195	0.00913964844	0.00048431553	0.117889587	0.106637241	
24	8.0000740740741	0.160281482	0.000432104635	0.00826889406	0.000432104635	0.117889587	0.107507996	
25	9.0000814814815	0.166959877	0.00038090785	0.00755180441	0.00038090785	0.117889587	0.108225085	
26	9.0000888888889	0.173638272	0.00029248115	0.00694668608	0.00029248115	0.117889587	0.108830029	
27	9.0000962962963	0.180316667	0.000223435833	0.00642967427	0.000223435833	0.117889587	0.109347216	
28	10.000103703704	0.186995062	0.000152669713	0.0059813168	0.000152669713	0.117889587	0.109795573	
29	10.000111111111	0.193673457	0.00014021993	0.00559191034	0.00014021993	0.117889587	0.11018498	
30	10.000118518519	0.200351852	0.00013868773	0.00525108393	0.00013868773	0.117889587	0.110525806	
31	11.000125925926	0.207030247	0.000142376656	0.00495057173	0.00013868773	0.117889587	0.110826318	
32	11.000133333333	0.213708642	0.00014275271	0.00468347068	0.00013868773	0.117889587	0.111093419	
33	12.000140740741	0.220387038	0.000144441716	0.00444457442	0.00013868773	0.117889587	0.111332315	
34	12.000148148148	0.227065433	0.000149742861	0.00422983284	0.00013868773	0.117889587	0.111547057	
35	12.0001555555556	0.233743828	0.000144149879	0.00403527651	0.00013868773	0.117889587	0.111741613	
36	13.000162962963	0.240422223	0.000145546897	0.00385847062	0.00013868773	0.117889587	0.111918419	
37	13.00017037037	0.2471100618	0.00014680846	0.003697094	0.00013868773	0.117889587	0.112077976	
38	13.000177777778	0.253779013	0.000147974805	0.00354921403	0.00013868773	0.117889587	0.112227676	
39	14.000185185185	0.260457408	0.000156759227	0.00341351584	0.00013868773	0.117889587	0.112363374	
40	14.000192592593	0.267135803	0.000167913154	0.00328868497	0.00013868773	0.117889587	0.112488205	
41	15.0002	0.273814198	0.000178917794	0.00317350841	0.00013868773	0.117889587	0.112603381	
42	15.000207407407	0.280492593	0.000192554945	0.00306704578	0.00013868773	0.117889587	0.112709844	

Рис 2.4.6 Фрагмент даних зміни тиску

Далі запускаємо наше дослідження, по завершенню якого ми отримуємо данні з масовими витратами по циліндрах та анімацію протікання процесу.



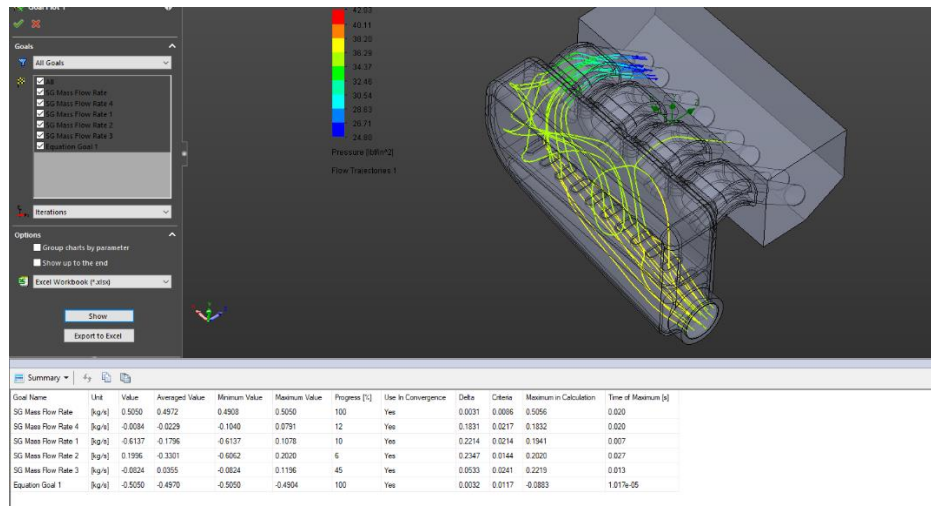


Рис 2.4.7 Скріншот анімації протікання потоків на прототипі колектора  
Дев'ятим етапом розробки є аналіз отриманих даних та модернізація конструкції.

Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria	Maximum in Calculation	Time of Maximum [s]
SG Mass Flow Rate	[kg/s]	0.150353922	0.128907387	0.066894442	0.184666829	33,7	Yes	0,02232405	0,007534032	0,256775621	0,002296296
SG Mass Flow Rate 4	[kg/s]	-0,0242674	0,086567165	-0,024267405	0,2516206	10,1	Yes	0,190437373	0,019354073	0,252498843	0,008740741
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	-0,28403774	0,082118689	-0,284037739	0,233591792	8,7	Yes	0,246763587	0,021607457	0,234048298	0,006592593
SG Mass Flow Rate 2	[kg/s]	-0,046085	-0,469298476	-0,578118884	-0,046084997	6,6	Yes	0,289610695	0,017976034	0,285460631	0,026666667
SG Mass Flow Rate 3	[kg/s]	0,204030438	0,171775114	0,086510126	0,240814945	40,7	Yes	0,060067283	0,024449079	0,280852634	0,066444444
Equation Goal 1	[kg/s]	-0,1503597	-0,128837507	-0,184471844	-0,066907825	35,4	Yes	0,022286181	0,007896373	0,00647371	2,56016E-05

Physical time [s]: 0.0785925926  
Analysis interval: 76

Рис 2.4.8 Дані отримані в результаті симуляції прототипу

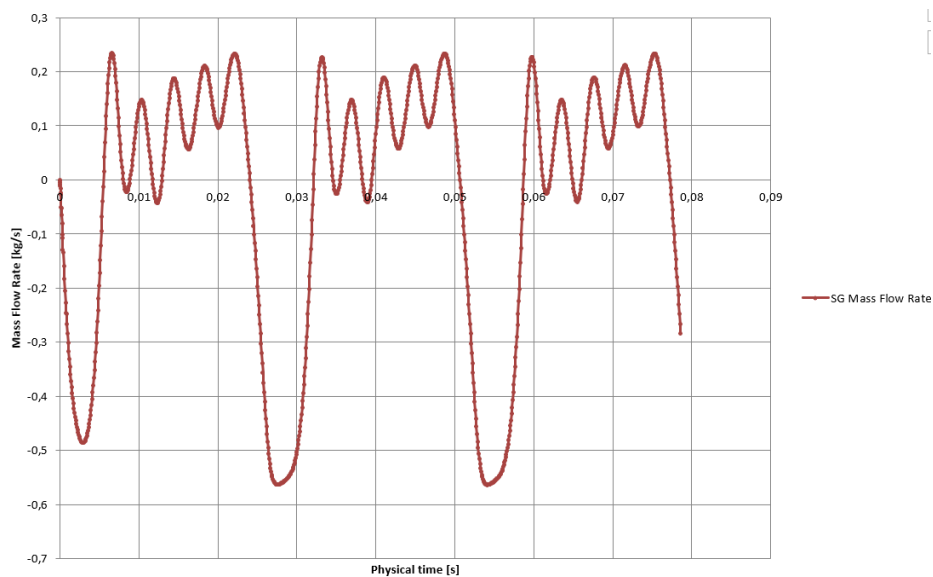


Рис 2.4.9 Графік масової витрати повітря першого циліндра

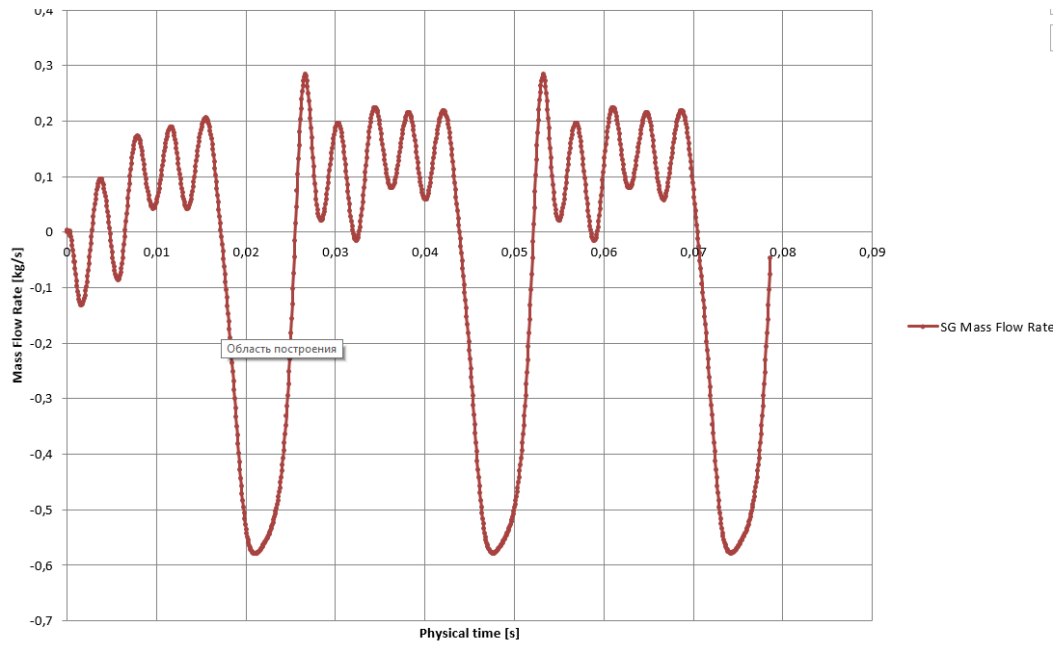


Рис 2.4.10 Графік масової витрати повітря другого циліндра

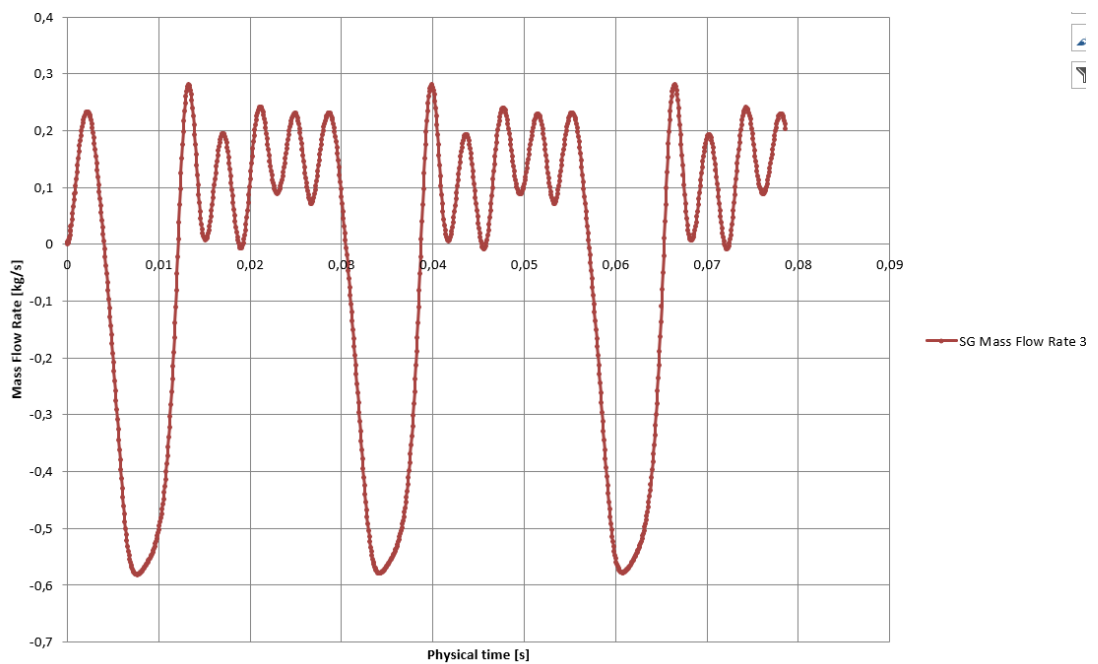


Рис 2.4.11 Графік масової витрати повітря третього циліндра

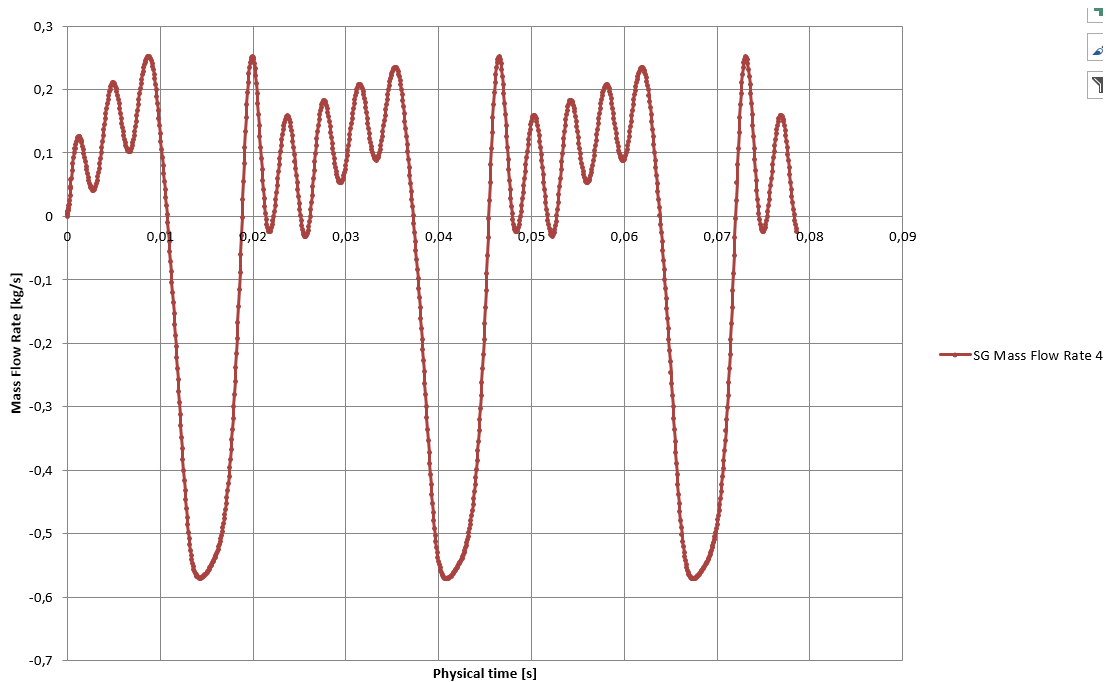


Рис 2.4.12 Графік масової витрати повітря четвертого циліндра

Для досягнення бажаного результату, після виконання аналізу ми циклічно повторюємо попарно **6, 8 та 9 етапи** розробки впускного колектора. Так виконавши 25-30 циклів вищевказаних етапів, було досягнуто бажаного результату, колектор розроблений сумісно з компанією Grand KB для проекту Mazda MPS 6 GKB кращий на 11% по рівномірності наповнення між циліндрами, а загальна пропускна здатність підвищилась на 6%.

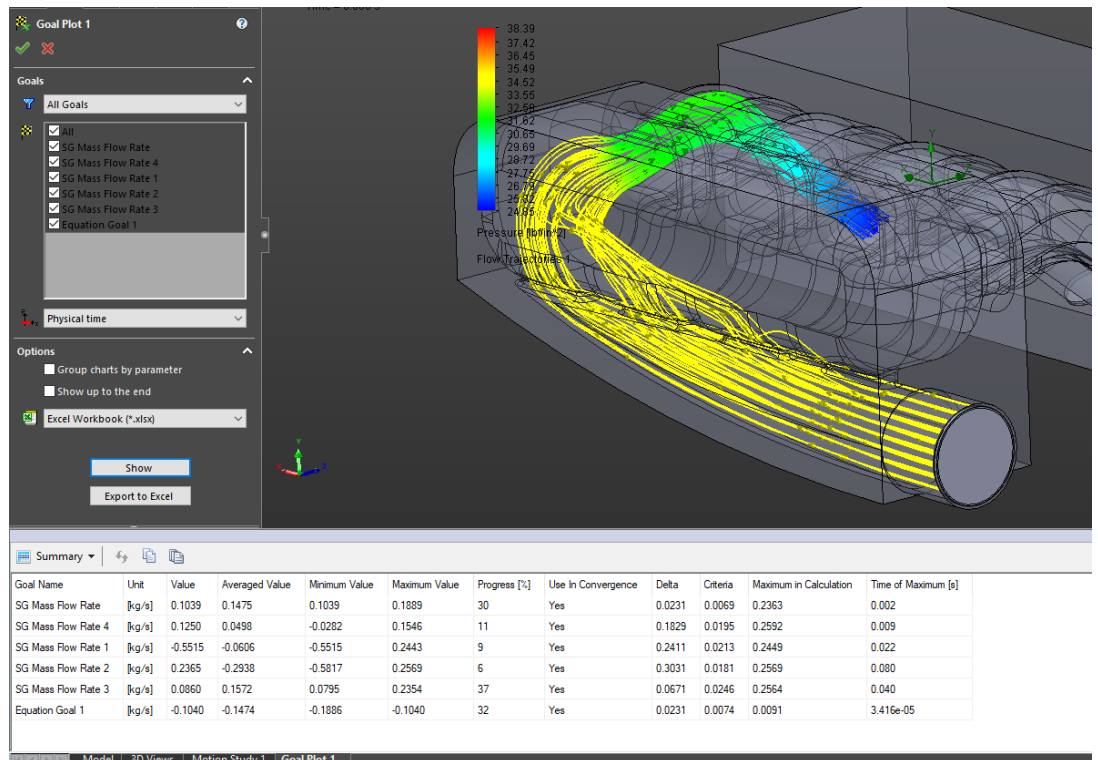


Рис 2.4.13 Скріншот анімації протікання потоків фінальній стадії розробки внутрішньої будови колектора

Провівши колосальну роботу по оптимізації, було виявлено, що найкращим випадком при створенні щільного колектора:

- Кількість щілин= $N_{\text{циліндрів}}+1$ , з розташуванням між виходами ранерів ( щілини по бокам забірних частин ранерів)
- Сумарна площа перерізу щілини рівна площі дроселя
- Площа перерізу кожної щілини може бути різною (різною площею вирівнюємо рівномірність наповнення)
- Об'єм основної камери колектора рівний 1,5-2,5 робочих об'ємів двигуна
- Мінімальний об'єм дощільної камери
- Максимально плавні переходи між камерами та ранерами
- Довжина каналів до клапану має бути підібрана під резонансну хвилю (бажано 5-7)

При проектуванні будови колектора для проекту «Mazda 6 MPS GKB» через щільну компоновку підкапотного простору від деяких «ідеологічно» вірних рішень довелося відмовитись. Так, через малий габарит, довелося відмовитись від концепції з кількістю щілин( $N_{\text{циліндрів}}+1$ ) та орієнтир на 5-7 резонансну хвилю.

## 2.5 Розробка твердотілої моделі колектора

Після розробки внутрішньої будови колектора приступаємо до розробки твердотілої моделі. Фінальна 3D модель повинна задовольняти такі умов:

- Не конфліктувати з внутрішньою будовою
- Не мати інтерференцій з іншими компонентами підкапотного простору
- Мати місяця кріплень під всі датчики, штуцера, форсунки і тд
- Бути легким в обслуговуванні
- Мати відносно низьку масу
- Бути технологічним
- Мати привабливий зовнішній вид

Для забезпечення технологічності, було прийнято рішення розробляти колектор зі збірних частин, оскільки внутрішня будова має нетипову форму, а також має задовольняти вимоги шорсткості. Розглядалось два основних види збірних конструкцій: роз'ємних та нероз'ємних. Було прийнято рішення робити нероз'ємний колектор, оскільки будь-який вид роз'ємних конструкцій вимагає ущільнення збірних частин, а в умовах підвищеного тиску, який використовується в автоспорті, це може призвести до розгерметизації, що є дуже небажаним результатом. Тому виготовлені окремі частини будуть зварені методом TIG. Це забезпечить гарантовану міцність та герметичність, а також зменшить собівартість, оскільки це значно спростить технологічний процес

виготовлення. Вирішено було розробити колектор складений з чотирьох основних частин:

- Ранери (чотири об'єднаних в одну частину) ■
- Перша половина ресівера ■
- Друга половина ресівера ■
- Фланець дроселя ■

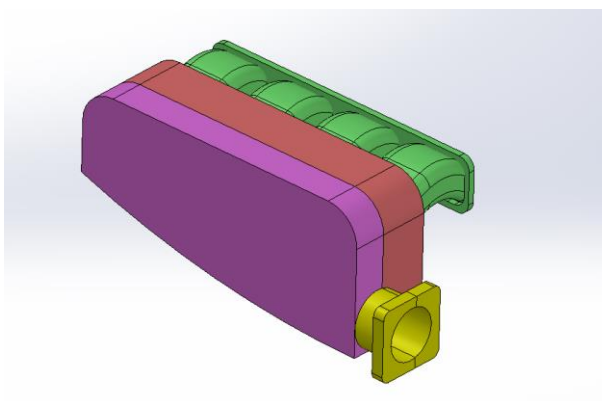


Рис 2.5.1 Умовне розділення колектора на частини

Після розбиття на окремі частини приступаємо до моделювання. Найкращим варіантом для моделювання такої конструкції є випадок, коли в збірці розташовуються всі приєднані деталі (датчик надуву, дросель, форсунки, штуцера), навколо цих деталей формується тіло колектора, навколо внутрішньої поверхні з певним відступом (3-6мм) формується зовнішня поверхня, а далі це доповнюється підсиленнями, заокругленням і тд.

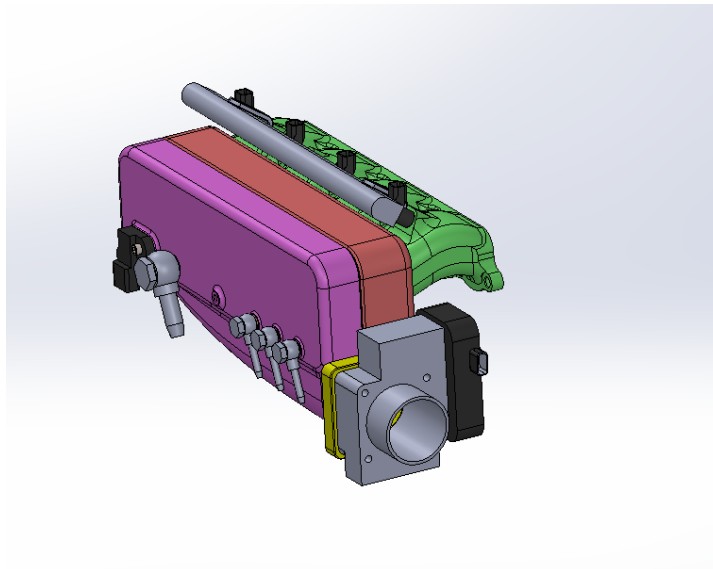


Рис 2.5.3 3D модель впускного колектора

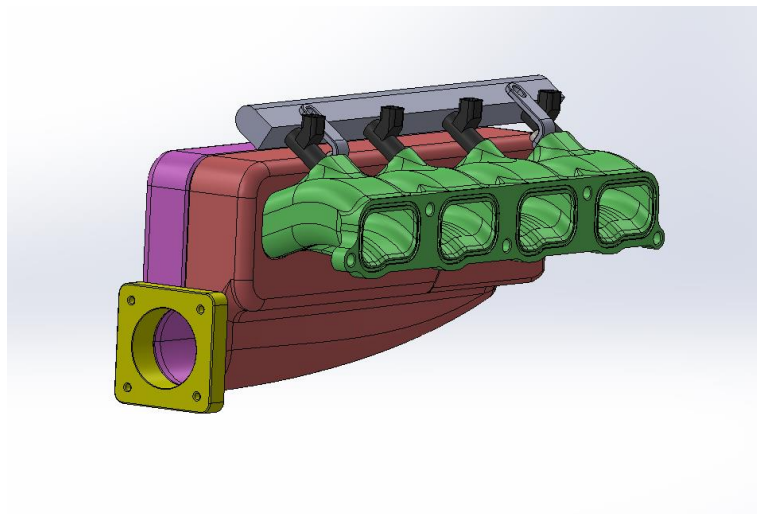


Рис 2.5.3 3D модель впускного колектора

Розробка всіх частин колектора виконана таким чином, щоб деталі перед зварюванням збирались по технології шип-паз, а також мають фаски на поверхнях, де неможливо створити катет, для підвищення міцності шва.

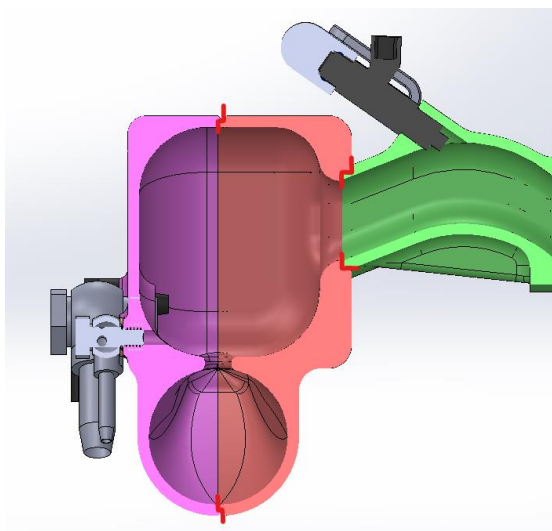


Рис 2.5.3 Зображення елементів стикування з технологією шип-паз

Невід’ємною частиною роботи по проектуванню кастомних деталей є перевірка макетом на відповідність до заданих параметрів. Частини колектора друкуються з пластика, склеюються в єдину конструкцію та монтується на двигун автомобіля. Це дозволяє переконатись що деталь легко обслуговувати, легко монтувати/демонтувати, що всі зазори правильно дотримано і тд.



Рис 2.5.4 Фото встановленого макету на автомобілі.

При проектуванні даного колектора було в його конструкцію було закладено два основних метода виготовлення:

- Методом 3D друку металу



- Литтям в піщані форми по виплавлюваним моделям

Це обумовлено одиничним виробництвом, тому данні методи є найдоцільнішим для їх виготовлення.



Рис 2.5.5 Фотореалістичний рендер частин колектора

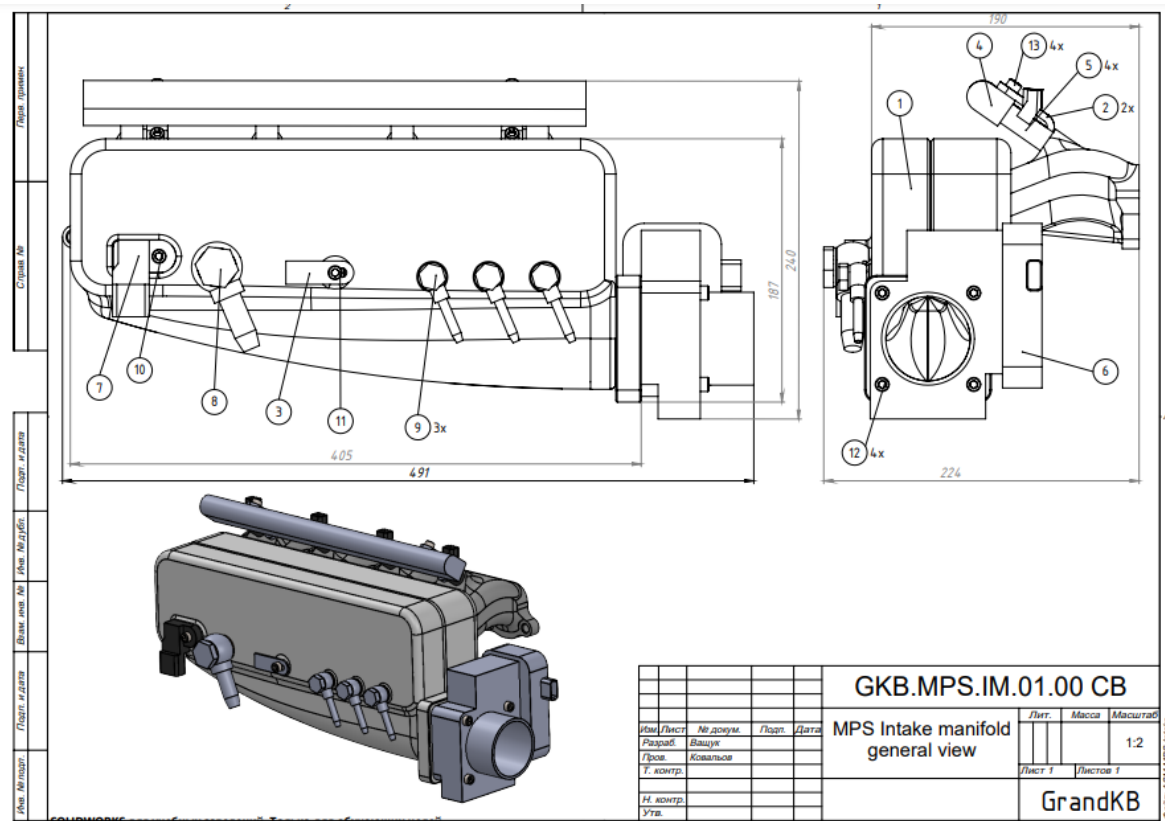


Рис 2.5.6 Складальне креслення впускного колектора

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				<u>Документация</u>		
A3			GKB.MPS.IM.01.00 CB	MPS Intake manifold general view		
				<u>Сборочные единицы</u>		
A3		1	GKB.MPS.IM.01.01 CB	MPS Intake manifold	1	
				<u>Детали</u>		
stp		2	GKB.MPS.IM.01.005	Fuel rail support MPS Intake	2	
dxl		3	GKB.MPS.IM.01.006	Oil dipstick support MPS Intake	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
		4		Fuel rail JMF	1	
		5		Fuel injector	4	
		6		Throttle FoMoCo L35M 13 640 A	1	
		7		MAP sensor BOSCH 0 281 002 456	1	
		8		Banjo fitting M22x1.5 with 2 copper washers	1	
		9		Banjo fitting M12x1.5 2 copper washers	3	
		10		Internal hex bolt M6x15	1	
		11,13		Internal hex bolt M6x10	5	
		12		Internal hex bolt M6x55	4	
				<b>GKB.MPS.IM.01.00 SP</b>		
Изм	Лист	№ докум	Подп.	Дата		
Разраб.	Ващук				Лист	Листов
Пров.	Ковальов				1	1
Н.контр.						
Утв.						
					<b>MPS Intake manifold</b>	

**Висновок:** в другому розділі було розглянуто методику розрахунку впускного колектора, для отримання високих показників продуктивності, виходячи з заданих умов; на прикладі конкретного автомобіля розглянули процес розрахунку внутрішньої будови впускного колектора; розробили твердотілу модель впускного колектора.

### **3. ТЕХНОЛОГІЧНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ВИГОТОВЛЕННЯ**

Щоб обрати метод виготовлення впускного колектора, буде розглянуто три різних технології:

- Лиття в піщані форми по виплавлюваним моделям
- 3D друк металом
- Фрезерування з суцільної заготовки

Після ретельного аналізу переваг та недоліків цих технологій при одиничному виготовленні, буде прийнято остаточне рішення по доцільності використання. Ці методики було обрано через використання в деталі нетипових форм, які не можна отримати класичними методами. Застосування лиття по виплавлюваним моделям дозволяє отримати деталі надскладної форми, адже мастермоделі для ливарних форм виконуються методом 3D друку з матеріалів з низькою температурою плавлення (пластик, віск). 3D друк металом дозволяє не тільки отримати деталі складної форми, а ще й зробити різний відсоток заповнення деталі, що дозволяє зменшити вагу готової деталі. Фрезерування з суцільної заготовки найбільш матеріало-затратний процес, оскільки більша частина (80-90%) заготовки перетвориться в стружку, а також форми деталі обмежуються можливостями інструменту. Нижче ми розглянемо кожен з вище перерахованих методів і оберемо найдоцільніший варіант.

#### **3.1. Лиття в піщані форми по виплавлюваним моделям**

*Лиття по виплавлюваним моделям*- один із способів лиття, відомий з глибокої давнини. Він застосовується для виготовлення деталей високої точності та складної конфігурації, нездійсненних іншими методами лиття.

Спосіб лиття за моделями, що виплавляються, дозволяє отримувати виливки складної конфігурації вагою від декількох грам до десятків кілограм зі

стінками різною товщиною. Дані особливості дають можливість отримувати литі заготовлі деталей машин з мінімальними припусками на механічну обробку, а в деяких випадках повністю її виключити, а це, у свою чергу, дозволяє використовувати метод виготовлення виливків з високолегованих сплавів, що важко обробляються, які використовуються в авіації, космонавтиці, нафтогазовій промисловості.

З появою адитивних технологій виробляти мастер-моделі стало набагато простіше, адже цей процес не потребує людського втручання. А автоматичне розроблення керуючих програм, дозволяє виконувати найскладніші поверхні.

### **3.1.1. Процес відливання деталі**

Процес створення деталі складається з п'яти основних етапів:

- Виготовлення мастер-моделі
- Виготовлення форми
- Процес лиття розплаву
- Відділення деталі від форми
- Слюсарні роботи

Виготовлення мастер-моделі за наявності сучасних технологій виконується адитивним методом на 3D принтері з воску або інших легкоплавких пластиків. Така технологія дозволяє створювати моделі з нетиповими формами. Для процесу створення керуючої програми використовується спеціальне програмне середовище (Ultimaker cura, Slic3D, Simplify3D), яке в автоматичному режимі з готової 3D моделі створює G-код (Рис 3.1.1). Після створення керуючої програми починається процес 3D друку, по завершенню даного етапу отримуємо готову мастер-модель виконану з легкоплавкого матеріалу.

FLAVOR:Marlin	G1 F1200 X50.721 Y77.134 E0.03528	G1 X73.777 Y64.388 E1.89562
;TIME:40098	G1 X51.362 Y76.769 E0.08435	G1 X73.924 Y63.901 E1.92946
;Filament used: 69.4735m	G1 X51.499 Y76.709 E0.0943	G1 X74.175 Y63.208 E1.97849
;Layer height: 0.32	G1 X51.929 Y76.499 E0.12613	G1 X74.5 Y62.546 E2.02755
;MINX:26.132	G1 X52.19 Y76.378 E0.14527	G1 X74.513 Y62.525 E2.02919
;MINY:26.136	G1 X52.284 Y76.337 E0.15209	G1 X74.554 Y62.248 E2.04782
;MINZ:0.2	G1 X52.697 Y76.173 E0.18165	G1 X74.588 Y62.091 E2.0585
;MAXX:273.865	G1 X53.077 Y76.036 E0.20852	G1 X74.624 Y61.801 E2.07794
;MAXY:273.864	G1 X53.588 Y75.874 E0.24418	G1 X74.754 Y61.075 E2.12701
;MAXZ:24.84	G1 X53.683 Y75.848 E0.25073	G1 X74.961 Y60.368 E2.17601
;Generated with Cura_SteamEngine 4.10.0	G1 X53.97 Y75.776 E0.27041	G1 X75.244 Y59.687 E2.22507
M140 S80	G1 X54.401 Y75.678 E0.29981	G1 X75.599 Y59.041 E2.2741
M105	G1 X55.128 Y75.554 E0.34887	G1 X75.835 Y58.704 E2.30147
M190 S80	G1 X55.864 Y75.509 E0.39792	G1 X75.829 Y58.68 E2.30311
M104 S245	G1 X56.6 Y75.544 E0.44694	G1 X75.736 Y57.949 E2.35213
M105	G1 X57.329 Y75.659 E0.49603	G1 X75.722 Y57.577 E2.37689
M109 S245	G1 X57.527 Y75.71 E0.50963	G1 X75.59 Y56.955 E2.41919
M82 ;absolute extrusion mode	G1 X57.895 Y75.713 E0.53411	G1 X75.516 Y56.222 E2.4682
; Ender 3 Custom Start G-code	G1 X58.627 Y75.798 E0.58313	G1 X75.522 Y55.485 E2.51722
G92 E0 ; Reset Extruder	G1 X58.718 Y75.819 E0.58934	G1 X75.608 Y54.752 E2.56632
G28 ; Home all axes	G1 X58.863 Y75.71 E0.60141	G1 X75.682 Y54.382 E2.59142
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed	G1 X59.497 Y75.333 E0.65048	G1 X75.775 Y53.978 E2.619
G1 X0.1 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move to start position	G1 X60.169 Y75.028 E0.69957	G1 X76.005 Y53.197 E2.67315
G1 X0.1 Y200.0 Z0.3 F1500.0 E15 ; Draw the first line	G1 X60.869 Y74.797 E0.7486	G1 X76.126 Y52.842 E2.6981
G1 X0.4 Y200.0 Z0.3 F5000.0 ; Move to side a little	G1 X61.88 Y74.604 E0.81707	G1 X76.378 Y52.187 E2.74479
G1 X0.4 Y20 Z0.3 F1500.0 E30 ; Draw the second line	G1 X62.103 Y74.579 E0.83199	G1 X76.493 Y51.929 E2.76358
G92 E0 ; Reset Extruder	G1 X62.378 Y74.525 E0.85064	G1 X76.613 Y51.674 E2.78232
G1 Z2.0 F3000 ; Move Z Axis up little to prevent scratching of Heat Bed	G1 X62.594 Y74.494 E0.86515	G1 X76.746 Y51.406 E2.80223
G1 X5 Y20 Z0.3 F5000.0 ; Move over to prevent blob squish	G1 X62.92 Y74.309 E0.89009	G1 X77.137 Y50.721 E2.85469
G92 E0	G1 X63.597 Y74.018 E0.93911	G1 X77.474 Y50.203 E2.8958
G92 E0	G1 X64.009 Y73.881 E0.96799	G1 X77.909 Y49.607 E2.94488
G1 F1800 E-7	G1 X64.439 Y73.753 E0.99783	G1 X78.341 Y49.127 E2.98784
;LAYER_COUNT:79	G1 X66.39 Y72.719 E1.14471	G1 X78.438 Y49.029 E2.99701
;LAYER:0	G1 X68.839 Y70.941 E1.34603	G1 X78.984 Y48.534 E3.04604
M107	G1 X70.969 Y68.795 E1.54716	G1 X79.467 Y48.177 E3.08599
G0 F6000 X50.275 Y77.421 Z0.2	G1 X72.769 Y66.307 E1.75143	G1 X79.889 Y47.892 E3.11986

Рис 3.1.1 Фрагмент керуючої програми

Процес виготовлення форми розпочинається з установки мастер-моделі в опоки, установки елементів ливникової системи (теж виконаних з легкоплавких матеріалів), після чого мастер-модель заливається сумішшю піску з гіпсом. Відсоткове співвідношення піску і гіпсу може різнитись, від концентрації піску залежить хрупкість форми та якість поверхні деталі. Зазвичай використовують співвідношення 3:2 ( три порції піску, 2 порції гіпсу). Також форму армують металічними включеннями (дротами, сіткою), що надає формі додаткової жорсткості. Після повного висихання суміші форму виймають з опок та піддають відпалу, підчас якого форма остаточно втрачає вологу з пор, а майстер-модель витікає з порожнин форми. Після процесу відпалу форма готова до заливання в неї розплаву.

Процес внесення розплаву починається з прогрівання форми, що додатково забезпечить краще потрапляння розплаву до кожного елемента форми. В якості розплаву можуть виступати будь-які ливарні сплави, найпоширеніші з них: АЛ9, МЛ10, ВЧ 35, 35Л та інші.

В нашому випадку ми будемо використовувати алюмінієвий ливарний сплав АЛ28, це ливарний сплав, який входить до 4 групи алюмінієвих сплавів, котрі добре піддаються зварюванню в середовищі з захисним газом.

Після вистигання розплаву в формі настає час для відділення деталі. Найпростіше цей процес зробити в вібротомашині з подальшою високотемпературною мийкою під тиском.

Останнім етапом отримання деталі є слюсарні роботи, які включають в себе процес видалення елементів ливникової системи та очищення від залишків форми, які не видалились після попереднього процесу.



Рис 3.1.2 Пластикова модель та відлита алюмінієва деталь

### **3.1.2. Литі ранери колектора**

Для виготовлення ренарів впускного колектора ми маємо креслення готової деталі та складальний кресленик впускного колектора, для того щоб оцінити припуски на подальшу обробку. Також до креслеників додаються 3D моделі в форматі *stp.*, з яких в подальшому будуть розроблені керуючі програми для виготовлення майстер-моделі. На майстер моделі будуть добавлені припуски на обробку на такі поверхні:

- Площина прилягання до головки блока
- Посадочні місця під форсунки
- Кріпильні отвори під рампу форсунок

На площині прилягання до головки блока робиться припуск на похибку заготовки 0,2мм, на похибку базування 0,25мм, також на площині будуть оброблятися канавки під ущільнюючий елемент типу O-ring. Припуск на отвори форсунок 0,15 на похибку заготовки та 0,12мм на похибку базування. Отвори під кріплення рампи форсунок на майстер-моделі будуть прибрані взагалі, оскільки вони занадто малого діаметру (5мм).

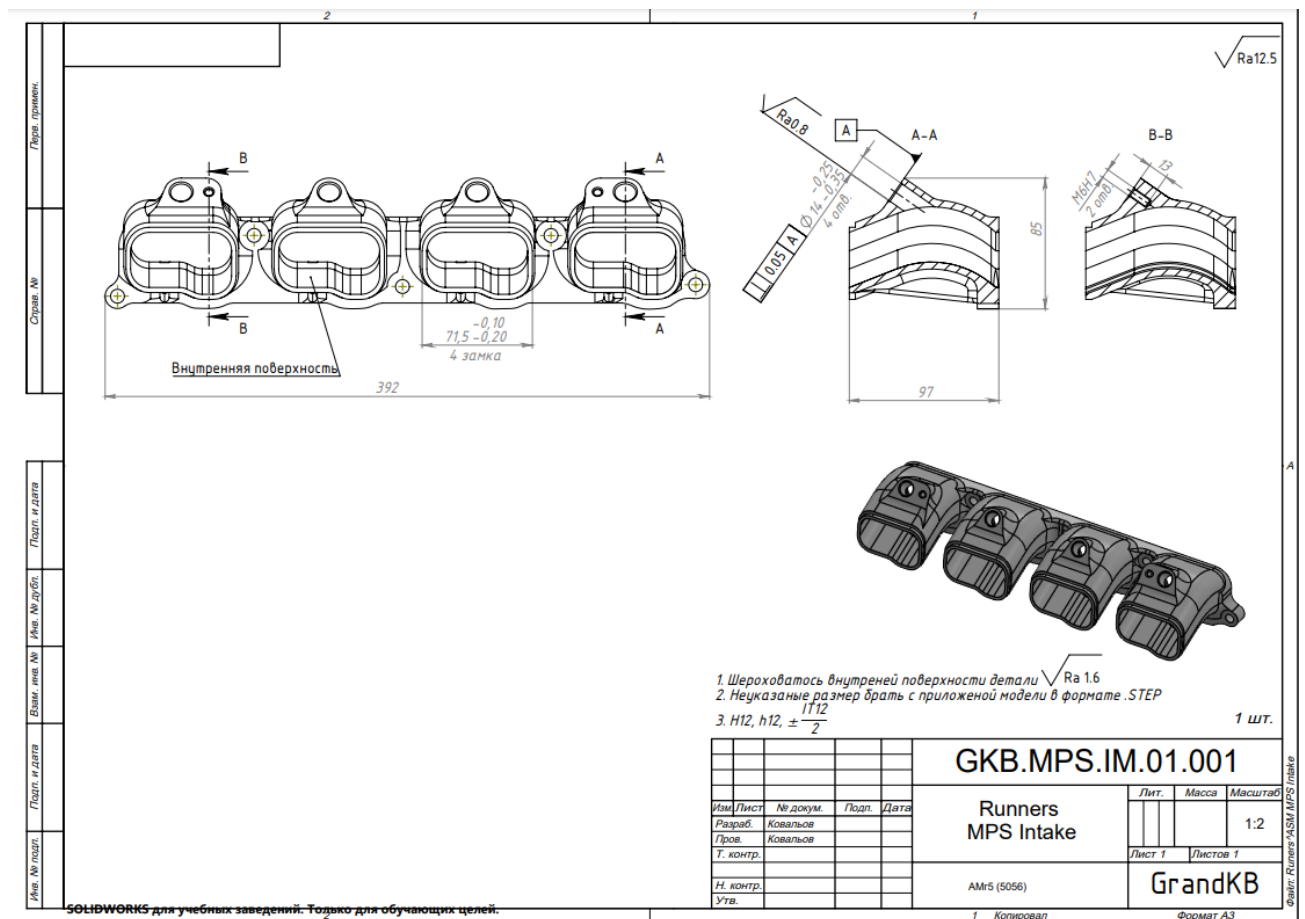


Рис 3.1.3 Кресленник ранерів колектора



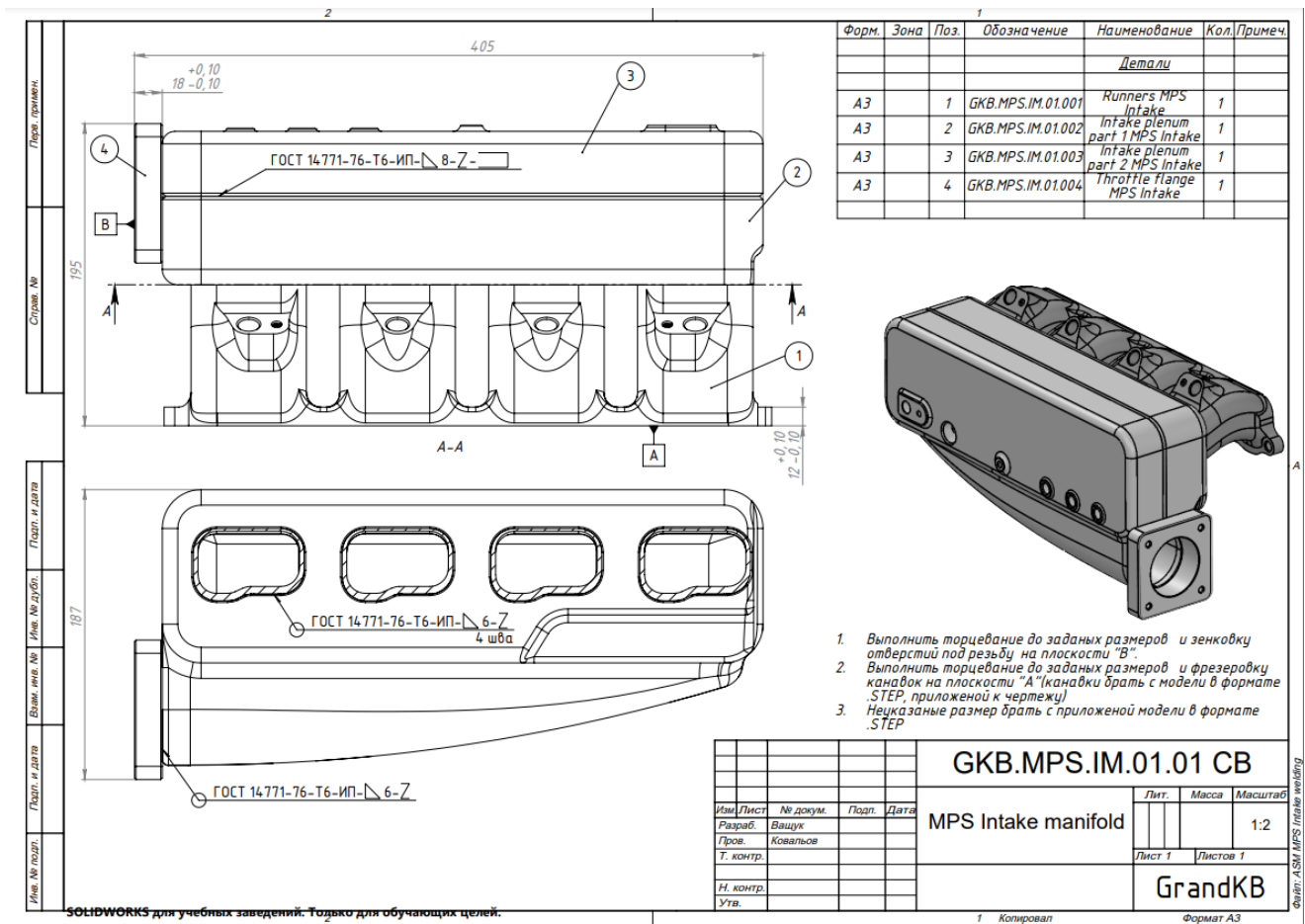


Рис 3.1.4 Складальный кресленник коллектора

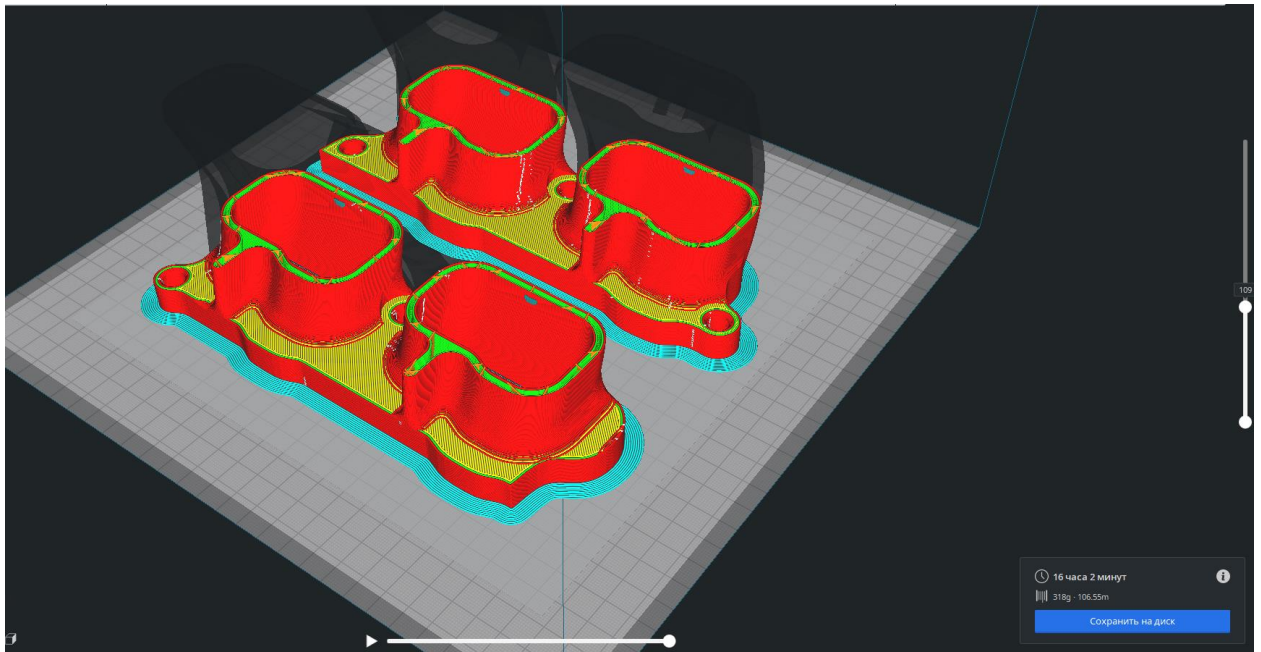


Рис 3.1.5 Попередній перегляд роботи керуючої програми для 3D принтеру

### 3.1.3 Цінова політика на лиття

В Україні за останні десять років послуги на лиття по виплавлюваним моделям стали досить поширеними при одиничному та малосерійному виробництві. Загальна вартість вироблення деталі таким методом складається:

- Адаптації 3D моделі під виготовлення майстер-моделі
- Розроблення керуючої програми для 3D принтеру
- Друку майстер-моделі
- Виготовлення форми
- Матеріалу лиття
- Слюсарні роботи
- Постобробка на верстатах

Нижче наведемо приклад розрахунку виготовлення ранерів колектора для проекту MAZDA MPS6 GKB

Таблиця 3.1

Вартість лиття

№	Назва роботи	Вартість в Україні	Вартість в Європі
1	Адаптації 3D моделі під виготовлення майстер-моделі	25\$	60\$
2	Розроблення керуючої програми для 3D принтеру	15\$	35\$
3	Друку майстер-моделі	60\$	85\$
4	Виготовлення форми	20\$	40\$

5	Матеріалу лиття	94\$	150\$
6	Слюсарні роботи	8\$	25\$
7	Постобробка на верстатах	60\$	80\$
Сума на виготовлення ранерів		282\$	476\$

Адаптації 3D моделі під виготовлення майстер-моделі займає близько 1 години праці middle- engineer, розцінки на таку працю в Україні варіюються в діапазоні 20-30\$, а в Європі 50-70\$.

Розроблення керуючої програми для 3D принтеру займає близько 0,5 години у оператора верстату, цінник на послуги такої людини варіюються в діапазоні 15-30\$/год, а в Європі середній цінник на ці послуги 30-50 \$/год.

Ціна на друк майстер-моделі складається з ціни на одне налагодження принтеру і маси готової моделі. В нашому випадку готова воскова модель має масу 370гр. Ціна на один грам друкованого воску в Україні 0,15\$, а ціна закордоном 0,2-0,22\$. Налагодження верстату для друку в середньому коштує 5\$ і 8\$ закордоном відповідно.

Ціна на виготовлення форми формується з ціни на 1кубічний сантиметр суміші помножений на об'єм затраченої суміші. Цінник на заливку одного кубічного сантиметру суміші в нашій країні варіюється 0,15-0,18\$. Розрахунковий об'єм суміші 1500 кубічних сантиметрів.

Для заливання форми розплавом запускається нагрівна піч, кожен запуск якої вартує 20\$, туди також додається вартість затраченого матеріалу для лиття. Враховуючи що готова деталь має розрахункову масу 1400гр., а для

виконання вилівка потребується на 30% більше розплаву, можна підрахувати масу розплаву, яке потрібне для лиття, 1800гр., а ціна на розплав 4,2\$/100гр.

Так для виготовлення частини впускного колектора, а саме ранерів, затрати на виготовлення в Україні становитимуть 282\$, а в Європі цей показник на 70% більше і становитиме 476\$.

(Всі розрахунки були виконані по середньоринковому показнику, інформація була взята з відкритих джерел. Інформація актуальна на 10.11.22)

### **3.2. 3D друк металом**

3D-друк або адитивне виробництво – це створення деталі шляхом нашарування матеріалу в один шар за один раз. Для друку використовують установки адитивної побудови – 3D-принтери. Під різні види виробництва є різні види 3D-принтерів. Друкувальна головка принтера переміщається траєкторією і наносить розплавлений матеріал нарощуючи деталь шар за шаром. У міру застигання шари склеюються між собою. В результаті виходить цілісний виріб. Спосіб дозволяє робити деталі будь-якої геометрії.

В основному для друку використовують пластики та метали. Пластики популярніші, застосовуються практично в будь-якій індустрії. Друк металами найчастіше використовуються в медицині та машинобудуванні. Існує безліч видів пластику з різними властивостями і характеристиками. Крім того, щороку випускаються матеріали із новими властивостями.

У 1980-х і 1990-х роках процеси адитивного виробництва для спікання або плавлення металу (такі як селективне лазерне спікання, пряме лазерне спікання металу та селективне лазерне плавлення) зазвичай носили власні назви. У той час уся обробка металу виконувалася за допомогою процесів, які зараз називаються неадитивними (лиття, штампування та механічна обробка); незважаючи на те, що до цих технологій було застосовано багато автоматизації (наприклад, за допомогою роботизованого зварювання та ЧПК), ідея

інструменту або головки, що рухається крізь тривимірну робочу оболонку по заданій траєкторії, перетворюючи масу сировини на бажану форму, була пов'язана лише з металообробкою - з процесами, які видаляли метал як-от фрезерування з ЧПК, електророзійна станція з ЧПК та багато інших.

Автоматизовані технології, що додають метал, які пізніше будуть названі адитивним виробництвом були розроблені в середині 1990-х років у Стенфорді та Університеті Карнегі-Меллона, включаючи мікроліття та розпилення матеріалів. А у 1995 році було розроблено методику селективного лазерного плавлення. 2010-ті роки були першим десятиліттям, коли металеві деталі кінцевого використання, такі як кронштейни двигуна та великі гайки почали виготовляти адитивним методом на масовому виробництві. Лиття, штампування та механічна обробка все ще є більш поширеними, ніж адитивне виробництво в металообробці, але останнє зараз починає досягати значних успіхів, і завдяки численним перевагам стає зрозуміло, що адитивне виробництво тільки набуватиме популярності[2].

Для металевих 3D-систем доступні різноманітні металеві матеріали. Найпоширенішими матеріалами є нержавіюча сталь, алюміній, нікель, кобальт-хром і титанові сплави. Іншими матеріалами є інструментальні сталі, сплави на основі нікелю, сплави дорогоцінних металів і сплави міді. При виборі матеріалу важливі такі властивості, як міцність на розрив, твердість і подовження.

Технології порошкового плавлення базуються на відносно простому принципі: джерело енергії спікає або розплавляє металеві порошки для створення готової деталі шар за шаром. Найвідомішою технологією тривимірного друку металу, заснованою на цьому принципі, є технологія прямого лазерного спікання металу (DMLS або SLM), запатентована в 1990-х ERD і EOS. За схожим принципом працює технологія електронно-променевого плавлення (EBM). Основна відмінність у способі плавлення металевих порошків. В останній плавленні відбувається за допомогою електронного променя. Цей спосіб швидший ніж SLM, проте має меншу точність.

Іншою основною технологією 3D-друку з металу є пряме осадження енергії (DED), схоже на FDM. Цей метод передбачає створення металевих частин за допомогою лазера CLAD. Під час процесу порошок викидається соплом і сплавляється на виході за допомогою лазерного променя для зварювання. Цей метод дозволяє друкувати безпосередньо на деталі або деталі, на відміну від більшості інших технологій.

Холодне розпилення - це інший процес виробництва металевих добавок. Цей метод передбачає з'єднання металевих порошків шляхом проектування їх без нагрівання на основу. Ця проекція використовує гелій для закріплення металевого порошку. Однак цей метод 3D-друку на металі використовується рідко, оскільки він дорогий через використання гелію.[4]

### *Переваги та недоліки 3D друку металом:*

3D-друк відноситься до технологій, що швидко розвиваються. Він вже відрекомендував себе як ефективний метод створення передових продуктів. Проте, помилково думати, що 3D-друк покликаний замінити лиття або інші класичні процеси. Він допомагає вирішити специфічні завдання, які не виконуються або занадто трудомісткі при використанні традиційних технологій. Такі можливості забезпечують топологічну оптимізацію.

Субтрактивні методи будуть і далі застосовуватися в тих випадках, коли це ефективно з точки зору вартості, типу виробів та інших вимог. Питання не у виборі між двома технологіями, а в тому, коли краще застосувати адитивну, а коли субтрактивну.

### **Отже, перевагами виготовлення деталей адитивними методами є:**

- можливість виготовлення унікальних деталей складної геометрії, в тому числі дрібних деталей, виробів з внутрішніми поверхнями і каналами, тонкими стінками, пустотілих структур і т.п.;

- знизення ваги, порівняно із деталями, виготовленими субтрактивними методами за допомогою топологічної оптимізації;
- скорочення числа одиниць збірних деталей;
- оптимальний коефіцієнт Buy-to-Fly - співвідношення між кількістю закупленого матеріалу та кількістю матеріалу в готовій деталі;
- швидкість, скорочення циклу виробництва деталі;

#### **До недоліків належить:**

- необхідність в послідовних наукових дослідженнях (в тому числі для вивчення властивостей металів);
- обмеження в розмірах об'єктів;
- більші початкові вкладення із-за високої вартості обладнання та витратних матеріалів;
- особливі вимоги до приміщення та умови експлуатації;
- атестація обладнання та сертифікація виробів;
- складність в адаптації 3D-рішень до існуючих технологічних циклів на виробництві;
- лімітованість у різноманітті матеріалів, придатних для друку, зумовлена високою температурою плавлення;
- порівняно повільні темпи друку для масового виробництва.

#### **3.2.1. Вплив змінних процесу на утворення дефектів структури**

Мікроструктура сплавів, виготовлених за допомогою адитивного методу(AM), суттєво відрізняється від сплавів, виготовлених з використанням звичайних методів виробництва через різноманітність технологічних змінних AM. Для SLM найрізноманітніші змінні процесу включають потужність лазера,

швидкість лазера, відстань штрихування та шар. (усі вони зазвичай змінюються методом проб і помилок для оптимізації щільності компонентів). Металевий порошок піддається швидкому нагріванню (зазвичай до температур  $>2000^{\circ}\text{C}$ ) з подальшим швидким затвердінням під час SLM, щоб сформувати «побудову» у вигляді растрів лазерного променя на металевому порошку. Побудова також піддається декільком термічним циклам через локальні теплообмін, що виходить під час SLM. Швидке нагрівання та швидке охолодження в поєднанні з термічним циклом індукують утворення унікальних мікроструктур сплаву, які зазвичай мають дрібну зернисту структуру, субструктури дислокаційних комірок, та залишкові напруги. Вони також спричиняють утворення дефектів, включаючи гарячі розривні тріщини, газову пористість, відсутність плавної пористості, і дендритне зростання всередині конструкції. Таким чином, змінні процесу АМ визначають характер мікроструктур і дефектів, утворених у конструкції. Нижче коротко розглянуто вплив таких параметрів процесу АМ на характер готового виробу.

### **Шорсткість поверхні**

Шорсткість поверхні ( $R_a$ ) компонентів, виготовлених SLM, зазвичай висока. Значення  $R_a$  для металевих деталей, виготовлених за допомогою SLM, зазвичай знаходяться в діапазоні від 10 мкм до 30 мкм, що значно вище, ніж у таких методів, як фрезерування (приблизно від 1 мкм до 2 мкм). Ван (D. Wang) вивчав вплив щільності лазерної енергії ( $\omega$ ) на шорсткість поверхні. Повідомлялося, що коли  $\omega$  становить  $<75$  Дж/мм<sup>3</sup>, значення  $R_a$  становить  $\sim 15$  мкм, а шорсткість поверхні в основному пояснюється випадковою відсутністю плавлення. Однак, коли  $\omega$  становить від 100 Дж/мм<sup>3</sup> до 170 Дж/мм<sup>3</sup>,  $R_a$  зменшується нижче 10 мкм. Крім того, спостерігалось збільшення  $R_a$  з  $\omega > 180$  Дж/мм<sup>3</sup>, що, можливо, виникає внаслідок надмірного плавлення складових порошоків. Було виявлено, що явище «утворення кульок» відбувається переважно, коли  $\omega$  було від 75 Дж/мм<sup>3</sup> до 120 Дж/мм<sup>3</sup>; утворення кульок



описується як утворення металевих крапель на протигагу бажаному рівномірному розподілу рідкого металу на розплавленій поверхні. Хоча існувала певна кореляція між низкою змінних процесу SLM і шорсткістю поверхні виготовлених деталей, основні механістичні аспекти на сьогоднішній день чітко не зрозумілі.

## **Пористість**

Сандер (G.Sander) вивчав вплив потужності лазера та швидкості лазерного сканування на пористість зразків, виготовлених SLM. У цьому дослідженні не було встановлено прямої кореляції між пористістю зразка та потужністю лазера/швидкістю сканування. Шанг (Y.Shang), вивчав вплив швидкості лазерного сканування на пористість зразків типу. У цій роботі потужність лазера залишалася фіксованою на рівні 195 Вт, відстань штрихів 0,09 мм і товщина шару 0,02 мм, тоді як швидкість сканування змінювалася від 800 мм/с до 1083 мм/с. Він помітив, що пористість зразків зростала зі збільшенням швидкості сканування, і припустив, що при вищих швидкостях сканування відсутність плавлення може викликати пористість. Подібним чином Лі (R.Li) досліджував вплив швидкості сканування на пористість зразків. Потужність лазера підтримувалася на фіксованому рівні 100 Вт, тоді як швидкість лазерного сканування змінювалася від 90 мм/с до 120 мм/с. Він також помітив, що пористість зразка типу збільшується зі збільшенням швидкості сканування[5]. Вплив  $\omega$  на пористість також вивчали Черрі (J.A. Cherry) та його співробітники, які помітили, що при низьких значеннях  $\omega$ , таких як  $\sim 40$  Дж/мм<sup>3</sup>, пористість виготовлених зразків досягала 8,8%, через відсутності плавлення металевого порошку та відсутності спікання між різними шарами. При вищому  $\omega$  пористість залишалася відносно високою ( $\sim 6,5\%$ ). Було висловлено припущення, що більші басейни розплаву, які утворилися при вищому  $\omega$ , можуть бути сприйнятливими до мікроусадочної пористості затвердіння. Крім того, утворення газових пустот також може призвести до утворення сферичних

пор у конструкції. Безсумнівно, механічне розуміння впливу параметрів лазера на пористість зразка все ще вивчається, і це важливо розуміти на основі, що пористість може впливати на механічні властивості деталі.

### Залишкова напруга

Нерівномірний розподіл тепла та швидке охолодження під час АМ зазвичай призводять до генерації того, що може бути великим залишковим напруженням у конструкції. Вчені використовували рентгенівські методи для визначення залишкових напруг у деталях, загалом було помічено, що залишкова напруга в основному є стискаючою в нижніх частинах конструкції та розтягувальною за своєю природою у верхній частині конструкції. Це пояснення є правдоподібним, оскільки під час SLM, коли розплавлені шари (у верхній частині) твердіють, вони мають тенденцію до стиснення через термічне скорочення[6]. Ця деформація обмежена нижніми шарами, що призводить до загальної напруги розтягу у верхній частині та напруги стиснення у нижніх шарах. Лю також помітив, що залишкова напруга набагато більша в напрямку, паралельному напрямку лазерного сканування порівняно з напрямком, перпендикулярним. У цьому дослідженні було визначено, що залишкова напруга зменшується з меншим  $\phi$ .

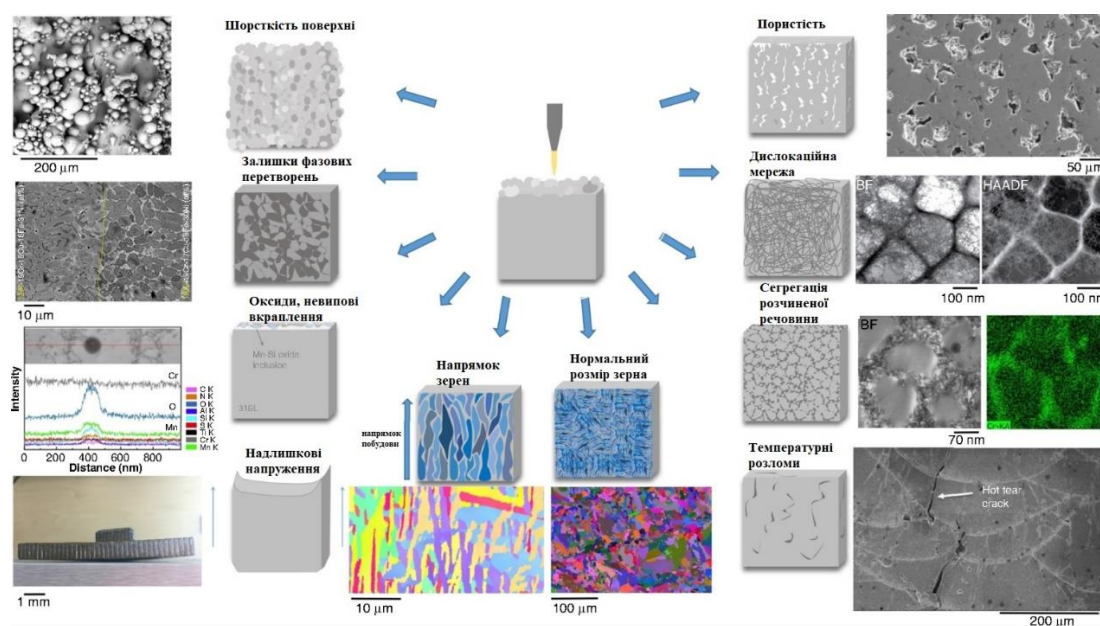


Рис. 3.2.1 Вплив обробки АМ на структуру металу

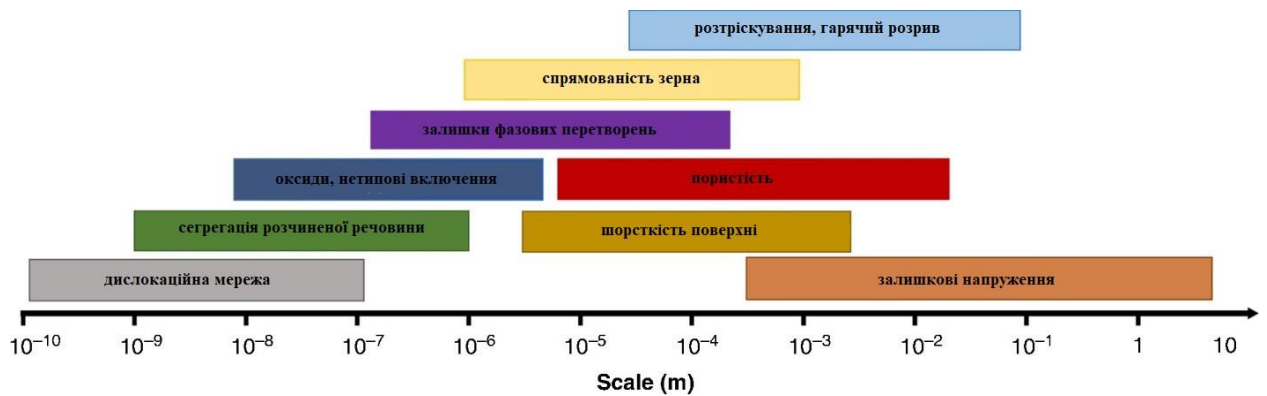


Рис. 3.2.2 Шкала довжин дефектів в сплавах виготовлених адитивним методом

### 3.2.2. 3D друк в автоспорті

В автомобільній промисловості адитивне виробництво активно набирає обертів: тільки в 2018 році обсяг ринку автомобільного 3D-друку оцінювався в \$1,4 млрд. Ця цифра лише зростатиме і за прогнозами до 2023 року наблизиться до позначки \$5 млрд. Завдяки можливості прискореного виробництва 3D-друк є ефективним інструментом розробки.

Використовуючи металевий 3D-друк, інженери можуть значно скоротити час тривалого дослідження та розробки, що пришвидшить час виходу на ринок, є більше часу для повторення та оптимізації конструкцій, що призводить до покращення паливної ефективності, підвищення продуктивності та загальної економії коштів.

Завдяки можливості швидко виготовляти індивідуальні пристосування та інструменти, які інакше були б непомірно дорогими, адитивна технологія полегшує виробникам оптимізацію виробничих ліній - зробити виробничі лінії більш гнучкими. У міру внесення змін у конструкцію виробникам, можливо, доведеться виробляти нові деталі для транспортних засобів, які можуть вироблятися у відносно невеликій кількості. Замість того, щоб витратити час і кошти на створення складних інструментів або тривалий час виконання робіт

сторонніми постачальниками, виробники можуть просто надрукувати деталі та забезпечити безперебійну роботу виробничих ліній.

Щоб створити найлегший, та найагресивніший автомобіль, французький виробник автомобілів Bugatti звернувся до адитивних технологій. Bugatti інтегрували багато окремих деталей, виготовлених 3D-друком - титановий гальмівний супорт, опора спойлера та кріплення двигуна, які є лише кількома прикладами численних 3D-друкованих деталей в інноваційному автомобілі. Інтеграція 3D-друку була особливо важливою для деталей складної форми, а також для того, щоб допомогти зробити Bugatti Bolide легким, отже, набагато швидшим спортивним автомобілем.



Рис. 3.2.1 Гальмівний супорт Bugatti

Адитивне виробництво відіграє ключову роль в автомобільному спорті, дозволяючи розробляти легші, міцніші та ефективніші деталі за набагато коротший період часу. Тому виробник Ferrari покладався на цю технологію – зокрема, на металевий 3D-друк – для розробки поршнів одного зі своїх двигунів. Ferrari пояснює, що використовував машину EOS і титановий порошок і що адитивне виробництво дозволило створити набагато складнішу, стійкішу та легшу деталь, зокрема завдяки топологічній оптимізації. Цей метод також збільшує кількість можливих ітерацій: компанія може уявити стільки

дизайнів, скільки необхідно, і прискорити етап створення прототипу. Виробник також розробив надруковані на 3D гальмівні педалі з порожнистою структурою – результат, який був би неможливий за допомогою інших методів виробництва.



Рис. 3.2.2 Гальмівна педаль Ferrari

Італійський автовиробник Dallara звернувся до Conflux Technology для виробництва теплообмінників для своїх болідів Формули-3. Компанія покладається на адитивне виробництво для виробництва більш ефективних і стійких до тепла деталей. Особливість цього проекту полягає в розмірі обмінників - невеликих компонентів, які могли б відповідати вимогам автоспорту[3]



Рис. 3.2.3. Теплообмінник Dallara для боліда Формули-3

Види автоспорту, такі як Indycar, Lemans, WRC, Formula 2 & 3 і Formula E, також використовують переваги технологій адитивного виробництва. Проте, Формула-1, як, мабуть, неофіційний лідер технологічного прогресу в змагальному автоспорті, була першою, хто прийняв і найбільше користувався адитивними технологіями. 3D-друк почався як технологія для швидкого створення прототипів, і саме тут він спочатку приніс користь командам Формули-1. Щоб команда Формули-1 була успішною, вона повинна завжди впроваджувати інновації. Це вимагає швидкої ітерації нових деталей для автомобілів, часто протягом кількох днів між гонками. «Однією з переваг 3D-друку є можливість швидко надрукувати прототип, випробувати його в аеродинамічній трубі та швидко змінити дизайн за потреби. Коли деталь відповідає специфікаціям, команди також можуть використовувати 3D-друк для виготовлення остаточної деталі.

Отже, які саме переваги пропонують технології адитивного виробництва порівняно з іншими методами виробництва? 3D-друк дозволяє друкувати невелику кількість деталей дуже швидко, на відміну від інших методів виробництва, які часто вимагають дорогих і трудомістких інструментів. Він



також здатний виробляти деталі додаткової складності, які взагалі неможливо виготовити за традиційними технологіями виробництва, а також покращувати їх продуктивність. Для виду спорту, який швидко змінюється від однієї гонки до іншої, все залежить від здатності швидко проектувати та виготовляти складні деталі. З точки зору програмного забезпечення, такі додатки, як оптимізація топології, дозволяють інженерам зменшити вагу деталей і перерозподілити її.

### 3.2.3. Друковані ранери колектора

Отже, процес 3D друку можна розділити на 3 етапи:

1. Обробка файлу STL для подальшого друку;
2. Підготовка та процес друку;
3. Обробка надрукованої деталі.

**Перший** процес включає в себе умовний поділ 3D моделі на 2D шари, кожен з яких слугуватиме схемою для друку, та створення керуючої програми.

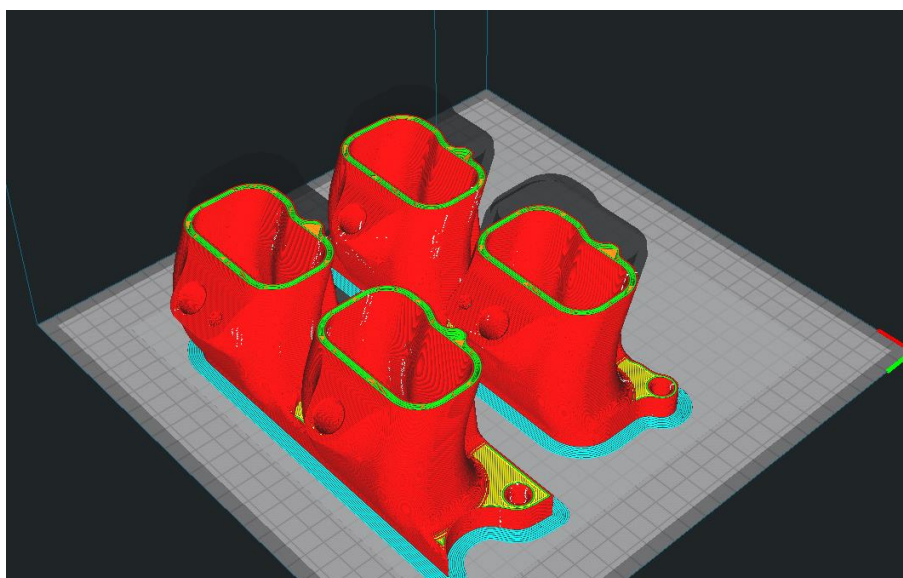


Рис. 3.2.4. Поділ моделі на шари

**Другий** етап починається з розпилення металевого порошку та перетворення його на цільний металевий сплав після цього наноситься наступний шар на розплавлений попередній. Для нависаючих деталей

використовуються опорні конструкції, які потрібні для запобігання деформаціям, що можуть виникнути в процесі друку.



Рис. 3.2.5 Приклад надрукованої деталі із опорними конструкціями

На **третьому**, останньому, кроці видаляються опорні конструкції, якщо вони є та деталі піддаються термообробці. При цьому температуру повільно підвищують, щоб спалити залишки сполучного матеріалу. Коли температура наближається до точки плавлення матеріалу, частинки металу зливаються разом, створюючи міцну металеву частину. На цьому етапі деталь повністю спечена та готова до використання. Її можна механічно обробити, відполірувати або якщо це необхідно для остаточного застосування, але в багатьох випадках точність і міцність деталі після цього процесу означає її готовність до встановлення.

Габарити камери для 3D друку обмежують розміри деталей. Проте, поширеною практикою є поділ деталі на частини та подальше зварювання в одну фінальну деталь.





Рис. 3.2.6 Впускний колектор Paradakis Racing, надрукований на 3D принтері та зварений після.

Головною відмінністю ранерів колектора виготовлених адитивним методом від інших є суттєва різниця в масі. За рахунок не монолітного заповнення простору між зовнішньою та внутрішньою оболонками деталі, досягається зменшення ваги в 40%, готова деталь має вагу 840гр. в порівнянні з неадитивним методом в 1400гр. В рамках використання деталі для автоспорту це є дуже суттєвою перевагою.

### 3.2.4. Цінова політика на 3D друк

Ціна за друковану деталь складається з таких складових:

- Вартість розробки керуючої програми
- Вартість друку
- Вартість механічної обробки

Для розробки керуючої програми інженеру середнього рівня потрібно близько 0,5год, що в нашій країні коштує близько 15\$ для клієнта.

Щоб оцінити вартість самого друку нам потрібен об'єм матеріалу, який затрачується для друку і вартість кубічного сантиметру друку.

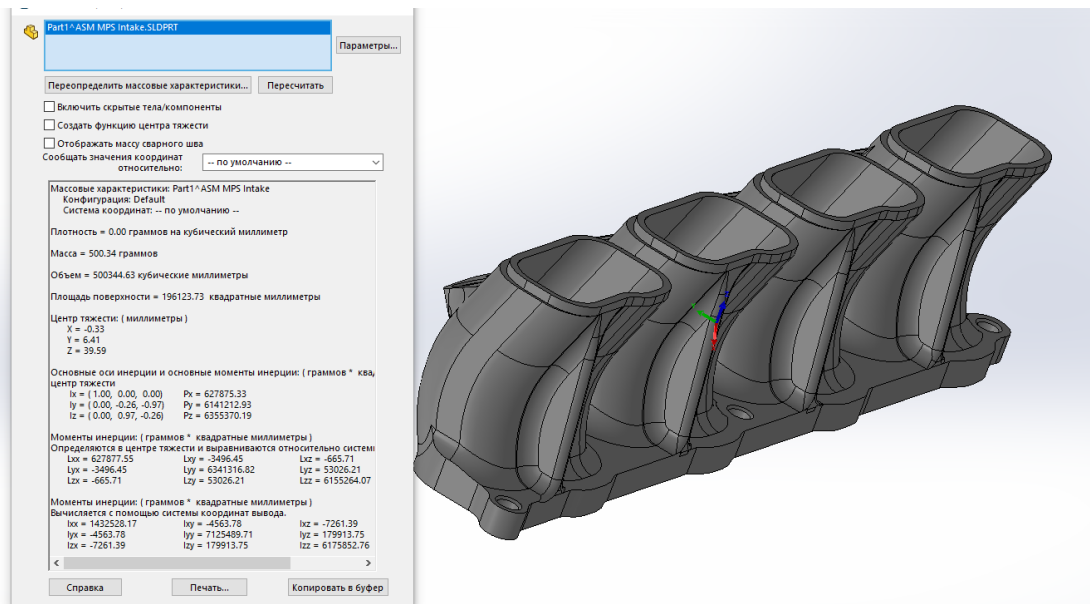


Рис. 3.2.7 Визначення об'єму матеріалу деталі.

Загальний об'єм деталі з 100% заповненням 500см кубічних. Враховуючи 40% заповнення та 1,5мм стінку деталі маємо об'єм матеріалу 300см кубічних. Середня вартість за один кубічний сантиметр алюмінієвого друку в Україні складає 8\$. З цього маємо вартість друку ранерів в 2400\$.

Вартість механічної обробки (видалення підтримок) після друку становитиме приблизно 15\$.

Так маємо загальну вартість за друковану деталь «ранери» 2430\$

### 3.3. Фрезерування з суцільної заготовки

**Фрезерування** — один з найпродуктивніших методів обробки. Головний рух (рух різання) під час фрезерування — обертальний, його здійснює [фреза](#), рух подачі — зазвичай прямолінійний. Фрезеруванням можна одержати деталь точністю за 6...12 квалітетом шорсткістю до  $Ra = 0,8$  мкм. Фрезерування здійснюється за допомогою багатозубого інструмента фрези.[7]

Цей метод отримання деталей найстаріший серед розглянутих у технологічному процесі які ми розглядаємо. За рахунок його віку, він є найрозповсюдженішим і найдоступнішим в нашій країні.

#### 3.3.1. Фрезерування ранерів

Для розроблення технологічного процесу виготовлення деталі «ранер» методом фрезерування з суцільної заготовки використовуємо програмне середовище SolidCAM. Воно дозволяє розробити весь процес, створити магазин інструменту або підлаштуватись під існуючий; зробити корегування моделі не переписуючи весь процес оброблення; перевірити процес оброблення на момент обробки та інтерференцій інструмента з заготовкою.

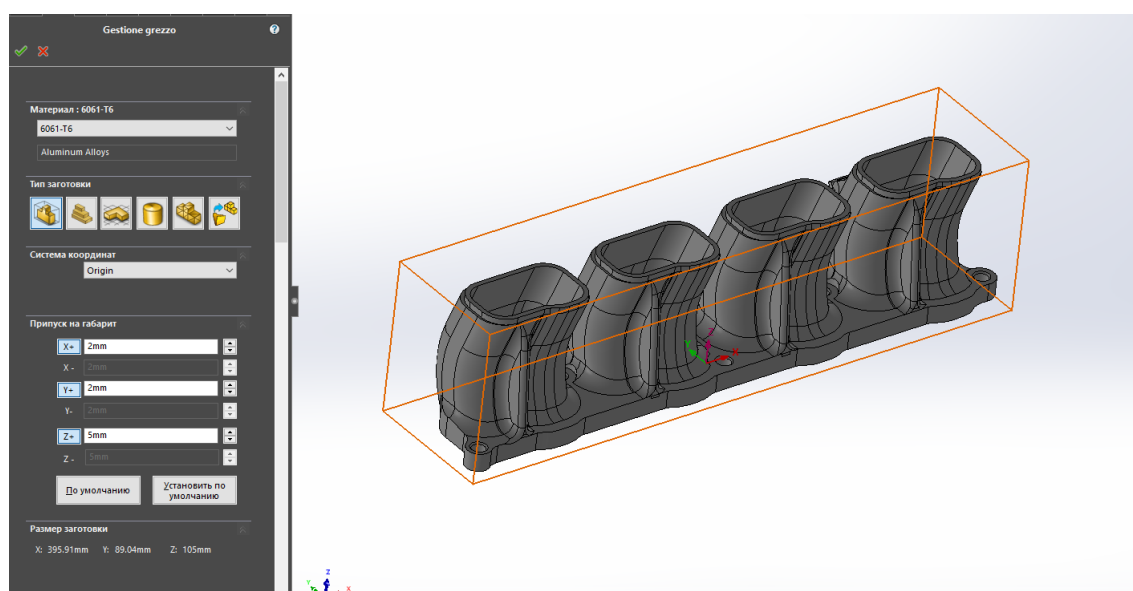


Рис 3.3.1 Заготовка для деталі «ранери» в SolidCAM

Технологічний процес був спроектований під використання фрезерного верстата Haas VF-3SS з додатковою віссю, що дозволить обробити нетипові поверхні. Далі будуть наведені траєкторії руху на першій установі та симуляції оброблення деталі.

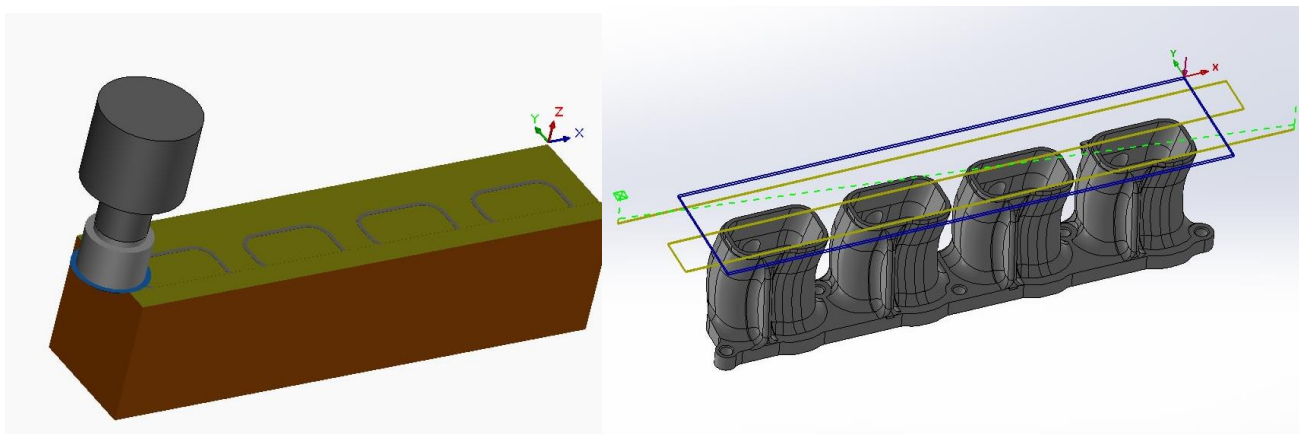


Рис 3.3.2 Симуляція оброблення площини та траєкторний рух інструмента

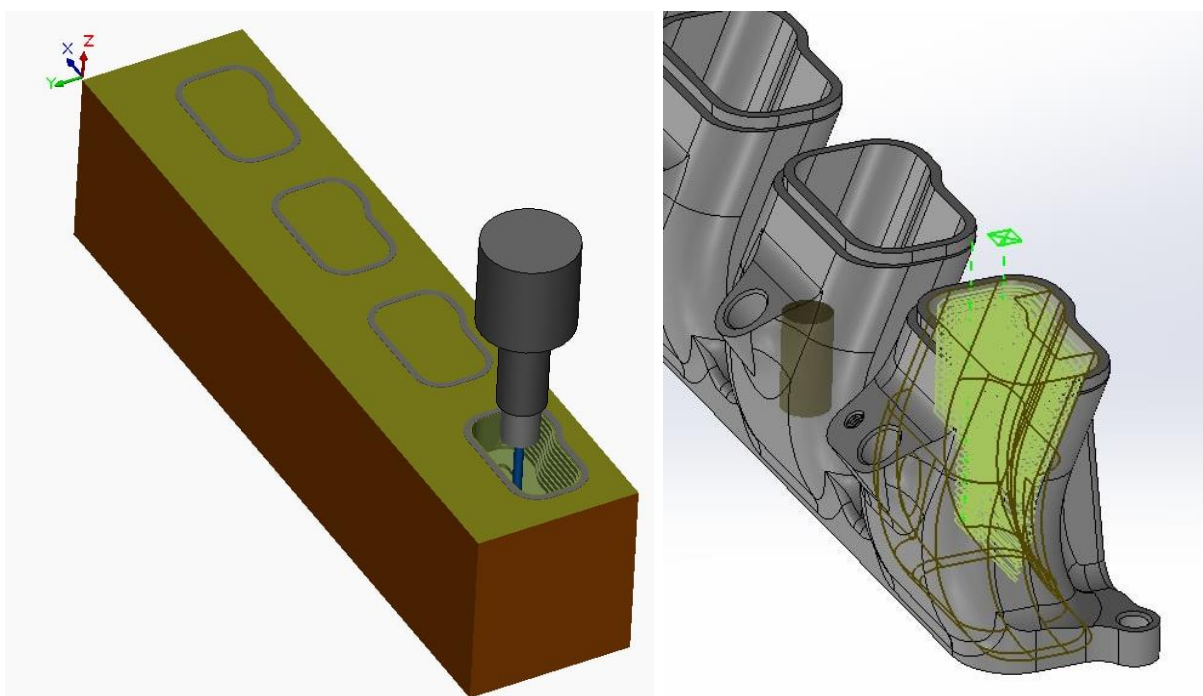


Рис 3.3.3 Симуляція оброблення поверхні ранера та траєкторний рух інструмента

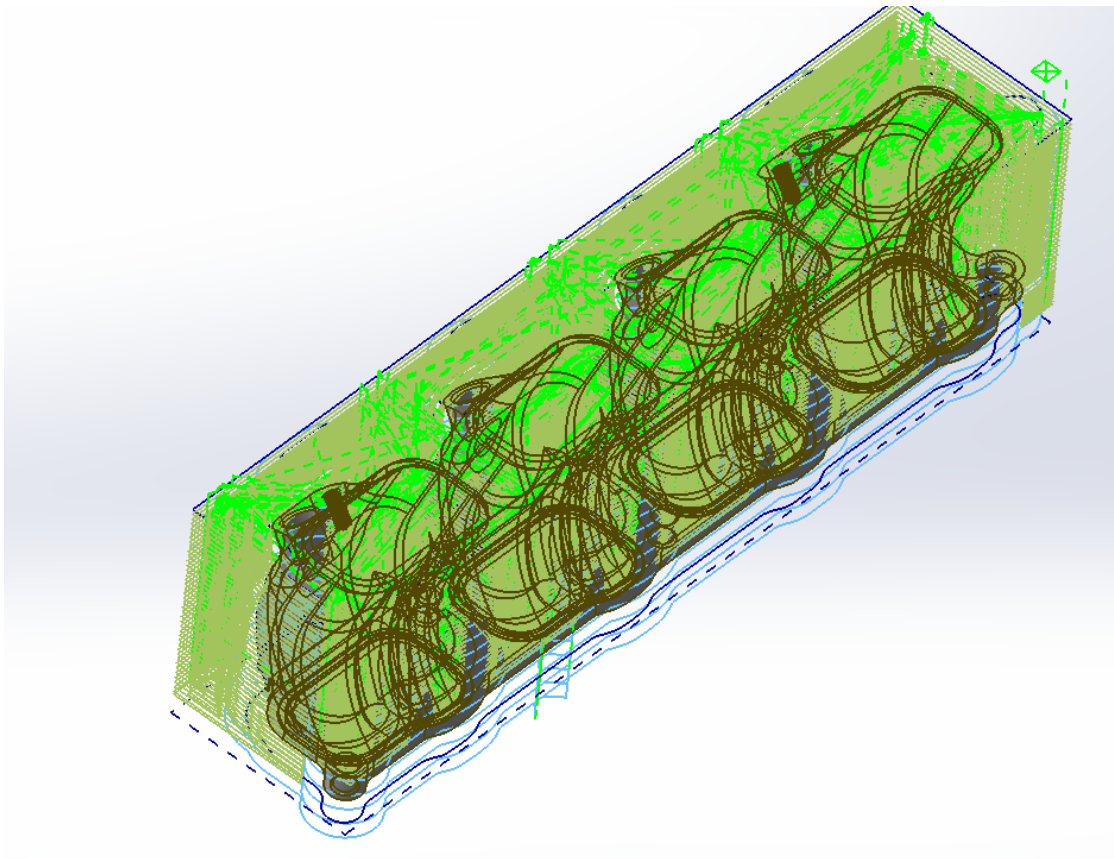


Рис 3.3.4 Траекторні рухи інструмента на першій операції

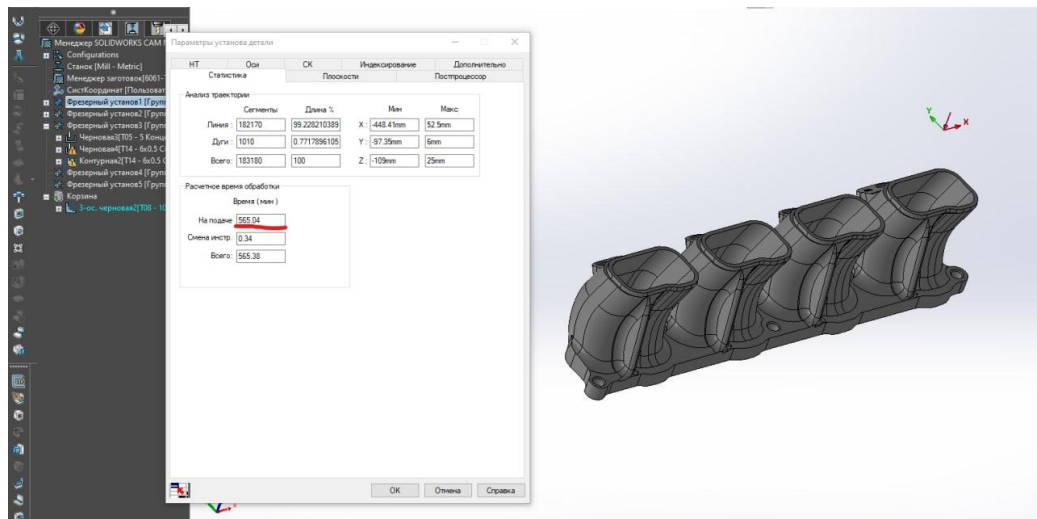


Рис 3.3.5 Загальний час оброблення на першій операції

Для максимально об'єктивної оцінки часу було застосовані рекомендовані параметри виробника верстату та інструменту (взяті з застосунку Sandvic). По завершенню обробки на першій установі ми отримали час обробки 565хв. Загальний час оброблення деталі «ранери» вийшов 974хв. Розміри заготовки для виконання такої деталі 400x90x105мм.



### 3.3.2. Цінова політика фрезерування

Для оцінки вартості виготовлення такої деталі методом фрезерування з суцільної заготовки нам потрібно мати, час на розроблення керуючої програми, загальний час оброблення деталі, вартість часу оброблення деталей на верстаті та вартість заготовки.

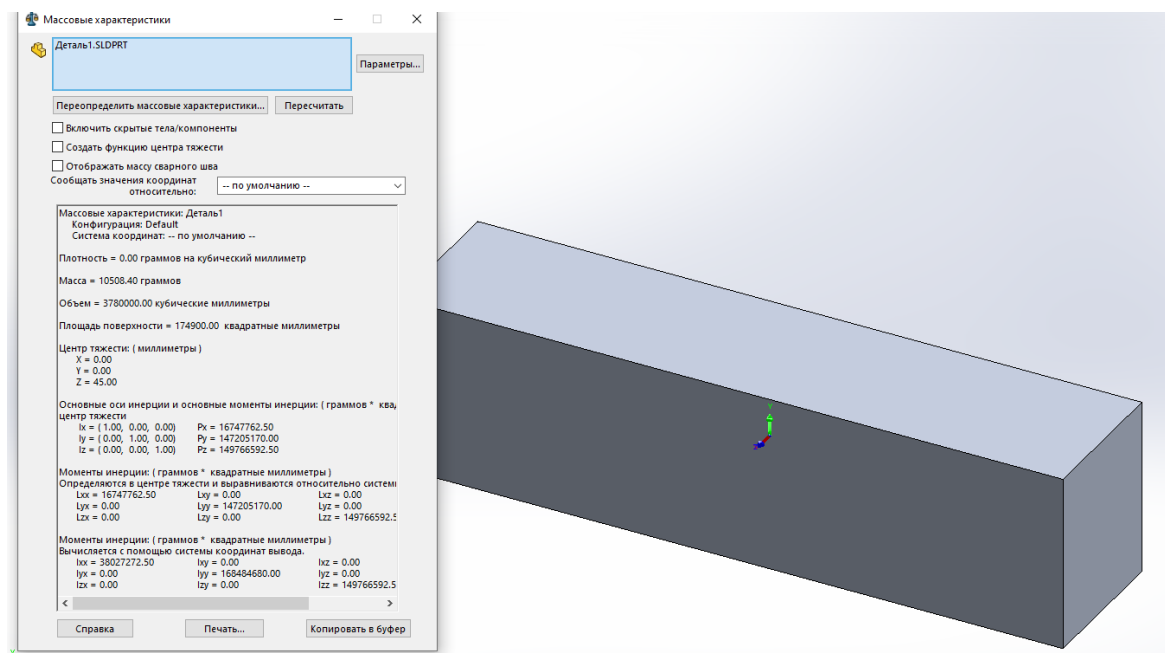


Рис 3.3.6 Визначення маси заготовки

Маса заготовки для виготовлення ранерів 10,5кг, середній ціник на алюмінієві сплави становить 9\$/кг, тому вартість заготовки разом з порізкою буде 102\$.

Розроблення керуючої програми включаючи підбір магазину інструмента у middle- engineer займає приблизно 8год, так вартість розробки 240\$

Вартість обробки на сучасних ЧПК верстатах в Україні коливається в межах 30-40\$/год, для розрахунку вартості прийmemo середнє значення в 35\$/год, але ще закладаємо вартість робіт з установки деталі в верстат, для такого габариту деталі це буде коштувати 10\$/установу. Загальний час обробки 974хв=16,2год, з чого маємо вартість за обробку 567\$. Так загальна вартість виготовлення деталі «ранери» методом фрезерування 929\$.

### 3.4. Аналіз методів виготовлення

Для обрання метода виготовлення деталі треба виконати порівняльний аналіз трьох методів виготовлення. Для кінцевого споживача немає різниці як буде виготовлена деталь, якщо вона виконує одну й ту саму функцію. Для компанії, котра займається розробкою та реалізацією товару важливими аспектами є собівартість виготовлення, швидкість виготовлення, швидкість розгортання нової серії випуску. Нижче представлена порівняльна таблиця (табл. 3.4.1) в якій розглянуту методики виготовлення.

Таблиця 3.1

#### Характеристики методик виготовлення

Критерій	Лиття	3D друк	Фрезерування
Вартість виготовлення першої деталі	282\$	2430\$	929\$
Вартість виготовлення деталі в серії	242\$	2415\$	689\$
Вага деталі	1400гр.	840гр.	1400гр.
Швидкість виготовлення 1 деталі	1,5роб. днів	3,5роб. днів/верстат	2,2 роб. днів/верстат
Швидкість розгортання нової серії виробництва	0,5 роб днів	0,2 роб. днів	0,5 роб. днів

Маючи перед собою таблицю з основними характеристиками виготовлення деталі різними методами, нескладно знайти фаворита, який буде доцільним для обрання. найдешевшим та найшвидшим методом виготовлення є лиття. В порівнянні з фрезеруванням він має лише один глобальний недолік – зовнішній вигляд. Як не дивно, в наш час багато людей обирає компоненти не лише за свій функціонал, велику роль відіграє естетика виробу.

Найдорожчий метод виготовлення деталі є адитивний, але за свою ціну він має велику перевагу в вазі, що в рамках деталі для автоспорту є суттєвим критерієм. Такого зменшення ваги не можна отримати жодним класичним методом виготовлення.

**Висновок:** в технологічному розділі ми розглянули три методи, які задовольняють потреби при одиничному виготовленні деталі; було порівняно можливості виготовлення різними методами.



## **4. ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАЛИШКОВИХ НАПРУЖЕНЬ ПІСЛЯ ОБРОБЛЕННЯ**

Метою даного дослідження було дослідити залишкові напруги в заготовці з алюмінієвого сплаву Al-6061 (АД33) після механічної обробки. Чутливість залишкових напруг до швидкості різання, швидкості подачі, визначали методом скінченних елементів. Розтягуючі залишкові напруги на поверхні деталей є загалом небажані, оскільки вони сприяють втомі металу і корозійному розтріскуванню. Дво розмірна модель обробки була розроблена з використанням комерційно доступного програмного забезпечення Abaqus, для імітування ортогонального різання сплаву Al-6061. Числове моделювання ортогонального різання заготовки проведено з різними попередньо вибраними комбінаціями швидкості подачі та швидкості різання.

Сучасна економіка значною мірою залежить від технології виробництва. Незважаючи на дуже складні технології виробництва, багато процесів все ще залежать від досвіду та інтуїції [8]. У сучасних промисловостях, таких як аерокосмічна, автомобільна, будівництва підводних човнів, специфічний дизайн деталей вдосконалюється та відповідні методи обробки мають мати прогрес. Нові матеріали з високою твердістю, в'язкістю і міцністю вони також становлять значні труднощі коли мова заходить про механічну обробку цих сплавів. Тому ці матеріали традиційно вважаються важко піддатливими механічній обробці через їх сильну тенденцію до деформації зміцнення, зберігаючи свою високу міцність навіть при підвищених температурах, часто їх менша теплопровідність обмежує відвід тепла, що виділяється біля кінчика інструмента, що спричиняє проблеми через різке підвищення температури.

### **4.1. Дослідницька робота**

Основний напрямок розвитку механічної обробки – розвиток низької вартості і високої якості продукції. Оптимізація параметрів обробки відіграють важливу роль у досягненні цієї мети при цьому передбачає оптимальний вибір

умов різання, тобто швидкості різання, глибини різання, подачі та кількості проходів. Всі ці параметри впливають на шорсткість поверхні, залишкові напруги, стійкості до втоми і мікроструктурні характеристики.

Метою цієї роботи є дослідження впливу швидкості подачі і швидкості різання на залишкові напруги в алюмінієвій заготовці зі сплаву Al-6061 після механічної обробки.

#### **Дослідницька робота включає:**

- 1) Розробка чисельної моделі ортогонального різання
- 2) Застосування вдосконаленої математичної моделі включає дослідження нелінійної поведінки матеріалів, включаючи пластичні деформації і руйнування.
- 3) Дослідження впливу швидкості подачі та швидкості різання на залишкові напруги в алюмінії Al6061 використовуючи числову модель.

#### **4.1.1. Розгляд існуючих досліджень**

Сучасні дослідження в галузі механічної обробки набувають нового рівня, перевага наявності обчислювальних кластерів, які забезпечують високу обчислювальну потужність і складні числові коди, які можуть працювати в паралельних системах. Ефект параметрів механічної обробки такі, як сили різання, температура, можна передбачити їх морфологію, залишкові напруги та деформації нових та існуючих матеріалів до фактичної операції механічної обробки. Експериментальний підхід, який здебільшого базується на досвіді і методах проб і помилок коштує дорого, як і час витратний на ці процеси. Чисельне моделювання може заощадити ресурси, таким чином зменшивши вартість і може бути використане для оптимізації параметрів різання.

Чисельне моделювання процесів механічної обробки є дуже складним завданням, яке створює багато проблем. Операція механічної обробки передбачає використання нелінійних матеріальних моделей, що може передбачити пластичну деформацію та руйнування матеріалу. Руйнування

матеріалу призводить до утворення нових поверхонь, через це контакт між інструментом і матеріалом змінюється з часом. Зміна властивостей заготовки та інструменту, умови обробки, включаючи швидкість різання, швидкість подачі та глибину різання, використання ріжучої рідини або сухої обробка та взаємодія всього вищезазначеного в одній системі збільшує складність числової моделі [9]

Ортогональна обробка з використанням 2-D моделі кінцевих елементів робилася багатьма дослідниками, враховуючи різноманітні аспекти, M. Agmell та ін. [10] виконали повне сполучення термомеханічного 2-D аналізу в Abaqus для ортогонального різання зі сталі AISI 4140 (40XФА). Теоретично досліджено вплив товщини стружки від форми зони деформації. Результати показали, що двовимірні кінцево-елементна модель здатна представити різні зони деформації, викликаних під час різання, J. L. Vasargia та ін. [11] врахували ефект динаміки руху, термомеханічний зв'язок, закон пошкодження і контакт тертям для вивчення нестационарного процесу формування стружки за допомогою 2D і 3D моделей скінчених елементів для 42CD4 (38XM) сталі. Результати моделі скінчених елементів показали, що формування стружки в результаті внутрішньої поведінки матеріал був реалістичним. F. Akbar[12] симулював ортогональне точіння для сталі AISI 4140 з використанням різально-інструменти з твердого сплаву на основі вольфраму та дійшли висновку, що прогнозування процесу обробки потребує точного визначення розподілу тепла між поверхнею інструмента та стружкою. Спостерігалася велика деформаційна реакція Al 6061-T6 досліджено D. R. Lesuer et al. [13] в діапазоні швидкостей деформації від  $10^{-4} \text{ c}^{-1}$  до  $10^4 \text{ c}^{-1}$  для критичного розрахунку міцності і пошкодження компонентів моделі Johnson Cook (JC). Вони запропонували нову матеріальну модель, спрямовану на усунення недоліків матеріальної моделі JC та розглядає вплив утворення пустот на текучість та поведінку потоку. Hongtao Ding[14] використав плоско-деформаційне ортогональне різання для процесу моделювання подрібнення

зерна в Al 6061-T6. Розмір зерна в стружці Al 6061 T6 було одержано від початкового розміру зерна 75 мкм до приблизно 160 мкм, 100 мкм і 80 нм при різних прикладених рівнях деформацій зсуву в межах від 1,8 до 5,2. Це було зроблено зміною передніх кутів інструменту в діапазоні від 20° до -20°. Більший негативний передній кут інструмента був обраний для зменшення розміру зерна в стружці за рахунок застосування більшого напруження.

Альберт Дж. Ши [15] застосував ортогональне різання металу відпаленої низьковуглецевої сталі для вивчення впливу переднього кута на залишкові напруження. Було помічено, що збільшення коефіцієнта тертя менше впливає на різання ніж більший передній кут. Для нульового або негативного переднього кута він залишився нечутливий до зміни швидкості різання, крім того, J.C. Outeiro [16] представив вплив параметрів процесу різання на продуктивність обробки та залишкових напруг при сухому токарному обробленні inconel-718 (XNM45) та аустеніту нержавіючої сталі AISI 316L (3X17N14M3) твердосплавним інструментом з покриттям і без нього. Повідомлялося, що виміряні залишкові напруження в обох матеріалах були більшими на розтяг на обробленій поверхні ніж стискаючі напруження виявлені під поверхнею нижче 10-25 мкм. Крім того, обробка інструментом без покриття залишила більші залишкові напруження порівняно з інструментом з покриттям.

Встановлення залежності між величиною залишкових напружень після механічної обробки матеріалу та параметрами різання можуть надати можливість процесу поліпшення. Цього можна досягти підбором параметрів різання для зменшення або збільшення залишкових напружень, що спостерігається після обробки. Це особливо важливо для застосування високоміцних аерокосмічних сплавів, таких як Al-6061. Контроль залишкового напруження допоможе зменшити втому металу, що є одним із критичних факторів виходу з строю деталей в аерокосмічній галузі.

## 4.2. Моделювання методом скінчених елементів

### 4.2.1. Наукова складова дослідження

Для чисельного моделювання процесів використовуємо комерційно доступне програмне середовище Abaqus. Про деталі методів моделювання та розробки в цьому дослідженні наведені нижче.

Було використано двовимірну модель для симуляції залишкових напружень. Оскільки жодних змін поперечного переріз матеріалу не передбачалося, тому двовимірна модель забезпечить надійний результат. Під час процесу обробки деформація заготовки відбувається з високою швидкістю, що призводить до динамічного навантаження. Це явище найкраще фіксується за допомогою методів скінчених елементів, і для цієї мети використовувався Abaqus/Explicit. Залишкові напруги, що виникають під час механічного різання, розглядалися лише в цьому дослідженні.



Рис. 4.2.1. Геометрія заготовки та положення інструменту

Геометрія заготовки та інструмента наведена вище (рис. 1.). Розміри заготовки  $5 \times 2$  мм. Розміри вибрано таким чином, щоб деталь була достатньою для отримання стабільного утворення стружки під час моделювання, а її висота була достатньою для вловлювання напруги, що виникає в результаті обробки поверхні. Геометрія інструменту була обрана з доступних джерел для інструментів для обробки алюмінію. Обраний інструмент CCMW 09 T3 04 (специфікація ISO) має носик радіусом 0,4 мм і переднім кутом  $0^\circ$  і заднім кутом  $7^\circ$  [19]. Інструмент спочатку розташовували так, щоб товщина нерозрізаної

стружки становила 0,2 мм. Заготовка була повністю зафіксована по нижній поверхні, щоб уникнути руху твердого тіла. Рух інструменту був обмежений у напрямку Y і отримав швидкість у напрямку X.

Модель матеріалу Johnson-Cook (JC) використовувалася для матеріалу заготовки Al-6061. Ця модель підходить для задач, де швидкості деформації змінюються у великому діапазоні ( $10^2 - 10^6 \text{ с}^{-1}$ ) [10], [12]. Модель JC здатна передбачити пластичну деформацію, а також пошкодження та руйнування. Напруження в режимі пластичної деформації задається наступним рівнянням

$$\bar{\sigma} = (A + B\bar{\epsilon}^n) \left[ 1 + C \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \left[ 1 - \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right)^m \right]$$

де  $\bar{\sigma}$  еквівалентне напруження,  $\bar{\epsilon}$  еквівалентна пластична деформація,  $\dot{\bar{\epsilon}}$  швидкість пластичної деформації,  $\dot{\bar{\epsilon}}_0$  еталонна швидкість деформації, **A** — початкова межа текучості, **B** — модуль зміцнення, **n** — показник експоненти деформаційного зміцнення, **C** — коефіцієнт залежності швидкості деформації, **m** — коефіцієнт термічного розм'якшення, **T<sub>room</sub>** — кімнатна температура, **T<sub>melt</sub>** — температура плавлення. Параметри моделі матеріалу Джонсона-Кука для Al-6061 доступні в літературі та наведені в таблиці I.

Таблиця 4.1

Характеристики матеріалу

Характеристика метеріалу	Значення
Щільність	2700 кг/м <sup>3</sup>
Модуль Юнга	68,9 ГПа
Коефіцієнт Пуассона	0.33
Початкова межа текучості, A	324МПа
Модуль твердіння, B	114МПа

Показник деформаційного зміцнення, n	0,42
Коефіцієнт швидкості деформації, C	0,002
Еталонна швидкість деформації	1с <sup>-1</sup>

При моделюванні процесу утворення стружки на базі програмного забезпечення ABAQUS/Explicit використовується рівняння Джонсона-Кука, що відповідає високошвидкісній деформації металу. Модель динамічного руйнування матеріалу Джонсона-Кука ґрунтується на значенні еквівалентних пластичних деформацій у кристалічній решітці.

Вважається, що руйнування відбувається коли значення параметра D перевищує 1. Параметр руйнування D визначається наступним чином:

$$D = \sum \left( \frac{\Delta \bar{\epsilon}}{\bar{\epsilon}_f} \right)$$

Де,  $\Delta \bar{\epsilon}$  — зміна еквівалентної пластичної деформації,  $\bar{\epsilon}_f$  — деформація руйнування.

Передбачається, що деформація руйнування  $\bar{\epsilon}_f$  залежить від коефіцієнта пластичної деформації  $\frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0}$ , коефіцієнта напруги p/q і температури .

Величина  $\bar{\epsilon}_f$  визначається наступним чином:

$$\bar{\epsilon}_f = \left[ D_1 + D_2 \exp \left( D_3 \frac{P}{\bar{\sigma}} \right) \right] \left[ 1 + D_4 \ln \left( \frac{\dot{\bar{\epsilon}}}{\dot{\bar{\epsilon}}_0} \right) \right] \times \left[ 1 + D_5 \left( \frac{T - T_{room}}{T_{melt} - T_{room}} \right) \right]$$

де d<sub>1</sub> - d<sub>5</sub> коефіцієнти руйнування для моделі динамічного руйнування по рівнянню Джонсона Кука, визначені при температурі T, вони наведені в таблиці 2.5

## Параметри коефіцієнтів D1-D5

Початкова деформація, D1	-0,77
Експоненціальний коефіцієнт, D2	1,45
Коефіцієнт тривісності, D3	-0,47
Коефіцієнт швидкості деформації, D4	0,0
Температурний фактор, D5	0,0

Використовуючи матеріальну модель, яка може передбачити помилку, кінцево-елементна модель не може визначити товщину стружки наперед. Матеріал заготовки видаляється різанням.

У цьому дослідженні інструмент вважався жорстким, оскільки в центрі уваги були залишкові напруги. Ділянка заготовки, де очікується руйнування матеріалу внаслідок операції різання, була покрита дрібною сіткою, а решта заготовки – грубою сіткою. Це допомагає зменшити загальну кількість елементів і, отже, витрати на обчислення. Під час симуляції механічної обробки відбувається серйозне спотворення сітки. Довільне формулювання Лагранжа-Ейлера (ALE) було використано для зменшення викривлення сітки під час моделювання. Домен адаптивної сітки ALE було призначено заготовці, а частоту для повторного зведення було прийнято рівною 100. У прирощенні адаптивної сітки нова, більш гладка сітка створюється шляхом ітераційного проходження по домену адаптивної сітки. Під час кожної розгортки сітки вузли в домені переміщуються на основі поточних позицій сусідніх вузлів і елементів, щоб зменшити спотворення елементів.



Поверхневий контакт використовувався для визначення взаємодії заготовки та інструменту. Загальний алгоритм контакту не застосовувався, оскільки внутрішні поверхні генеруються через утворення стружки під час моделювання, а контакт між новоствореними поверхнями та інструментом необхідний для безперервної обробки деталі з утворенням стружки. Тангенціальна поведінка контакту базувалася на методі пенальті. Закон тертя Кулона використовувалася з коефіцієнтом тертя 0,5.

#### 4.2.2. Вплив швидкості різання та подачі

Глибина різання була фіксованою в усіх цих симуляціях, а швидкість різання та швидкість подачі змінювалися. Комбінації швидкості різання та швидкості подачі, що використовуються в різних симуляціях, наведені в таблиці 4.2.1.

*Таблиця 4.3*

*Параметри швидкості різання та подачі*

Номер симуляції	Швидкість різання м/хв	Швидкість подачі мм/об
1	250	0.2
2	500	0.1
3	500	0.3
4	750	0.3
5	250	0.3
6	750	0.2
7	500	0.2
8	250	0.1
9	750	0.1

Результати моделювання показують утворення стружки зколювання для всіх комбінацій швидкості різання та швидкості подачі. Згенерована стружка для однієї комбінації швидкості різання та подачі показана на рис.4.2.2 і є

репрезентативною для стружки, яка спостерігалася під час усіх моделювань. Прогнозована еквівалентна пластична деформація в заготовці після стабільного утворення стружки показана на рис.4.2.3. Найвища пластична деформація була передбачена в зоні зсуву вздовж поверхні розділу стружки інструменту.

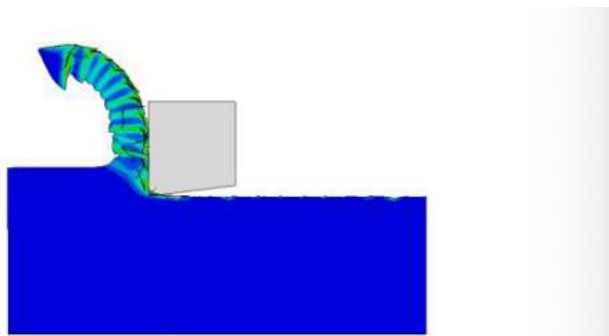


Рис. 4.2.2. Утворена стружка при швидкості подачі  $f=0.3$  мм/об та швидкості різання 500 м/хв

Пластична деформація також спостерігалася під обробленою поверхнею, однак шар пластичної деформації під обробленою поверхнею був дуже малої товщини. Первинну та вторинну зони зсуву можна більш чітко побачити за розподілом напруги фон Мізеса в заготовці, як показано на рис 4.2.4.

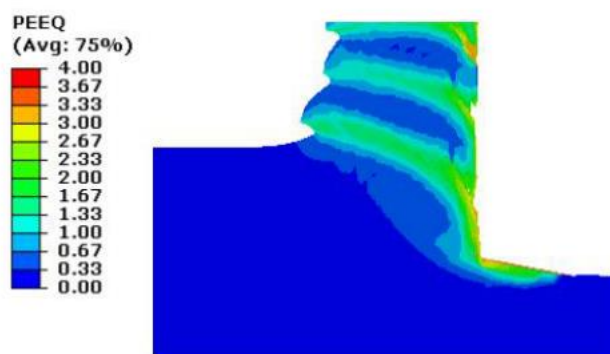


Рис. 4.2.3. Еквівалентна пластична деформація в деталі ( $f=0,3$  мм/об і швидкість різання = 500 м/хв).

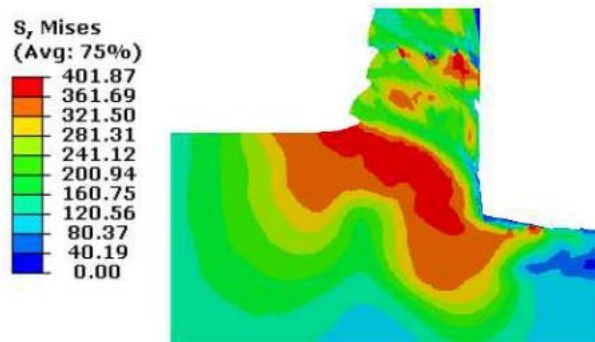


Рис.4.2.4. Розподіл напруги фон Мізеса ( $f=0,3$  мм/об і швидкість різання = 500 м/хв).

Прогнозовані залишкові напруги в заготовці після обробки були виміряні для всіх комбінацій швидкості різання та швидкості подачі. На **рис. 5** показано графік залишкових напруг під поверхнею для  $f=0,1$  і трьох різних швидкостей різання.

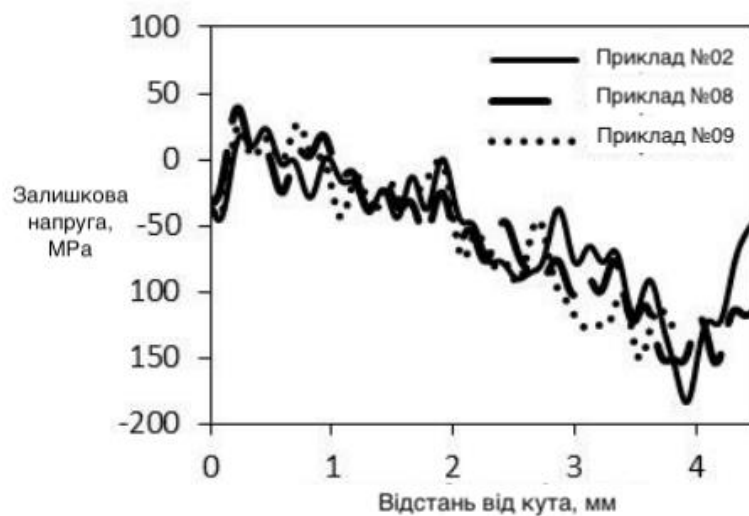


Рис. 4.2.5. Залишкова напруга у порехні заготовки після обробки при  $f=0,1$ . Швидкості різання: Зразок 02=500 м/хв, Зразок 08=250 м/хв, Зразок 09=750 м/хв.

Нуль на осі  $x$  представляє початкову точку інструменту, а відстань уздовж кромки береться в напрямку швидкості різання. Можна побачити, що залишкові напруги починають ставати стискаючими, як тільки інструмент починає переміщатися і починає утворюватися стружка. Залишкові напруги

стиску починають зростати, коли швидкість подачі змінюється від 0,1 мм/об до 0,2 мм/об, досягаючи максимального значення, а потім зменшується, коли швидкість подачі збільшується до 0,3 мм/об. Це можна спостерігати на Рис. 4.2.6. Було зазначено для Al6061-T651 [19], що сила різання зменшується, коли швидкість різання збільшується від 30 до 210 м/хв, а зміна сили різання стає мінімальною, коли швидкість різання продовжується до 300 м/хв. Таким чином, нечутливість залишкових напруг у цьому дослідженні може бути пов'язана із силою різання, яка може не зменшуватися суттєво зі збільшенням швидкості різання.

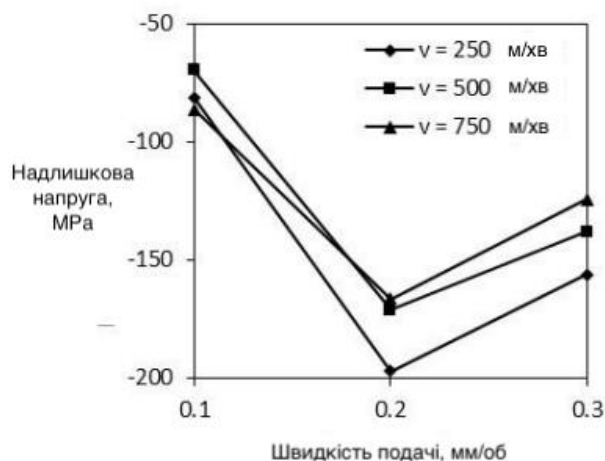


Рис. 4.2.6. Результат швидкості подачі та швидкості різання на надлишкові напруги.

### 4.2.3. Вплив параметрів інструмента

Щоб дослідити вплив різних параметрів на цілісність поверхні після машинної обробки, була створена модель симуляції FEM, яка підходить для обчислення цілісності поверхні, спричиненої механічними або температурними інструментальними навантаженнями під час різання Al-6061. Інструмент для різання повинен бути в повному контакті із заготовкою та стружкою під час всього процесу симуляції. Таким чином, було необхідно провести чисельні дослідження за допомогою власно розробленого методу безперервного повторення з використанням ABAQUS, де нова сітка створювалася для всієї заготовки кожні 5 мкм відносного зміщення між інструментом і заготовкою,

щоб уникнути сильного спотворення елементів, див. Рис. 4.2.7. Найменша довжина ребра елемента  $e_x=2,5$  мкм. Деталь і інструмент були змодельовані термомеханічним зв'язком за допомогою елементів типу «СРЕ4Т» з бібліотеки елементів ABAQUS. На початку кожної симуляції заготовку об'єднували приблизно з 16000 елементів. Під час моделювання кількість елементів зростала приблизно до 25000 елементів. Питома теплоємність  $c_p$  інструменту та його теплопередача навколишньому середовищу були адаптовані, як показано в [19]. Завдяки цій процедурі постійні температури були досягнуті після довжини розрізу, яка в три рази перевищувала товщину нерозрізаної стружки. Після створення стружки інструмент підняли з поверхні, щоб механічно розслабити та охолодити заготовку до кімнатної температури, див. Рис. 4.2.7..

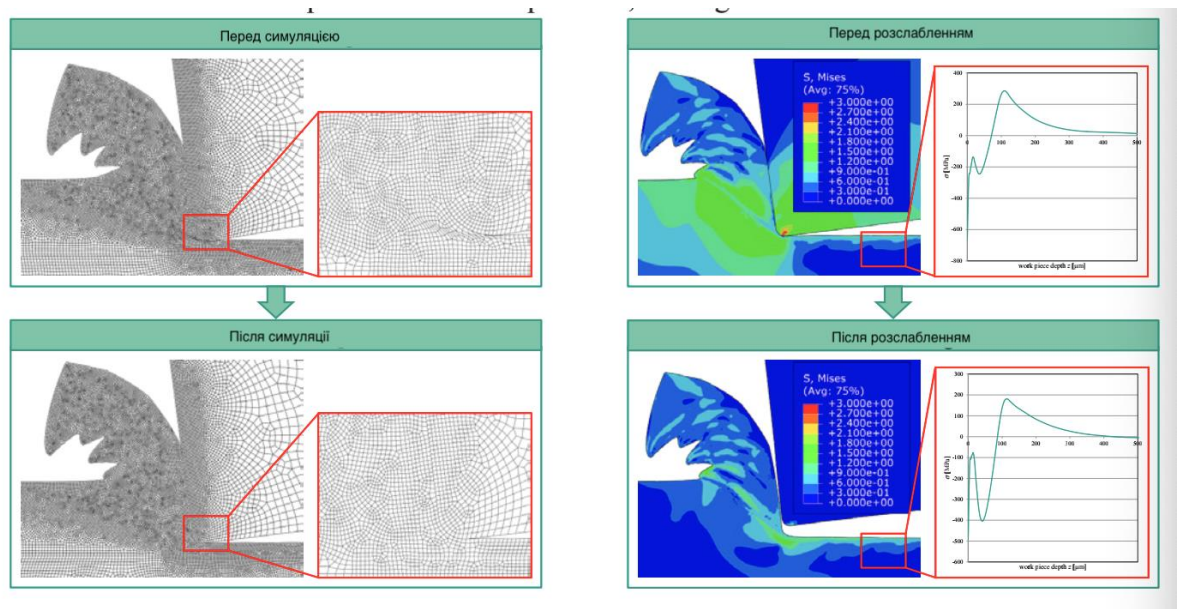


Рис. 4.2.7. Візуалізація процесу симуляції

За допомогою цієї імітаційної моделі можна розрахувати залишкові напружені стани, а також встановлені параметри, такі як сили різання, температури різання та форми стружки під час різання металу, які мають тенденцію утворювати сегментовану стружку. Геометрія ріжучого інструменту змінювалася за кутом зазору ( $\alpha_{1,S}=7^\circ$ ,  $\alpha_2=5^\circ$ ,  $\alpha_3=10^\circ$ ), переднім кутом ( $\gamma_1=7^\circ$ ,  $\gamma_2=-5^\circ$ ,  $\gamma_{3,S}=-7^\circ$ ,  $\gamma_4=-10^\circ$ ) і радіусом ріжучої кромки ( $r_{\beta 1}=15\text{нм}$ ,  $r_{\beta 2,S}=30\text{нм}$ ,  $r_{\beta 3}=45\text{нм}$ ). Стандартні параметри індексуються додатковою «s».

Al-6061 утворює сегментну стружку на всьому діапазоні параметрів різання. Сегментація впливає на напружено-деформований стан під час обробки, що, у свою чергу, змінює залишковий напружений стани в залежності від кроків сегмента. Оскільки цей вплив не вимірюється під час експериментів, залишкові напружені стани були визначені для різних положень позаду інструменту та розраховані середні значення, (див. рис. 4.2.2). Для порівняння результатів різних моделювань були взяті усереднені значення. Завдяки зміненню швидкості деформації та температурному розм'якшенню Al-6061 поверхневі залишкові напруги стиснення залишаються після механічної обробки.

Отримані профілі глибини можна охарактеризувати кількома характерними точками (рис. 4.2.9). Для профілів напруги ці точки є максимальними залишковими напругами стиску та розтягу в напрямку різання  $\sigma_{p, max}^I$ ,  $\sigma_{t, max}^I$  відповідно та глибиною напруг стиску  $z(\sigma_{p}^I)$ . Профіль деформації можна охарактеризувати максимальною пластичною деформацією  $\varepsilon_{pl, max}$ , та глибиною пластичної деформації  $z(\varepsilon_{pl})$ , що визначається значенням нижньої межі  $\varepsilon_{pl, lim} = 0.01$ .

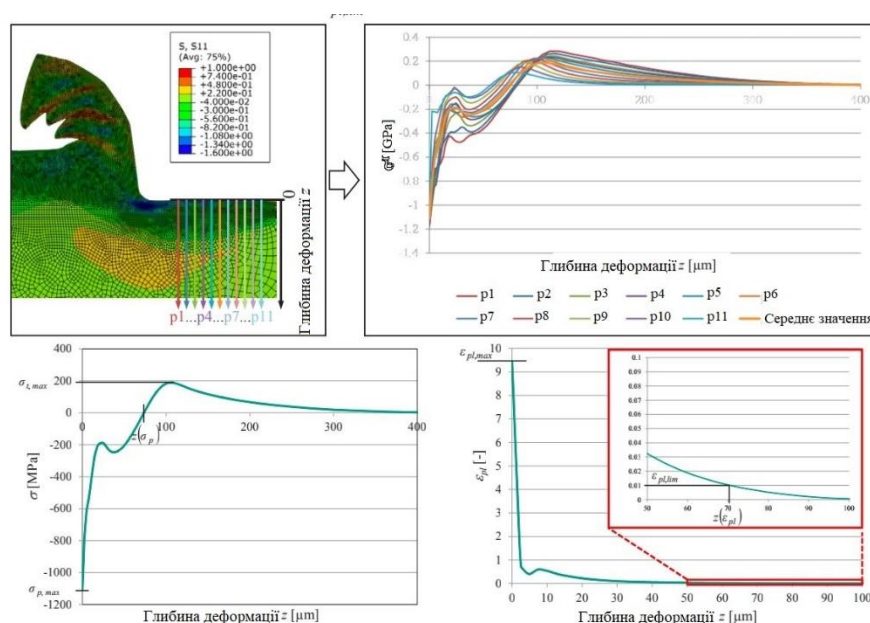


Рис. 4.2.8 Визначення залишкових напружених станів і характеристика від глибини деформації.

Щоб з'ясувати вплив кожного фактори матеріальної моделі, вони спочатку повинні бути розглянуті поодиночі див. рис. 4.2.8. Параметри, згідно з Shivpuri та іншими описує найвищу деформацію та найменшу швидкість деформації з чотирьох розглянутих наборів параметрів, тоді як два різні набори параметрів згідно з Лі та Ліном характеризуються найвищою швидкістю деформації та найменшим впливом деформації. Параметри шіхарактеризуються найнижчою межею пружності та найвищою поведінкою розм'якшення при підвищенні температури. Всі інші моделі мають таку ж температурну залежність, але менш виражену.

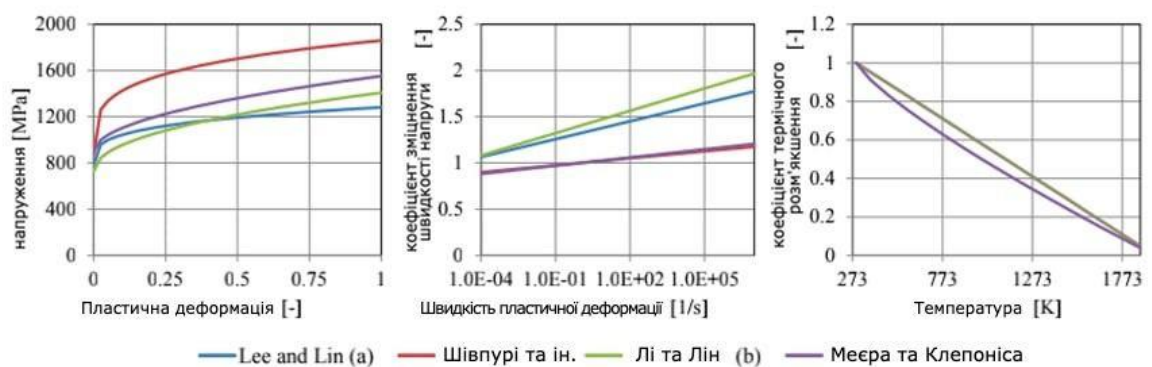


Рис. 4.2.9. Вплив пластичної деформації (а), швидкості пластичної деформації (b) та температури (с)

Щоб показати вплив досліджуваного процесу, геометрії та параметрів матеріалу, лише основні результати узагальнено з точки зору їхнього впливу на характеристики поверхні, див. Рис. 4.2.10. Оскільки кут  $\alpha$  виявляв найменший вплив і не мав істотного впливу відмінності між чотирма результатами аналізу матеріалу не показано.



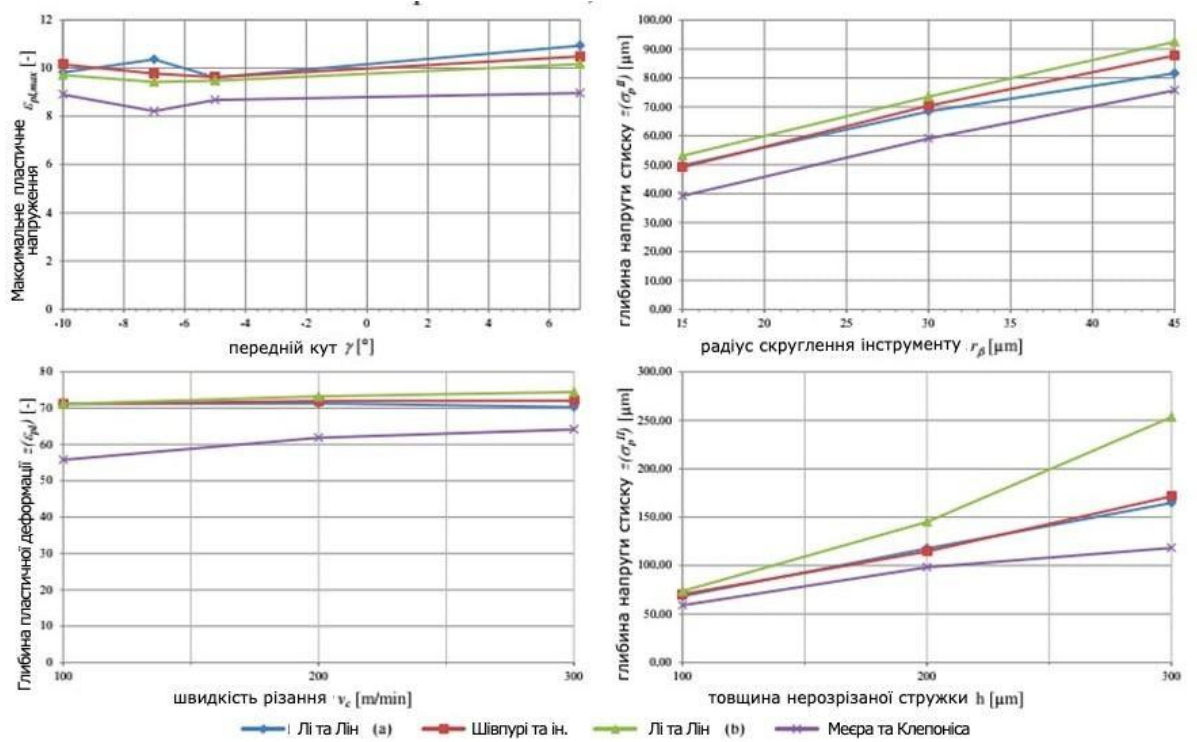


Рис. 4.2.10. Вплив (а) переднього кута  $\gamma$ , (b) радіуса ріжучої кромки  $r_\beta$ , (c) швидкості різання  $v_c$ , (d) товщини нерозрізаної стружки  $h$ .

Передній кут  $\gamma$  показав зменшення глибини напруги стиску та глибини пластичної деформації зі збільшенням кутів, тоді як максимальна пластична деформація показала тенденцію до падіння при від'ємних кутах. Зі збільшенням радіуса ріжучої кромки  $r_\beta$  збільшується глибина стискаючої напруги і пластичної деформації. Максимальні значення напружень розтягу та пластичних деформацій показали однакову поведінку. У змінному діапазоні швидкостей різання глибина пластичної деформації дещо збільшується. Це пов'язано зі зростанням швидкості пластичної деформації. Домінуючий вплив швидкості пластичної деформації також можна побачити при зміні товщини нерозрізаної стружки, де збільшення викликає зростання глибини стискаючих напруг.

Зміна переднього кута  $\gamma$  та радіуса ріжучої кромки  $r_\beta$  показала однакову поведінку для всіх чотирьох розглянутих наборів параметрів матеріалу. Результати зміни швидкості різання  $v_c$  показали два протилежні механізми, вплив температури та швидкості деформації. Глибина пластичної деформації



більш різко зросла при наборі параметрів Мейєра і Клепоніса, що пов'язано з вищою температурою розм'якшення. Вплив швидкості деформації можна виявити в інших наборах параметрів, де Лі та Лін (а) демонструють найбільший вплив. При зміні товщини нерозрізаної стружки глибини стискаючих напружень показують для чотирьох наборів параметрів той самий порядок, що й для впливу швидкості пластичної деформації (див. рис. 4.2.9.).

**Висновок:** моделювання методом скінчених елементів може використовуватися для прогнозування залишкових напруг після механічної обробки компонентів; за вибраного діапазону швидкостей різання та подачі залишкові напруги на поверхні заготовки та під нею є стискаючими; залишкові напруги були чутливі до змін швидкості подачі у вибраному діапазоні, однак чітка тенденція збільшення або зменшення залишкової напруги зі зміною швидкості подачі потребує подальшого дослідження; задній кут, передній кут і радіус ріжучої кромки мають найменший вплив, тоді як швидкість різання та товщина зрізаного шару мають більший.

## **5. СТАРТАП – ПРОЄКТ**

Стартап-проект новітня форма підприємницької діяльності, яка впродовж останніх десятиліть набрала широкого розповсюдження через легкість входу в ринок. З появою інтернету як інструменту зв'язку, стало набагато простіше знаходити нових споживачів, займатись пошуком інвестицій та ресурсів, відкривати кордони ринку інших країн. Стартап став одною з основних складових інноваційної економіки, за рахунок своєї мобільності та гнучкості утворюється велика кількість проектів, через це загальна маса інноваційних ідей збільшується. Проте ринкові відносини підвищеною мірою ризику впливають на створення стартап проектів, так за оцінками експертів, лише 2-5% проектів стає успішними, а 36% проектів завершують свою діяльність в перший рік створення. Створення та інтеграція стартап-проекту в ринкові відносини передбачає низку заходів, в межах як оцінюються ринкові перспективи, план та принцип реалізації виробничої діяльності, аналіз ризиків та заходи з заохочування інвесторів.

### **5.1. Опис ідеї проекту**

Пропонується створити впускний колектор для автомобіля MAZDA MPS, який буде використовуватись на автомобілях для участі у низці автоспортивних змагань, а також для міських автомобілей підвищеної потужності. Даний продукт має такі основні переваги: має високі показники потужності, легкість в роботі, відносну дешевизну (порівнюючи з конкуруючими продуктами).

## Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Створення високопродуктивного впускного колектора для MAZDA MPS	1.Автоспортивні перегони	1.Висока продуктивність
	2.Міські автомобілі	2. Ергономічність
		3. Відносна дешевизна
		4. Зручне використання

**5.1.1. Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.**

Серед техніко-економічних властивостей колектора можна виділити три основних: максимальна потужність; рівномірність наповнення; вартість.

В якості прямих конкурентів було розглянуто три топових виробника впускних колекторів.

Визначимо характеристики, що мають гірші(W), аналогічні(N), та більш сильні (S) значення порівнюючи їх з товарами конкурентів (табл. 4.2).

Таблиця 4.2 визначення слабших, нейтральних та сильних характеристик ідеї проекту

№	Техніко-економічні характеристики	Мій проект	(потенційні) товари конкурентів			W	N	S
			Конкурент 1	Конкурент 2	Конкурент 3			
1	Вартість	Виготовлення впускного колектора в Україні	JMF	MPS	Cork	-	+	-
2	Якість		intake	Garage	Sport	-	+	-
3	Рівномірність наповнення		-	-	+			
4	Макс. потужність		-	-	+			

Порівняльний аналіз є підґрунтям для визначення конкурентоспроможності нашого виробу перед товаром конкурентів. Наш проект має сильні сторони в максимальній потужності, яку він може видати, та у рівномірності наповнення, але ціна і якість на рівні з продуктами конкурентів. За рахунок набагато кращого функціоналу планується завоювати ринок та вийти в лідери продаж.

## **5.2. Технологічний аудит ідеї проекту**

За допомогою аудиту технології можна оцінити реалізацію ідеї проекту. Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту:

При виготовленні високопродуктивного впускного колектора головною задачею виступає підвищення максимальної пропускної здатності та вирівнювання рівномірності наповнення. Такі технології вже існують та доступні для реалізації.

При виготовленні ергономічного впускного колектора головною проблемою є недосконалість форм корпусу та приєднаних деталей, що знижує привабливість продукту. Така проблема вирішується підлаштуванням під потреби середньостатистичного покупця в ергономіці автомобіля. Така технологія наявна та доступна, але потребує доопрацювання.

## Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології її реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
1.	Зробити високопродуктивний впускний колектор	Розробка правильної внутрішньої будови	Наявні	Доступні
2.	Зробити ергономічний продукт	Підлаштування конструкції форм корпусу та функціональних деталей під зручність споживача	Наявні, але потребують доопрацювання	Доступні
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: обидві технології доступні та наявні на ринку				

### 5.3. Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Наразі, в Україні, попит деталі для спортивних автомобілей дещо низький, через цінову політику постачальників. Також, не створені зручні умови для розвитку автоспортивної індустрії в цілому. Проте за рахунок сучасних технологій ринок збуту не обмежується країною вироблення. З появою інтернету, як інструменту комунікації, суспільство «закрило гештальт» з подоланням бар'єру між кордонами різних країн. Загальний обсяг продаж 1,2 млн USD в рік, при цьому динаміка ринку зростає. Середній показник рентабельності на ринку є 18%, а це є доволі привабливим для входження за попередньою оцінкою.

## Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од	5-8
2	Загальний обсяг продаж, USD	1,2 млн в рік(Світ)
3	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	Не має
5	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	18%

## 5.3.1. SWOT-аналіз стартап-проекту

## SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони
<ul style="list-style-type: none"> <li>- висока пропускна здатність ;</li> <li>- високі показники рівномірності наповнення ;</li> <li>- ергономічність</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- складність виробу;</li> <li>- ціна співвідносна цінам конкурентів;</li> <li>- система розрахована на високу потужність</li> </ul>
Можливості	Загрози
<ul style="list-style-type: none"> <li>- вихід на міжнародний ринок;</li> <li>- подальша оптимізація конструкції;</li> <li>- наявність шляхів популяризації автоспорту</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- зростаючий ринок виробників впускних систем;</li> <li>- розробки конкурентами більш продуктивної системи .</li> </ul>

### 5.3.2. Альтернативи ринкової поведінки

Виконавши SWOT-аналіз розробляються альтернативи ринкової поведінки для інтегрування стартап-проекту в ринок та орієнтовний оптимальний час їх реалізації з оцінки на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути представлені на ринку. Визначені альтернативи будуть проаналізовані з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів.

Таблиця 4.6

*Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту*

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1.	Олігополія	Просто та ймовірно	Короткі

Для виведення проекту на ринок виробників впускних колекторів, пропонується альтернативна ринкова поведінка – олігополія. За такої поведінки легко і просто та ймовірно отримати ресурси в умовах широкої конкуренції при малих термінах реалізації.

### 5.3.3. Визначення стратегії та охоплення ринку

Цільовими групами, на які націлений наш продукт, виходячи параметрів конструкції, та аналізу попередніх розділів, можна припустити:

- Автоспортсмени кільцевих перегонів;
- Автоспортсмени перегонів на прискорення (драг-рейсінг);
- Звичайні користувачі міських автомобілей

## Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1.	Автоспортсмени кільцевих перегонів	Повна готовність сприйняти продукт	Зараз спостерігається зростаюча тенденція	Кількість конкурентів постійно зростає	Вихід у сегмент доволі простий
2.	Автоспортсмени перегонів на прискорення (драг-рейсінг)	Часткова готовність сприйняти продукт	Зараз спостерігається зростаюча тенденція	Кількість конкурентів зростає в невеликій кількості	Вихід у сегмент дещо складний
3.	Звичайні користувачі міських автомобілей	Недостатня готовність сприйняти продукт	Зараз спостерігається спадаюча тенденція	Кількість конкурентів залишається стабільна	Вихід у сегмент доволі складний
Які цільові групи обрано: Автоспортсмени кільцевих перегонів					

**5.3.4. Формування базової стратегії розвитку**

За стратегію розвитку було обрано диференціацію, оскільки в проекті команда надає продукту відмінних властивостей та параметрів відносно тих, що пропонує продукт конкурентів, та повністю задовольняє потреби цільових груп потенційних покупців. Обираємо стратегію розвитку- ринкове позиціонування.



## Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку*
1.	Набавляння продукту важливих з точки зору споживача ексклюзивних властивостей, які роблять товар кращим від товарів конкурентів.	Ринкове позиціонування	Знижує можливість заміни товару, посилює привабливість до продукту, зменшує негативний вплив ціни, підвищує рентабельність	Стратегія диференціації

**5.3.5. Вибір стратегії конкурентної поведінки**

Обрана стратегія обумовлена виводом на ринок продукту, котрий здатний конкурувати з лідером. В теорії можна розглянути два стратегічні рішення: атакувати лідера, борячись за частку ринку, або ж йти за лідером. Атака лідера ринку є досить ризикована справа. Для реалізації нападу потрібні: значні фінансові витрати, впровадження «ноу-хау», створення кращих показників співвідношення «ціни/якості» і т.д. У разі провалу стратегії, компанія може опинитись на аутсайдерських позиціях на довгий проміжок часу. Реалізація даної стратегії потребує детального опрацювання багатьох аспектів як свого проекту так і конкурентів.

Таблиця 4.9

## Визначення базової стратегії конкурентної поведінки

№ п/п	Чи є проект «першопрохідцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки*
1.	Проект буде «першопрохідцем»	Компанія буде розвиватися та шукати нових споживачів, але з можливістю забирання існуючих.	Компанія не буде копіювати характеристики конкурентів,	Стратегія виклику лідера

## 5.3.6. Визначення цінових меж

Цінові межі вартості товару - від 2650\$ до 3700\$ в залежності від комплектації, що є співмірні товарів аналогів, але дорожче за товари замітники.

Таблиця 4.10

## Визначення меж встановлення ціни

№ п/п	Рівень цін на товари замітники	Рівень цін на товари аналоги	Рівень доходів цільової групи споживачів	Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу
1.	Товари замітники дешевше за ціною, але гірші за функціоналом	Ціни є приблизно однакові	Рентабельність близько 10-18%	Ціна на товар мінімальна - 2650\$; максимальна - 3700\$

### 5.3.7. Визначення оптимальної системи збуту

Включаючи такі функції збуту, як зберігання та транспортування продукту, є доцільним залучити сторонні компанії (залучена система збуту). Посередниками краще обрати компанії з арендованими місцями зберігання (ангари, склади).

Таблиця 4.11

Формування системи збуту

№ п/п	Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
1.	Споживачі товарів вузького призначення	Транспортування, зберігання	Ринок збуду розкиданий на великій території	Багатоканальний розподіл

### 5.3.8. Розроблення концепції маркетингових комунікацій

Основною стратегією позиціонування товару є нагадування, тобто регулярне оповіщення споживача про будь-які зміни функціоналу чи вигоді придбання.

## Концепція маркетингових комунікацій

№ п/п	Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для Позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
	Суворі техніко-експлуатаційні вимоги до товару на фоні різноманітності товарів-замінників	Інтернет - сайти, соціальні мережі, інтернет-магазини,	Нагадування	Поширити товар у маси	Реклама через інтернет та на спротивних івентах

**Висновок:** наявний попит та зростаюча динаміку ринку дає можливість на комерціалізацію проекту; за рахунок високої конкурентоспроможності та огляд на потенційні групи клієнтів є високі перспективи на впровадження; доцільно обрати олігополію для ринкової реалізації проекту; імплементация проекту є доцільною.

## ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі було розглянуто принцип проектування впускного колектора для спортивного автомобіля. Покладаючись на службове призначення деталі, було приведено три різні методики виготовлення деталі та виконано порівняльний аналіз методик виготовлення. Після приведених методик виготовлення було проведено аналіз впливу параметрів оброблення деталей різанням та вплив параметрів інструменту на залишкові напруження в деталі. Завершальним етапом було розроблення економічної моделі по впровадженню стартап-проєкту та інтеграцію продукту на ринок.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Robert C. Post. High Performance: The Culture and Technology of Drag Racing, 1950–2000. — JHU Press, 2001. 417 p.
2. Corky Bell. Maximum Boost - Designing, Testing, and Installing Turbocharger Systems, с56-57
3. Едріан Ньюї, Як побудувати машину (автобіографія найбільшого конструктора "Формули-1"), с255-258.
4. Petes Garage, Engine Building Part 8: Intake Manifold Theory
5. P. Kocovic, “History of Additive Manufacturing,” in 3D Printing and Its Impact on the Production of Fully Functional Components: Emerging Research and Opportunities (Hershey, PA: IGI Global, 2017), p. 1–24.
6. V. Bhavar, P. Kattire, V. Patil, S. Khot, K. Gujar, R. Singh, “A Review on Powder Bed Fusion Technology of Metal Additive Manufacturing,” 4th Int. Conf. Exhib. On Additive Manufacturing Technologies, held September 1-2, 2014 (Banglore, India: AMSI, 2014).
7. Р. А. Шмиг, В. М. Боярчук, І. М. Добрянський, В. М. Барабаш ; за заг. ред. Р. А. Шмига. — Львів, 2010. — С. 204. — ISBN 978-966-7407-83-4.
8. H. Bil, “Simulation of orthogonal metal cutting by finite element analysis,” Master thesis, The Middle East Technical University, August 2003.
9. A. P. Markopoulos, “Cutting mechanics and analytical modeling,” Finite Element Method in Machining Processes, Springer, 2013, pp. 11-27.
10. M. Agmell, A. Ahadi, and J. E. Stahl, “A fully coupled thermomechanical two-dimensional simulation model for orthogonal cutting: Formulation and simulation,” in Proc. the Institution of Mechanical Engineers, 2011, vol. 225, no. 10, pp. 1735-1745.
11. M. Agmell, A. Ahadi, and J. E. Stahl, “A fully coupled thermomechanical two-dimensional simulation model for orthogonal cutting: Formulation and

- simulation,” in Proc. the Institution of Mechanical Engineers, 2011, vol. 225, no. 10, pp. 1735-1745.
- 12.F. Akbar, P. T. Mativenga, and M. A. Sheikh, “An experimental and coupled thermo-mechanical finite element study of heat partition effects in machining,” *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 46, issue 5-8, pp. 491-507, 2009.
- 13.D. R. Lesuer, G. J. Kay, and M. M. LeBlanc, “Modeling large-strain, high-rate deformation in metals,” presented at the third Biennial Tri-Laboratory Engineering Conference on Modeling and Simulation, Pleasanton, CA, July 20, 2001.
- 14.H. Ding, N. Shen, and Y. C. Shin, “Modeling of grain refinement in aluminum and copper subjected to cutting,” *Computational Materials Science*, vol. 50, issue 10, pp. 3016-3025, 2011.
- 15.A. J. Shih, “Finite element analysis of the rake angle effects in orthogonal metal cutting,” *Int. J. Mech. Sci.*, vol. 38, issue 1, pp. 1-17, 1996.
- 16.J. C. Outeiro et al., “Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, issue 1, pp. 77-80, 2008
- 17.J. C. Outeiro et al., “Analysis of residual stresses induced by dry turning of difficult-to-machine materials,” *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, vol. 57, issue 1, pp. 77-80, 2008
- 18.M. Agmell, A. Ahadi, and J. E. Ståhl, “A numerical and experimental investigation of the deformation zones and the corresponding cutting forces in orthogonal cutting,” *Advanced Materials Research*, vol. 223, pp. 152-161, 2011.



## АКТ

використання результатів магістерської роботи  
студента КПІ ім. Ігоря Сікорського Ковальова Михайла Васильовича  
у науково-технічних розробках ТОВ «Гранд КБ»

Цим актом підтверджується впровадження результатів магістерської роботи «Технологічні особливості виготовлення деталей з нетиповою внутрішньою поверхнею» студента КПІ ім. Ігоря Сікорського Ковальова Михайла Васильовича (керівник - професор кафедри технології машинобудування Воронцов Б.С.) у виробничих розробках ТОВ «Гранд КБ».

Результатом роботи стала розробка високопродуктивного впускного колектора для проекту MAZDA 6 MPS GKB; розгляд і вибір технологічних процесів для створення колектора. Було обрано економічно найдоцільніший варіант для виготовлення з урахуванням фактору одиничного виробництва. На даний момент перший прототип знаходиться на стадії виготовлення та готується до перших випробувань.

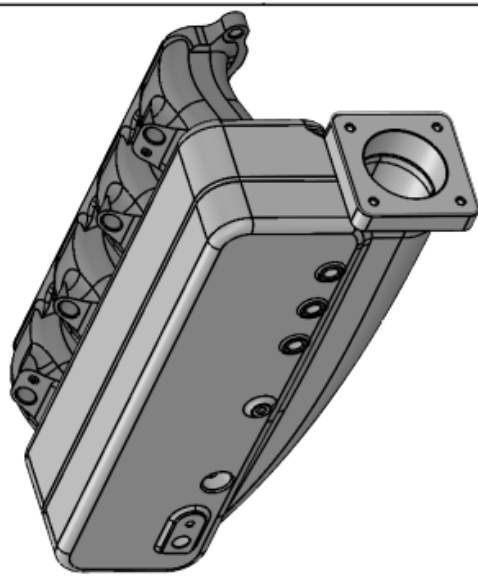
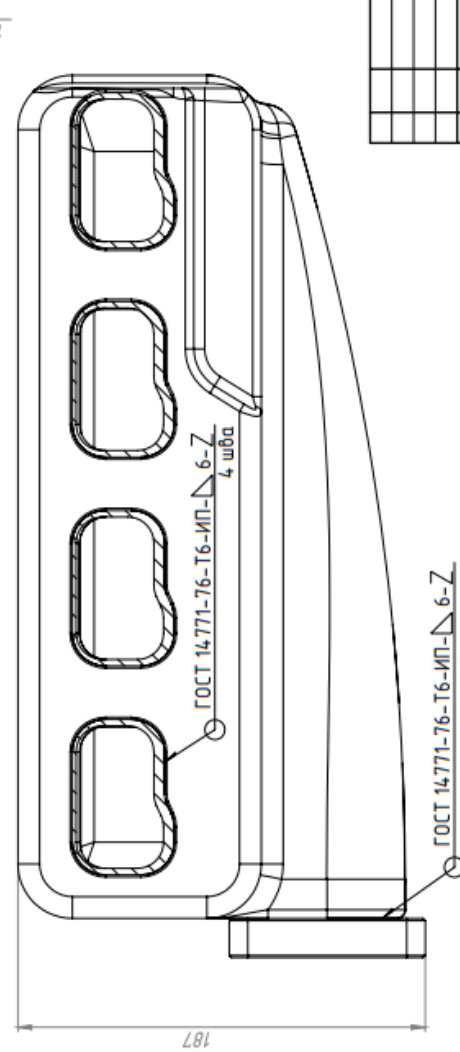
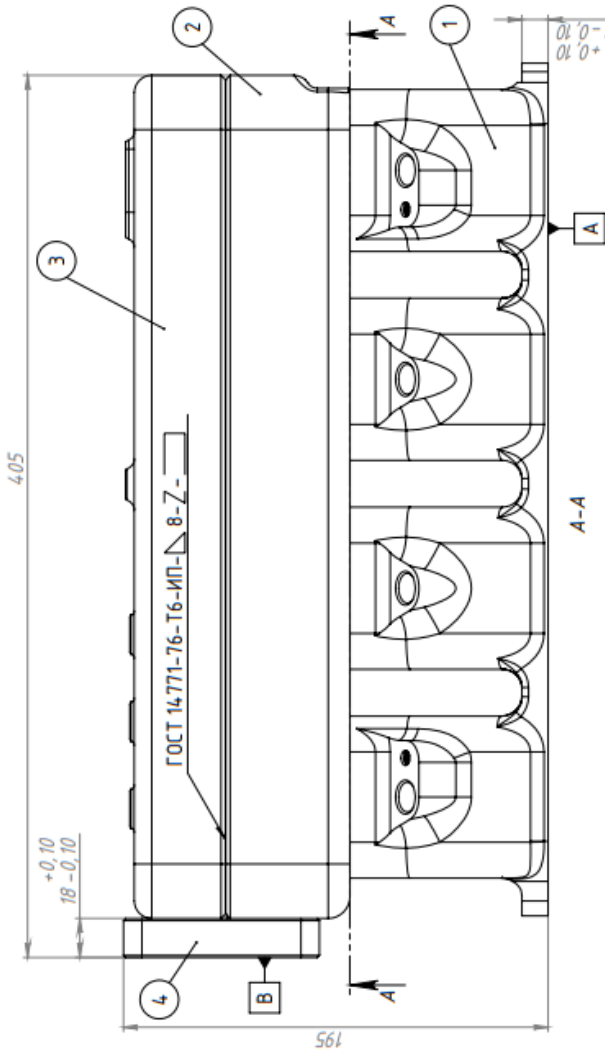
Цей документ не є підставою для фінансових розрахунків.

Директор



Ющук А.М.

Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				Детали		
A3		1	GKB.MPS.IM.01.001	Rippers MPS Intake	1	
A3		2	GKB.MPS.IM.01.002	Intake plenum part 1 MPS Intake	1	
A3		3	GKB.MPS.IM.01.003	Intake plenum part 2 MPS Intake	1	
A3		4	GKB.MPS.IM.01.004	Throttle Flange MPS Intake	1	



1. Выполнить торцевание до заданных размеров и зенковку отверстий под резьбу на плоскости "В".
2. Выполнить торцевание до заданных размеров и фрезеровку канавок на плоскости "А" (канавки брать с модели в формате STEP, приложенной к чертежу).
3. Неуказанные размеры брать с приложенной модели в формате STEP.

Мат/Лист		№ докум.	Подп.	Дата	Лит.	Масса	Масштаб	
Разраб.	Ващук						1:2	
Пров.	Ковальов							
Т. контр.					Лист 1		Листов 1	
Н. контр.								
Утв.								
<b>GKB.MPS.IM.01.01 CB</b>								
<b>MPS Intake manifold</b>								
<b>GrandKB</b>								

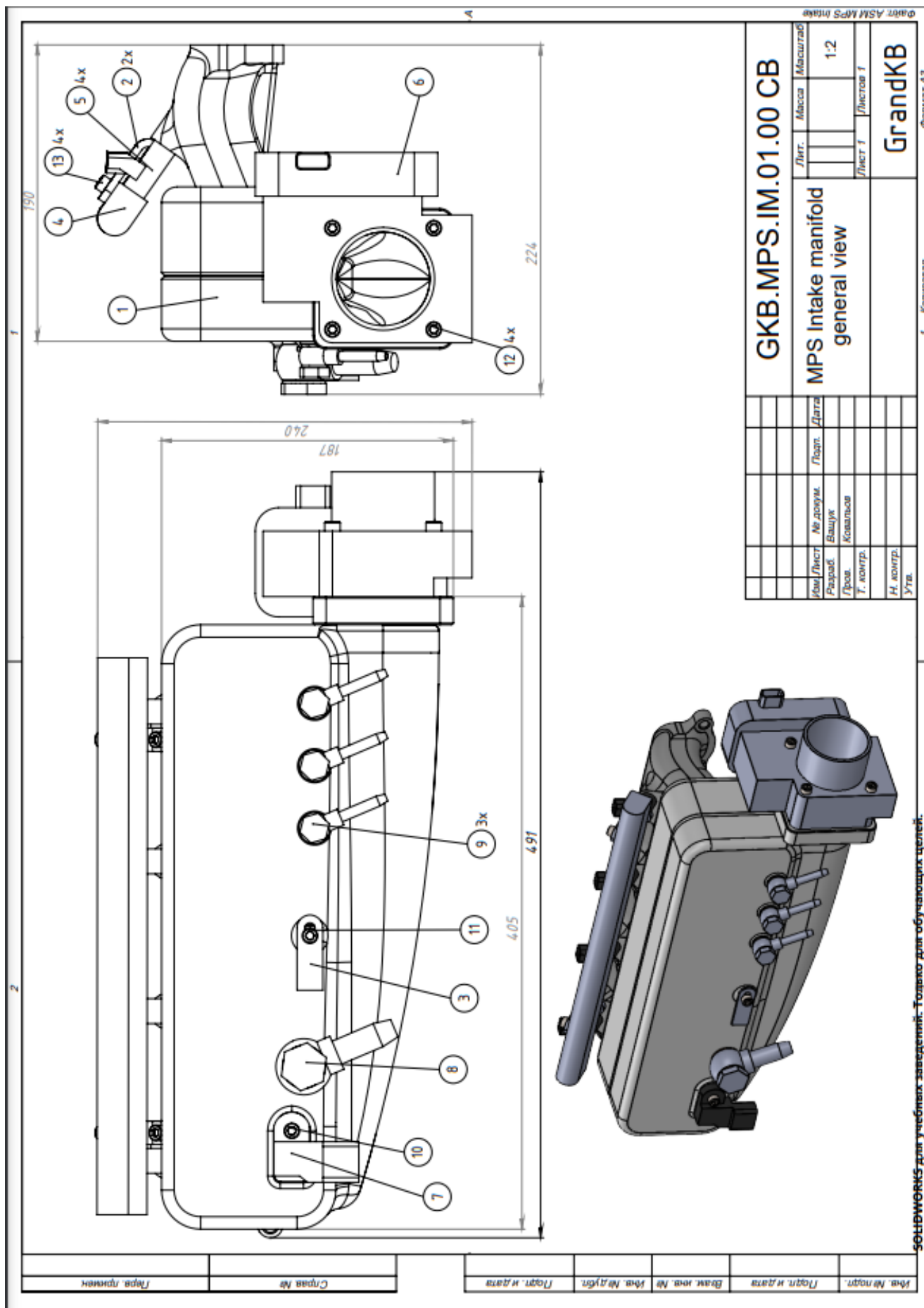
Файл: ASM MPS Intake welding

SONDWORKS для учебных заведений. Только для обучающих целей.

1 Копировал формат A3



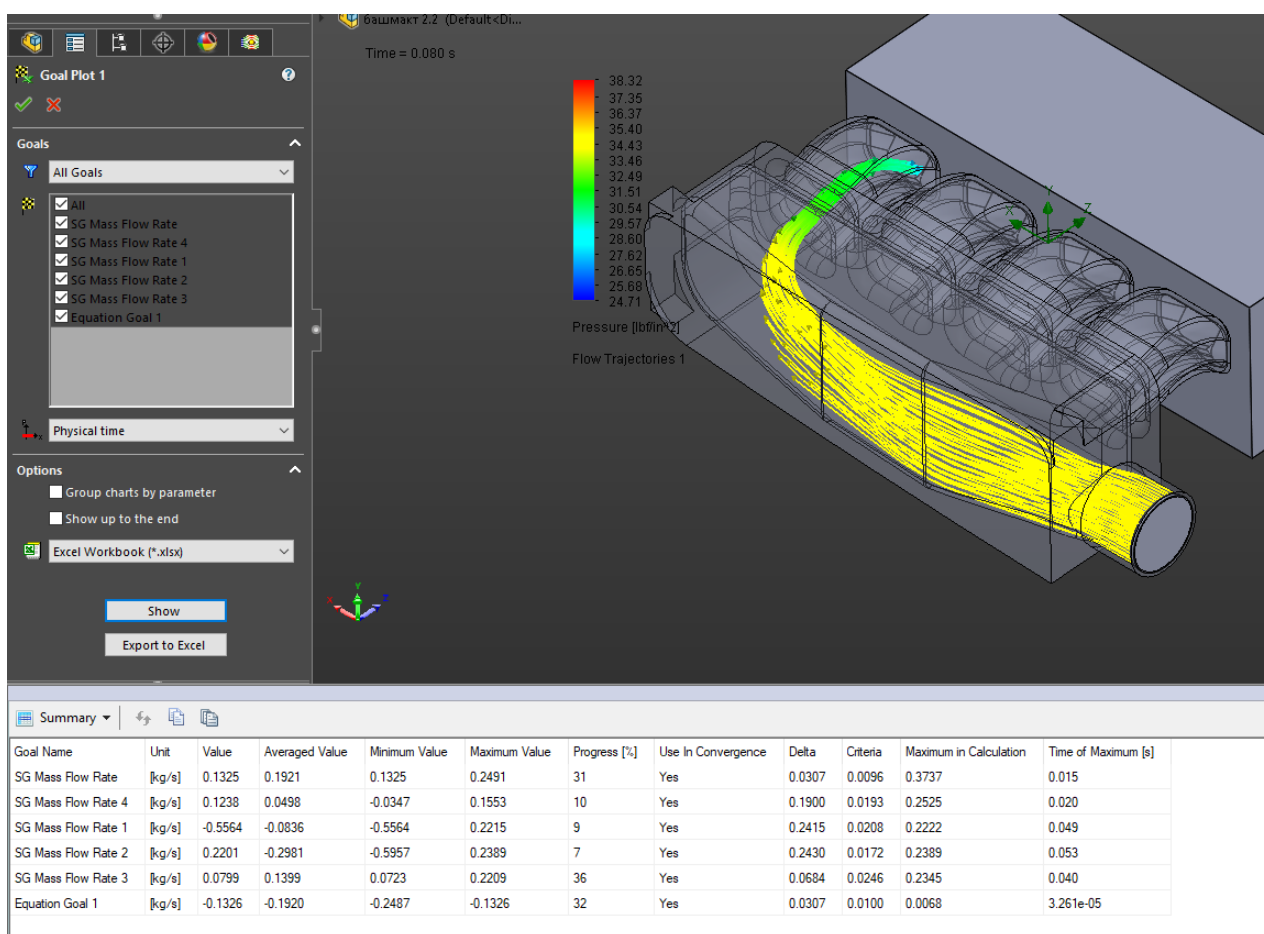
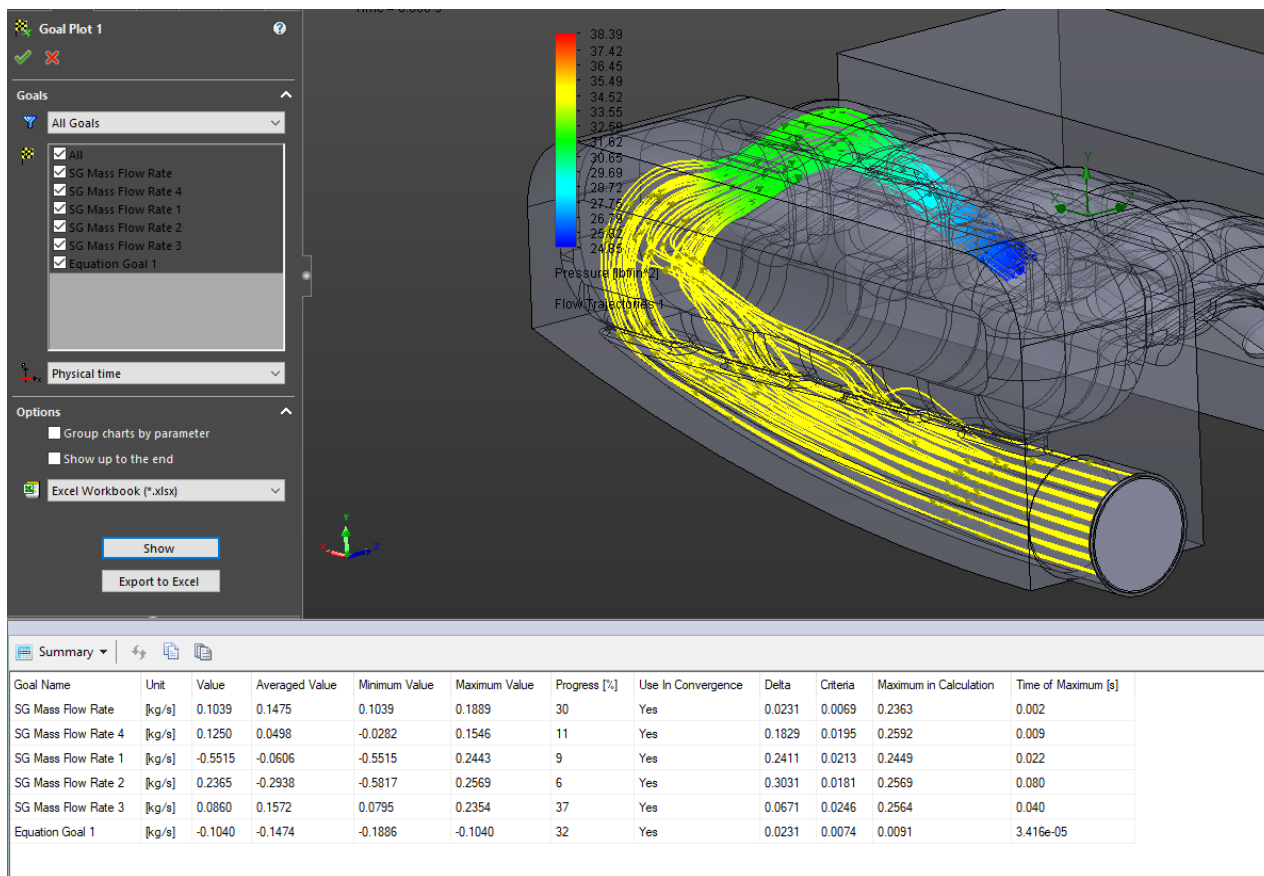
## Додаток Б. Складальне креслення вузла впускного колектора

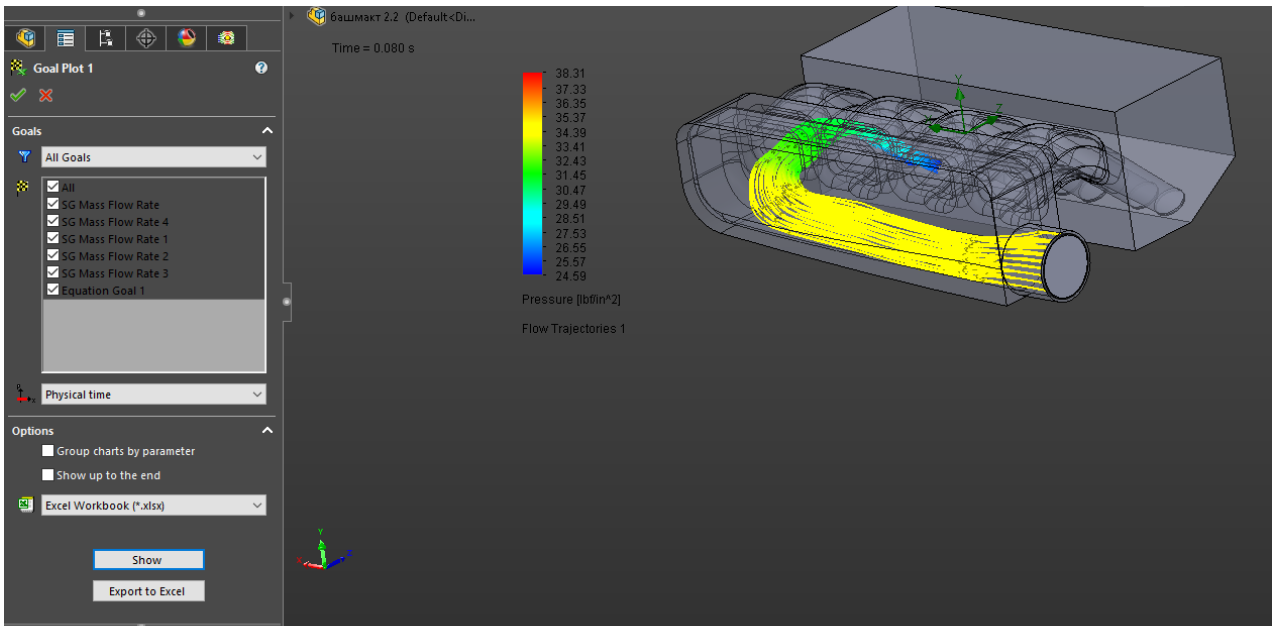


## Додаток В. Специфікація до складально креслиника

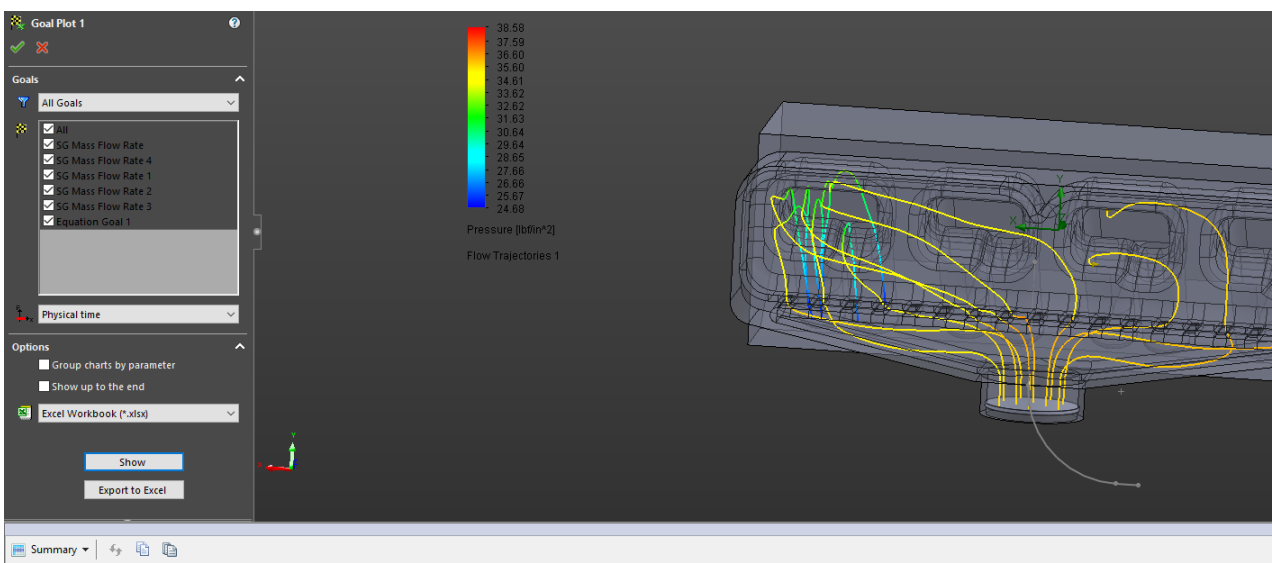
Форм.	Зона	Поз.	Обозначение	Наименование	Кол.	Примеч.
				<u>Документация</u>		
A3			GKB.MPS.IM.01.00 CB	MPS Intake manifold general view		
				<u>Сборочные единицы</u>		
A3		1	GKB.MPS.IM.01.01 CB	MPS Intake manifold	1	
				<u>Детали</u>		
stp		2	GKB.MPS.IM.01.005	Fuel rail support MPS Intake	2	
dxf		3	GKB.MPS.IM.01.006	Oil dipstick support MPS Intake	1	
				<u>Стандартные изделия</u>		
		4		Fuel rail JMF	1	
		5		Fuel injector	4	
		6		Throttle FoMoCo L35M 13 640 A	1	
		7		MAP sensor BOSCH 0 281 002 456	1	
		8		Banjo fitting M22x1.5 with 2 copper washers	1	
		9		Banjo fitting M12x1.5 2 copper washers	3	
		10		Internal hex bolt M6x15	1	
		11,13		Internal hex bolt M6x10	5	
		12		Internal hex bolt M6x55	4	
<b>GKB.MPS.IM.01.00 SP</b>						
Изм.	Лист	№ док.	Подп.	Дата		
Разраб.	Ващук				Лит.	Лист
Проб.	Ковальов					Листов
Н.контр.						1
Утв.						1
<b>MPS Intake manifold</b>						

## Додаток Г. Скріншоти симуляцій продувки колектора

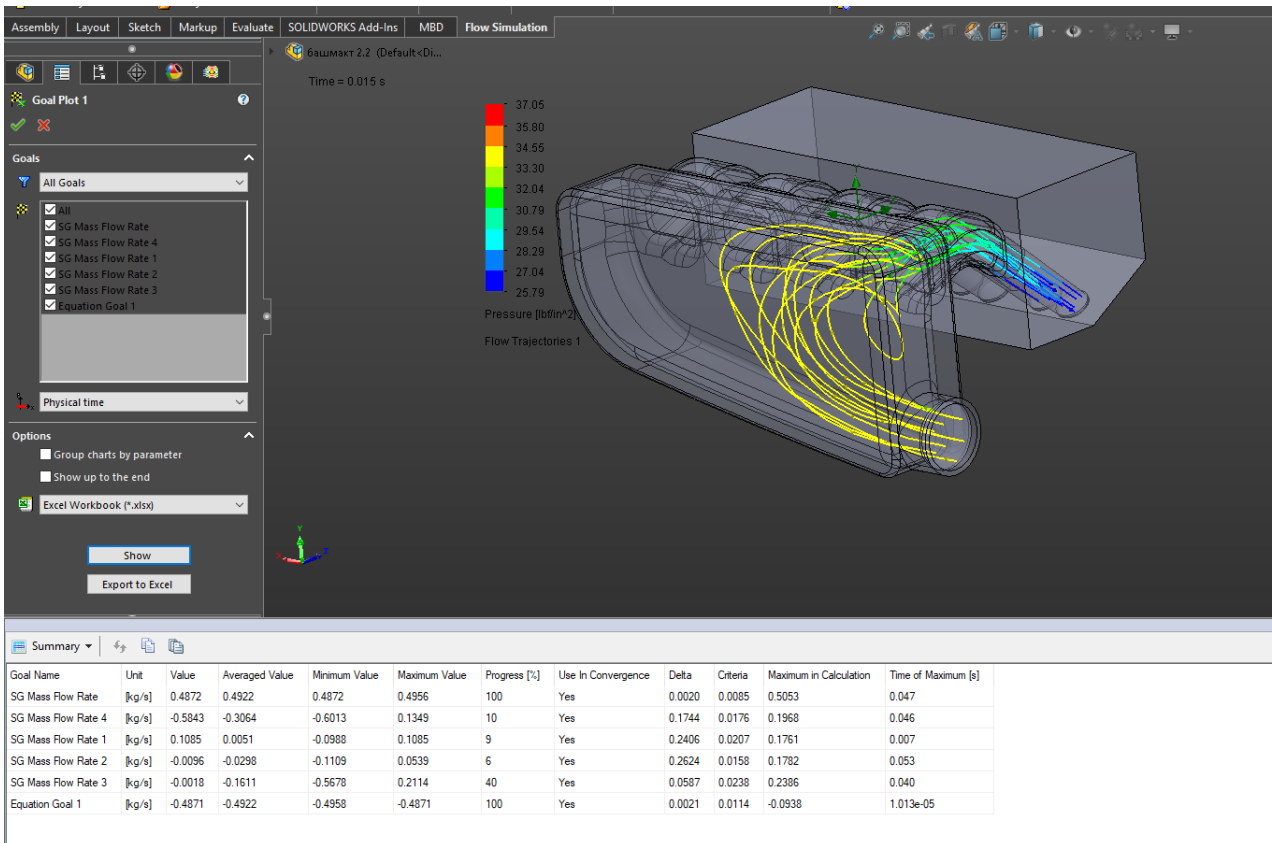
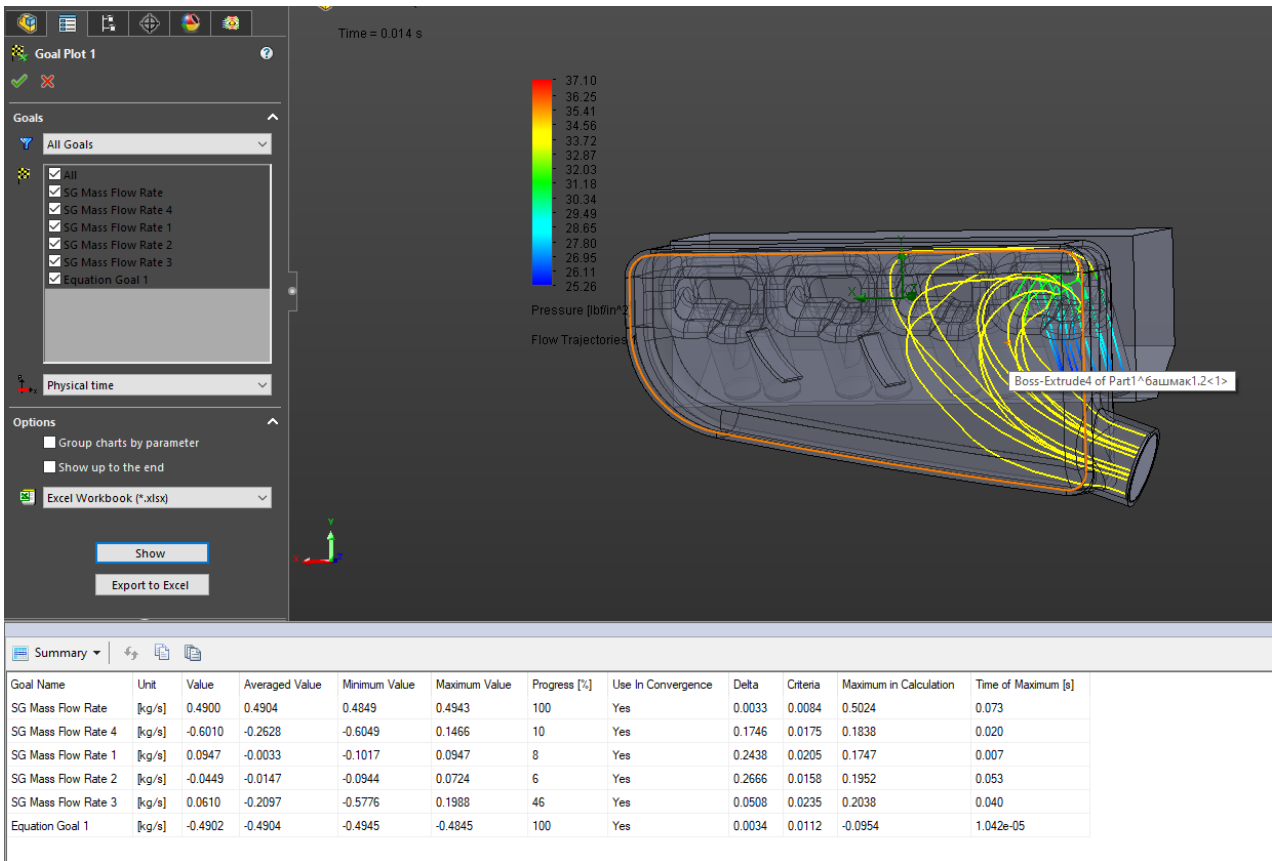




Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria	Maximum in Calculation	Time of Maximum [s]
SG Mass Flow Rate	[kg/s]	0.1133	0.1749	0.1133	0.2360	19	Yes	0.0505	0.0095	0.3966	0.015
SG Mass Flow Rate 4	[kg/s]	0.1430	0.0705	-0.0140	0.1782	10	Yes	0.1921	0.0197	0.2732	0.020
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	-0.5559	-0.0730	-0.5559	0.2265	9	Yes	0.2350	0.0203	0.2265	0.075
SG Mass Flow Rate 2	[kg/s]	0.2199	-0.3077	-0.6032	0.2368	7	Yes	0.2588	0.0174	0.2376	0.053
SG Mass Flow Rate 3	[kg/s]	0.0796	0.1353	0.0684	0.2155	35	Yes	0.0709	0.0249	0.2351	0.055
Equation Goal 1	[kg/s]	-0.1134	-0.1748	-0.2357	-0.1134	19	Yes	0.0506	0.0098	0.0049	2.388e-05



Goal Name	Unit	Value	Averaged Value	Minimum Value	Maximum Value	Progress [%]	Use In Convergence	Delta	Criteria	Maximum in Calculation	Time of Maximum [s]
SG Mass Flow Rate	[kg/s]	0.5123	0.5062	0.4997	0.5126	100	Yes	0.0009	0.0089	0.5127	0.053
SG Mass Flow Rate 4	[kg/s]	0.0124	-0.0228	-0.1018	0.0705	11	Yes	0.1724	0.0184	0.1604	0.073
SG Mass Flow Rate 1	[kg/s]	-0.6106	-0.1662	-0.6106	0.1047	10	Yes	0.2010	0.0209	0.1743	0.007
SG Mass Flow Rate 2	[kg/s]	0.1939	-0.3389	-0.6190	0.2176	6	Yes	0.2900	0.0174	0.2186	0.053
SG Mass Flow Rate 3	[kg/s]	-0.1084	0.0217	-0.1116	0.1124	69	Yes	0.0349	0.0241	0.2215	0.013
Equation Goal 1	[kg/s]	-0.5128	-0.5062	-0.5129	-0.4993	100	Yes	0.0009	0.0113	-0.1045	8.231e-06





## Додаток Д. Фотореалістичні рендери

