

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ  
ім. Ігоря Сікорського»

МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ

КАФЕДРА ЛАЗЕРНОЇ ТЕХНІКИ ТА ФІЗИКО-ТЕХНІЧНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_  
кафедри

«До захисту допущено»  
Завідувач

\_\_\_\_\_  
(підпис) (ініціали, прізвище)  
«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_р.

**МАГІСТЕРСЬКА ДИСЕРТАЦІЯ**

**Зі спеціальності:** 131.Прикладна механіка

**На тему:** Дослідження газо-порошкової суміші сформованими щілинними соплами

**Студент групи:** МЛ-61м Пижов Максим Сергійович

**Науковий керівник:** доц. Анякін Микола Іванович

*Відповідальність за плагіат усвідомлюю  
ст. \_\_\_\_\_*

Київ – 2018

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАГ ЛАЗЕРНОГО ГАЗО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ .....	9
1.1 Технології наплавлення .....	9
1.2 Особливості лазерного наплавлення .....	20
1.3 Переваги та недоліки лазерного наплавлення .....	22
1.4 Дефекти при лазерному наплавленні .....	24
1.5 Застосування лазерного наплавлення.....	25
2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ.....	26
2.1 Вплив параметрів режиму лазерного наплавлення з примусовою подачею порошку на формування наплавлених шарів.....	26
2.2 Способи подачі порошку в зону обробки. ....	29
2.3 Основні методи технології лазерного наплавлення .....	30
2.4 Метод лазерного наплавлення при подачі порошку в зону обробки одночасно з впливом лазерного випромінювання.....	33
2.5 Реалізація технологій лазерного наплавлення .....	33
2.6 Технологічні фактори, що впливають на процес лазерного наплавлення	35
2.7 Об'ємне формоутворення методом лазерного переплаву додаткового присадного матеріалу.....	35
3. МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТОКУ ГАЗО- ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ НА ВИХОДІ З СОПЕЛ ДЛЯ ПОДАЧІ ПОРОШКУ .....	38
3.1 Дослідження характеристик газодинамічних розрахунків в ANSYS.....	43
3.2 Алгоритм газодинамічного розрахунку в ANSYS.....	43
3.3 Опис газодинамічних розрахунків за допомогою формул.....	64
4. СТАРТАП-ПРОЕКТ.....	67
4.1 Опис ідеї послуги .....	69
4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї.....	71
4.3 Технологічний аудит ідеї проекту .....	72
4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту .....	74
4.5 Фактори, що сприяють ринковому впровадженню .....	75

4.6 Розроблення ринкової стратегії проекту .....	82
4.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту .....	86
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	88
СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ.....	89

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

- $v_e$  - швидкість газу на виході із сопла (м / с);
- $T$  - абсолютна температура газу на вході в сопло;
- $R$  - універсальна газова стала;
- $M$  - молярна маса газу (кг / моль);
- $k$  - показник адіабати;
- $c_p$  - питома теплоємність при постійному тиску (Дж / (моль · К));
- $c_v$  - питома теплоємність при постійному обсязі (Дж / (моль · К));
- $p_e$  - абсолютний тиск газу на виході з сопла (Па);
- $p_a$  - абсолютний тиск газу на вході в сопло (Па);
- $\rho$  - локальна густина газу (кг/м<sup>3</sup>);
- $p$  - локальний тиск газу (Па);
- $M$  - число Маха;
- $C$  - локальна швидкість звуку
- $v$  - локальна швидкість потоку (м / с);
- $A$  - площа місцевого перетину сопла (м<sup>2</sup>);
- $G_k$  - джерело за рахунок градієнта середньої швидкості;
- $G_b$  - джерело за рахунок архімедових сил;
- $S_k, S_\epsilon$  - призначені для користувача джерела.

## ВСТУП

Сучасні тенденції розвитку науки і техніки, а також кризові явища останніх років чітко показали, що до найбільш актуальних проблем промислового виробництва відноситься проблема збереження ресурсів. Одним із шляхів вирішення цієї проблеми є подовження експлуатаційного ресурсу деталей машин і механізмів. Основними підходами тут є розробка і використання нових матеріалів або обробка поверхонь існуючих матеріалів, спрямована на максимальне підвищення їхніх властивостей.

Від зносостійкості робочих поверхонь деталей різного устаткування і машин залежить термін їх експлуатації. Підвищення ресурсу деталей машин і інструментів, що працюють в умовах тертя, підвищених температур, значних динамічних і контактних навантажень, а також розробка високоефективних технологій їх виготовлення та відновлення є важливим завданням машинобудування. Одне із рішень цього завдання полягає в отриманні на робочих поверхнях деталей валків з заданими фізико-механічними властивостями методом лазерного газо-порошкового наплавлення.

Процес лазерного газо-порошкового наплавлення є ефективним методом нанесення високотехнологічних покриттів. В умовах високошвидкісного нагріву та охолодження, які притаманні висококонцентрованим джерелам енергії, можливе отримання та фіксування метастабільних структур з підвищеними фізико-механічними властивостями.

Лазерне наплавлення твердосплавних покриттів дозволяє значно збільшити ресурс будь-яких механізмів. Технологія лазерного наплавлення широко відома і застосовується в різних галузях машинобудування, зокрема при відновленні зношених деталей машин і механізмів. За допомогою лазерного наплавлення газо-порошкової суміші здійснюється пряме нанесення матеріалу, що дає можливість отримання покриттів і відновлення поверхонь зношеного обладнання машин і механізмів, а також створення прототипів деталей або цільних виробів складної просторової форми.

Високонавантажені деталі і вузли механізмів можуть набути додаткових функціональних можливостей при модифікації поверхневих шарів їх робочих поверхонь концентрованими потоками енергії. Такі шари мають істотні переваги в порівнянні з шарами, отриманими традиційними методами поверхневого зміцнення і наплавлення.

У разі ремонтних робіт на стару деталь може бути наплавлений приблизно такий же метал, з якого вона виготовлена. При цьому будуть відновлені цілісність і форма виробу. Але доцільніше наносити інший сплав, який дозволить отримати виріб з поверхнею, що відрізняється від матеріалу основи своїми властивостями. Залежно від умов експлуатації обладнання, це можуть бути висока ерозійна, кавітаційна, корозійна, зносостійкість, жаростійкість та інші. У разі обробки нових деталей наплавлення дозволяє значно заощадити на матеріалі, так як відпадає необхідність виготовлення виробу цілком з дорогого сплаву. Також у всіх випадках використання цієї технології значно подовжується термін служби оброблених вузлів і деталей.

При лазерному наплавленні в якості джерела тепла використовується лазері достатньої потужності. При цьому на поверхню за допомогою розплавлення і одночасного нанесення наплавляється практично будь-який матеріал.

Методи лазерного наплавлення газо-порошкової суміші постійно розвиваються і прогресують паралельно з розвитком нових видів лазерних джерел. У сучасному машинобудівному виробництві підвищення ресурсу роботи деталей і вузлів тертя стало найважливішою задачею.

Мета і завдання дослідження.

Метою досліджень є визначення характеристики витікання газо-порошкової суміші із сформованих щілинних сопел з різними розмірами між каналного ребра.

Необхідно було вирішити такі основні завдання для досягнення поставленої мети:

1. Аналіз сучасного стану і тенденцій розвитку використання газо-порошкової суміші для лазерного наплавлення;
2. Дослідження фізичних процесів при лазерному наплавленні газо-порошкової суміші щілинними соплами;
3. Дослідження фізико-металургійних особливостей процесів наплавлення і модифікування поверхонь металевих виробів з використанням лазерного випромінювання та газо-порошкової суміші;
4. Дослідження технологічних процесів наплавлення поверхонь металевих виробів з використанням лазерного випромінювання та газо-порошкової суміші.
5. Побудова узагальненої практичної методики визначення параметрів потоку газо-порошкової суміші;
6. Розробка моделі витікання потоку газо-порошкової суміші для визначення основних характеристик впливу суміші на заготовки прямокутної та циліндричної форми;
7. Виконання теоретичних досліджень процесів, які відбуваються під час витікання газо-порошкової суміші із щілинних сопел.

Об'єкт дослідження

На основі теоретичної частини та математичної моделі досліджувались умови формування наплавлених покриттів під дією лазерного випромінювання з одночасним додаванням газо-порошкової суміші щілинними соплами. Об'єктами досліджень у даній роботі є процес витікання газо-порошкової суміші при подачі щілинними соплами.

Методи дослідження.

Параметри і характеристики, що застосовуються в моделі витікання газо-порошкової суміші, базуються на законах, що визначаються газодинамічними та фізичними процесами. Обробка результатів досліджень, моделювання процесу витікання газо-порошкової суміші виконувались із застосуванням програм MicrosoftExcel 2007, ANSYS Fluent Software: CFD Simulation 19, OriginPro 2018.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в тому, що нами були отримані комплексні дані впливу форми щілинного сопла на швидкість газо-порошкової суміші.

Наукове значення роботи

Суттєвим доповненням до існуючих знань з питань лазерного наплавлення матеріалів під дією лазерного випромінювання та газо-порошкової суміші, є наступні положення:

- Модель процесу витікання порошкових матеріалів через щілинні сопла на заготовку з врахуванням залежності газодинамічних характеристик;

- Вплив форми щілинного сопла на структуру газо-порошкової суміші та швидкість потоку, а також зв'язок форми сопла на розподіл швидкості по поперечному перерізі струменю;

- Технологічні основи процесу витікання газо-порошкового матеріалу сформованими щілинними соплами.

Практичне значення одержаних результатів полягає у наступному:

- Розроблено моделювання лазерного наплавлення газо-порошкових матеріалів за допомогою щілинних сопел для отримання високоякісних покриттів;

- Отримані критичні та оптимальні параметри витікання газо-порошкової суміші із сформованих щілинних сопел.

## РОЗДІЛ 1

### 1. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕВАГ ЛАЗЕРНОГО ГАЗО-ПОРОШКОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ

#### 1.1 Технології наплавлення

Говорити про методи наплавлення можна багато, так як різновид їх дуже великий. Перерахуємо методи з короткими характеристиками, щоб мати загальне уявлення.

##### - Дугова

Дуже поширений спосіб завдяки своїй універсальності. Спочатку розплавляється основний метал, а потім змішується з електродним. При такому напавленні внутрішні властивості непередбачувані, хімічний склад не однорідний, а тому можливе тільки поверхнєве або як його ще називають - косметичне відновлення поверхні.

Даний вид наплавлення вважається найпоширенішим. Подібне наплавлення має відмінні результати в промислових обсягах і в домашніх умовах. Цей спосіб дуже зручний і простий, а головне - не потрібно купувати спеціальне обладнання.

Дугове наплавлення під флюсом вимагає застосування різних видів дроту і інших присадок які виступають в якості електроду. Флюсом при напавленні називають речовину, яка завдяки своїм властивостям допомагає послабити окислення повітрям, поліпшити горіння дуги, надає необхідні якості напавленому шару і впливає на однорідність шва. Варіантів діаметра електроду досить багато, в залежності від того, як він повинен використовуватися. Єдина вимога до нього це відсутність будь-якого покриття. Це необхідно для того, щоб налагодити вплив дуги і газового мішура, який утворюється між оброблюваною поверхнею і флюсом.

Якщо говорити про полярності, то також треба відзначити, що для більшої ефективності "плюс" надходить на дротяний електрод, а "мінус" - на

поверхню, яка обробляється. Чому ж робота з дуговим наплавленням під флюсом набула такого широкого поширення, в чому переваги, і які є недоліки?

Перш за все, про переваги:

1. Процес наплавлення не дуже складний, що дозволяє спеціалістам з будь-якою кваліфікацією в найкоротші терміни покрити деталь шаром;
2. Безпечна робота через затримку флюсом бризків неохолодженого металу;
3. Через відсутність повітря виходить практично рівна і гладка поверхня.

Недоліки:

1. Зменшення міцності металевого виробу, через внесення зміни в матеріал мало не на молекулярному рівні;
2. Застосовується переважно на великих деталях, які не мають складної конфігурації також можливі деформації через велику область розігріву;
3. Висока вартість обладнання через додаткове пристосування, що забезпечує подачу флюсу.



Рисунок 1.1. – Дугове наплавлення під флюсом [1]

При електродуговому наплавленні треба правильно підібрати електрод, щоб він зміг сформувати наплавлений шар з необхідними параметрами. Від форми деталі і товщини деталі, яку треба обробити залежить зріз електроду, а

конкретний його тип вибирається в залежності від складу матеріалу, який наплавляється. Вироби із сталі в більшості випадків відновлюють нижнім положенням електрода і струмом зворотної полярності. При цьому треба підготувати основний матеріал, очистивши його поверхню від іржі, залишків масла та інших забруднень.

Відновлення деталей з низьколегованих і низьковуглецевих сталей здійснюють як правило без їх нагрівання. А деталі з інших марок сталі часто попередньо підігрівають, а пізніше знімають з них внутрішні напруження, проведенням їх термічної обробки. Як правило 300° С – це температура попереднього підігріву. Наплавлювальні валки можуть по-різному розташовуватися. При обробці циліндричних виробів, використовуються три основні схеми:

- валки по гвинтовій лінії;
- валки по колах замкнутого типу;
- валки вздовж твірної.

Перша схема є оптимальною у випадках, коли наплавлення ведеться механізовано.

При роботі з плоскими поверхнями використовують дві поширені схеми, які передбачають застосування:

- широких валків (рух електрода в поперечному напрямку);
- вузьких валків (вони перекривають один одного приблизно на третину своєї ширини).

Відновлення конструкцій, що працюють при високих навантаженнях, вимірювальних та різальних пристроїв має здійснюватися твердими сплавами, а не звичайним металом. У таких сплавах зазвичай містяться сполуки нікелю, кобальту, бору, заліза, а також вуглецю з хромом, танталом, титаном, марганцем. Якщо такі вироби мають великий показник зносу, то виконують попереднє наплавлення перед основним, використовуючи зварні електроди, зі сталі з невеликим вмістом вуглецю.

Дугове наплавлення в захисних газах використовується в тих випадках, коли неможливо подати флюс. Перевагами цього наплавлення є візуальне спостереження за процесом і можливість його автоматизації з використанням серійного зварювального устаткування і широкої механізації. Цей спосіб використовують при напавленні деталей в різних просторових положеннях, з різними внутрішніми поверхнями, з різною глибиною отворів, а також дрібних деталей складних форм. Технологія здійснення наплавлення в захисних газах дуже схожа до технології наплавлення під флюсом, відмінність полягає в тому, що використовують газовий захист зони зварювання замість флюсового. Це звільняє спеціаліста від необхідності засипки флюсу і видалення шлаку. Наплавлення в захисному газі проводиться найкоротшою дугою з метою зменшення розбризкування металу. Щоб уникнути жолоблення деталей наплавлення здійснюють окремими ділянками плоских поверхонь. Циліндричні деталі можуть наплавлятися по гвинтовій лінії безперервним валком і з поперечними коливаннями електрода: короткі ділянки можуть наплавляти поздовжніми валками уздовж осі циліндричної деталі, але тут може виникнути деформація, яку в процесі наплавлення слід виправляти. Для цього наплавлення кожного наступного валка має здійснюватися з протилежного боку по відношенню до раніше напавленого. При напавленні внутрішніх конічних і циліндричних поверхонь використовують повздовжні спеціальні мундштуки. Наплавлення може проводитися в вуглекислому газі, аргоні, гелії і азоті. Сплави на алюмінієвій і магнієвій основі наплавляються в аргоні або гелії. Наплавлення міді і деяких її сплавів може здійснюватися в азоті, який веде себе по відношенню до неї нейтрально. При напавленні вуглецевих і легованих сталей використовують менш дорогий вуглекислий газ. Наплавлення може проводитися електродами які розплавлюються і також які не розплавлюються. Вольфрамові електроди, які не розплавлюються зазвичай застосовують при напавленні в аргоні і гелії. Великого поширення набуло наплавлення в вуглекислому газі електродом,

що розплавлюється при постійному струмі зворотної полярності. З огляду на, те що вуглекислий газ окисляє розплавлений метал, то в дріт, який наплавляється можна вводити різні розкислювачі (марганець, кремній та інші). В основному при наплавленні застосовують дріт суцільного перетину і порошковий дріт. Для наплавлення деталей з низьколегованих сталей і вуглецевих з метою відновлення їх розмірів використовують зварювальні дроти суцільного перетину Св-08ГС, Св-08Г2С, Св-12ГС, а також наплавні Нп-40, Нп-50, Нп-30ХГСА та інші.

Недолік в тому, що в процесі наплавлення у вуглекислому газі сильно розбризкується рідкий метал, що приводить до налипання бризок на мундштук і забивання сопла пальника. До того ж, можливість здування газового струменя природними чинниками такими як вітер ускладнює наплавлення на відкритому повітрі.

Наплавлення за допомогою порошкового дроту з внутрішнім захистом засноване на введенні в сердечник дроту крім шлакоутворюючих і газоутворюючих матеріалів також легуючих компонентів. При наплавленні таким дротом не потрібне використання флюсового і газового захисту. Легуючі елементи порошкового дроту переходять в шов, а газоутворюючі і шлакоутворюючі матеріали створюють захист металу від азоту і кисню. Тонка плівка розплавленого шлаку у дузі покриває краплі рідкого металу і ізолює їх від повітря. Розкладання газоутворюючих матеріалів створює потік захисного газу. Тонка шлакова кірка утворюється після затвердіння на поверхні наплавленого валка. При наплавленні використовують різні самозахисні порошкові дроти. Наплавлення низьковуглецевих шарів здійснюють за допомогою зварювальних дротів типу ПП-Ан-3 та інших. Для отримання шарів з необхідними характеристиками застосовують спеціальні дроти. Наприклад, для наплавлення деталей, що працюють при підвищених температурах і високому тиску, використовують порошковий дріт ПП-3ХВ3Ф-О, наплавлення деталей, що піддаються інтенсивному абразивному зносу, здійснюють самозахисним порошковим дротом ПП-У15Х12М-О

(буква О в позначенні марки порошкового дроту означає, що даний порошковий дріт призначений для наплавлення відкритою дугою). Технологія виконання наплавлення самозахисним порошковим дротом в основному нічим не відрізняється від технології наплавлення у вуглекислому газі. Відкрита дуга дає можливість точно направляти електрод, а також спостерігати за процесом формування шару, який наплавляється, що має велике значення при наплавленні деталей складної форми. Одною з переваг цього способу є застосування менш складної апаратури в порівнянні з апаратурою, яка застосовується при наплавленні під флюсом і захисному газі. Цей спосіб також дає можливість виконувати наплавлювальні роботи на відкритому повітрі, збільшувати продуктивність в порівнянні з наплавленням під флюсом і в захисних газах, зниження собівартості наплавляемого матеріалу.

Для оплавлення основного і присадного матеріалу при електрошлаковому наплавленні служить шлакова ванна, яка розігрівається струмом. В цьому способі наплавлення, як правило, використовується примусове формування шару, який наплавляється. Сутність цього процесу полягає в тому, що на поверхні виробу, що охолоджується водою, створюється ванна розплавленого шлаку, в яку подається електродний дріт .

Струм, який проходить через електрод і виріб, нагріває шлакову ванну до температури вище  $2000^{\circ}\text{C}$ , в результаті чого електродний і основний метали розплавлюються, утворюючи металеву ванну, при затвердінні якої формується наплавлений шар.

Для здійснення електрошлакового наплавлення різних поверхонь необхідна достатньо глибока шлакова ванна, найлегше отримання якої при вертикальному або похилому розташуванні деталей. У порівнянні з дуговим наплавленням це не дуже універсальний спосіб, але він більш ефективний в тих випадках, коли на деталь необхідно наплавити шар металу великої товщини (понад 14 - 16 мм). Завдяки застосуванню великої сили струму, а

також електродів великого перерізу можна досягти високої продуктивності - до 150 кг наплавленого металу на годину.

Вібродуговий спосіб наплавлення зазвичай використовується для наплавлення деталей тіл обертання діаметром від 8 - 10 мм і більше. Сутність цього процесу наплавлення полягає в тому, що основний і електродний метал нагрівається до розплавлення теплом, яке виділяється в результаті виникнення періодично повторюваних електричних розрядів, тобто переривчасто палаючої електричної дуги. Наплавлений шар утворюється в процесі кристалізації розплавленого основного і електродного металу. Мала тривалість і уривчастість горіння електричної дуги обумовлена вібраціями електродного дроту, які створюються за допомогою електромагнітних або механічних вібраторів. В процесі вібрацій спостерігаються короткі замикання внаслідок доторкання електродного дроту до виробу на якому відбувається наплавлення, а під час відриву дроту виникає високий струм і спалахує електрична дуга. В якості присадного матеріалу використовують наплавлювальні дроти, які можуть мати зворотно-поступальні переміщення поперек зварювальної ванни, а також електродні стрічки, пластини або електроди великого перерізу, іноді і труби, які використовують для наплавлення циліндричних поверхонь. Тривалість горіння дуги складає 0,002 - 0,003 с. Наплавлювальна установка складається з вібродугової головки, апаратури управління, пристрою обертання, джерела струму. Під час наплавлення виконуються наступні рухи: обертання деталі на яку наплавляється матеріал, поступальний рух вібродугової головки уздовж поздовжньої осі цієї ж деталі, подача дроту в зону дуги і вібрація дроту. Живлення здійснюється від випрямлячів, зварювальних генераторів, а також від низьковольтних трансформаторів з вторинною напругою 12 - 16 В і більше. Більш високі показники досягаються при наплавленні на постійному струмі зворотної полярності. З метою захисту розплавленого металу від взаємодії з навколишнім середовищем наплавлення ведеться в захисних газах, а також під шаром флюсу. Також застосовуються водні розчини

кальцинованої соди, суміші кальцинованої соди, мила і гліцерину, емульсії гліцерину.

Уривчастість процесу дозволяє отримувати зону термічного впливу малої ширини, тому наплавлені деталі мають дуже малі деформації, що особливо важливо при наплавленні складних виробів, виготовлених з високою точністю. Вібродугове наплавлення ефективне, якщо необхідно наплавляти шари металу невеликої товщини.

Недоліками вібродугового наплавлення є порівняно низький коефіцієнт наплавлення і невисока продуктивність наплавлення. [2]

- Плазмова

Здійснюється двома способами: дугою або струменем газової плазми. Плазмове наплавлення дугою має високу продуктивність, так як розплавляє метали за допомогою високої температури, створеної електричним розрядом. Плазмове наплавлення струменем газової плазми не має високотемпературного режиму, що призводить до невеликої деформації поверхні, що оброблюється.

При плазмовому наплавленні тепловим джерелом є високотемпературна стисла дуга, що отримується в спеціальних пальниках. Поширене застосування мають плазмові пальники з дугою прямої дії, що горить між вольфрамовим електродом що не плавиться і наплавляються виробом. Також використовують пальники комбінованих видів, в яких від одного електрода одночасно горять дві дуги - прямої і непрямої дії.

Присадним матеріалом при цьому способі наплавлення є дріт, металева стрічка, порошок та ін. Практичний інтерес представляє перш за все наплавлення з присадкою дрібнозернистого порошку. В такому випадку використовується плазмовий пальник комбінованого виду. За допомогою транспортуємого газу порошок подається з живильника в пальник і потім вдувається в дугу. В дузі більшість порошку встигає розплавитися, так що на наплавляемому поверхню потрапляють вже крапельки рідкого присадного матеріала. [3]

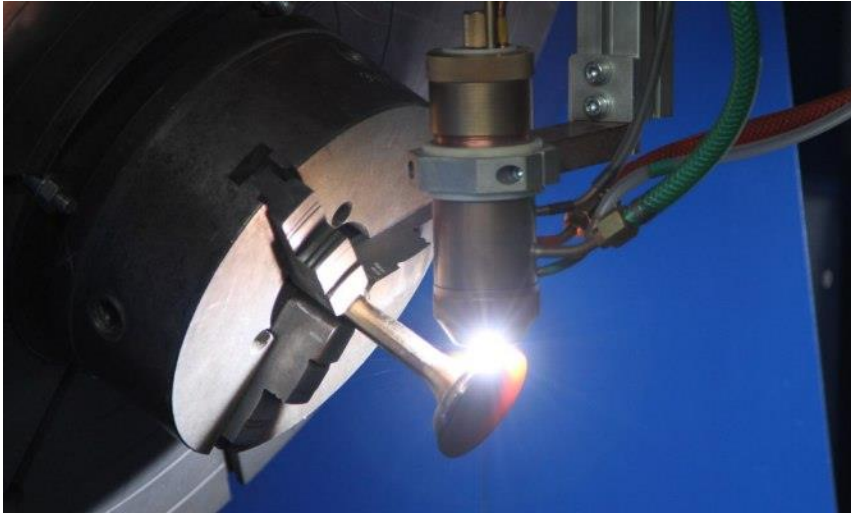


Рисунок 1.2. Плазмове нанесення металевго шару на поверхню деталі [4]

Аргон, азот, вуглекислий газ, суміші аргону з гелієм або азотом використовуються при плазмовому наплавленні як захисні гази. Вибір захисного газу залежить від ступеня його впливу на наплавляємий і основний метали. Також аргон, гелій, вуглекислий газ, повітря можуть використовуватися, як плазмоутворюючі гази. Для забезпечення стабільного протікання процесу наплавлення треба застосовувати електроди, які не плавляться з матеріалу, який витримує нагрівання до високих температур. Таким вимогам найкраще підлягають електроди з чистого вольфраму або з присадками діоксиду торія, оксидів лантану і ітрію. Переваги цього виду наплавлення є невелика глибина проплавлення основного матеріалу, а також можливість наплавлення тонких шарів, висока якість і гладка поверхня наплавленого матеріалу.

Також плазмовий нагрів може використовуватися і для напилення поверхневих шарів. Цей процес відрізняється від наплавлення рядом особливостей. Напилення - це процес нанесення металевго шару з частинок напилюваного матеріалу, які нагріті до температур плавлення на неоплавлену поверхню деталі, яку обробляють. Присадний матеріал при напиленні використовується у вигляді дроту або порошку, що подається в стислу дугу, де він нагрівається струменем газового потоку і з великою швидкістю подається на поверхню виробу. Товщина напиленого шару може змінюватися

від сотих до десятих часток міліметра. Напилення товстих шарів часто не здійснюється в зв'язку з тим, що товсті шари відшаровуються від поверхні деталі. Напилення можна здійснювати металами, сплавами, і різного виду сполуками - оксидами, карбідами, нітридами. [2]

- Газова

Особливість цієї технології наплавлення - використання або порошкового дроту, або дроту з суцільним перерізом. Можна змінювати температуру полум'я, забезпечуючи різну товщину шару покриття. Витрачається багато енергії, спрямованої на прогрів оброблюваної поверхні, що може призвести до деформації.

- Електронно-променеве

Здійснюється в спеціальній вакуумній камері, з використанням електронного променя, інтенсивність якого можна змінювати. За рахунок відсутності повітря абсолютно виключається окислення і вигорання. Також дуже дорогий і витратний спосіб, до того ж володіє малим коефіцієнтом корисної дії.

- Лазерна

Досить ефективний спосіб наплавлення, що дозволяє робити тонкий і досить-таки міцний шар на оброблювану поверхню. Проте він досить дорогий: потрібне особливо недешеве обладнання і кваліфіковані фахівці. Це метод нанесення матеріалу за допомогою лазерного променя, що використовується для створення ванни розплаву, куди подається матеріал. В якості присадки можуть використовуватися як порошки, так і дріт. [5]

Одним з важливих моментів в технології наплавлення є спосіб подачі наплавляемого матеріалу на підкладку. Вивчення лазерних способів зварювання і наплавлення показало, що в той час як в процесах з подачею дроту обробка здійснюється в основному практично в будь-якому просторовому положенні, перевага порошкових матеріалів полягає в більш ефективному поглинанні лазерного випромінювання. Наплавлення в нижньому положенні можна виконувати шляхом попереднього розподілу по

оброблюваній поверхні порошку. Застосування порошкових матеріалів в інших просторових положеннях зазвичай вимагає нанесення покриттів за допомогою плазмового напилення. Якщо порошок можна розподілити по поверхні оброблювального виробу попередньо, то його подають спеціальними дозаторами в процесі наплавлення. На сьогодні широкого поширення набула лазерне наплавлення з використанням присадних порошкових матеріалів, які подаються безпосередньо в зону дії лазерного випромінювання за допомогою спеціальних сопел різних конструкцій. До переваг лазерного наплавлення відносять можливість нанесення наплавлених шарів із заданими властивостями, значне ослаблення ефекту перерозподілу компонентів з матеріалу основи в наплавлений шар, що сприяє підвищенню точності прогнозування результатів і максимальному наближенню властивостей наплавленого шару до властивостей матеріалу, який наплавляється, отримання рівноосних дрібнокристалічних (високодисперсних) структур наплавленого металу, мінімізація припуску під фінішну механічну обробку становить приблизно до 0,3 ... 0,5 мм на сторону за рахунок малій (до 200 ... 300 мкм) шорсткості наплавленої поверхні.

До недоліків лазерного напилення в першу чергу відносять необхідність попередньої струменевої-абразивної підготовки напиляємої поверхні і досягнення значно меншої в порівнянні з лазерною наплавленням міцності зчеплення нанесених шарів з підкладкою. Сьогодні способом лазерного напилення отримують тонкі покриття з аморфною і кристалічною мікроструктурою, що мають шорсткість, яка практично збігається з шорсткістю напиляємої поверхні. Іншим перспективним напрямком розвитку цього способу є нанесення керамічних покриттів, зокрема, лазерне напилення оксиду алюмінію. При цьому покриття можна наносити на підшар, наприклад, з нікелевих сплавів. Ще одним аспектом застосування лазерного наплавлення є прецизійний синтез тривимірних виробів. За допомогою робота можна отримувати практично будь-які тривимірні вироби з порошків металів, кераміки або полімерів. Процеси синтезу беруть свій початок від

лазерного селективного спікання. Одним з найбільш перспективних сучасних напрямків є DMD (direct metal deposition) технологія, яка застосовується найчастіше для виготовлення штампів і прес-форм. В ході процесу DMD лазерний пучок фокусується на металевій заготовці - тривимірної прес-форми або на пошкодженій металевій деталі, де створює зону розплавленого металу. Тонкий струмінь металевого порошку впорскується за допомогою транспортуючого газу в зону розплаву. Суцільнометалева деталь створюється пошарово в результаті переміщення лазерного випромінювання і струменя порошку під управлінням комп'ютера по тривимірної CAD (computer aided design) моделі. [6]

## 1.2 Особливості лазерного наплавлення

Лазерне наплавлення полягає в нанесенні на поверхню оброблюваної деталі покриття шляхом розплаву основи і газо-порошкової суміші. Оскільки, основа підправляється мінімально, властивості покриття головним чином залежить від властивостей газо-порошкової суміші.

Нагадаємо, що даний час розроблені і широко використовуються в промисловості різні традиційні способи наплавлення матеріалу: електродугова, плазмова, лазерна, газова, електроконтактна і т.д.

До процесу наплавлення пред'являють такі вимоги:

1. Забезпечення міцного і надійного зчеплення основного і додаткового матеріалу.
2. Виключення утворення пор і тріщин.
3. Зниження залишкових напружень і деформацій.
4. Зменшення змішування метала основи з матеріалом, який наплавляється.
5. Забезпечення проведення наплавлення з мінімальною глибиною проплавлення основи.

6. Збільшення коефіцієнта використання матеріала наплавлення.

7. Зниження ціни процесу.

8. Підвищення продуктивності і комфортності труда.

Основними недоліками традиційних способів наплавлення є:

1. Погіршення властивостей наплавленого матеріала через перемішування з основним;

2. Деформація виробу, завдяки високим погонним енергіям;

3. Утворення тріщин в шарі який наплавляється;

4. Обмеження поєднання складів основного і матеріала, який наплавляється;

5. Труднощі при здійсненні наплавлення малих поверхонь і деталей складної форми.

Порівняно з традиційними способами лазерне наплавлення має ряд переваг. Висока концентрація енергії в плямі нагріву створює можливість проведення процесу при підвищених швидкостях обробки. Це в свою чергу обумовлює:

- Формування наплавленого шару з малим коефіцієнтом перемішування (0,05...0,15) в результаті незначного підплавлення основи;

- Мінімальна термічна дія на основний метал, що особливо важливо для матеріалів, які зазнають структурні і фазові перетворення;

- Малі залишкові деформації наплавлених деталей;

- Можливість наплавлення малих поверхонь порівнянних з діаметром плями нагріву у випадку застосування імпульсних і імпульсно-періодичних лазерів;

- Підвищення властивостей наплавлених шарів.

Лазерний промінь має переваги перед іншими джерелами нагріву:

- Дозуюча енергія;

- Можливість локальної обробки поверхні;

- Відсутність термічних поводок, мінімізація зони термічного впливу;
- Можливість обробки деталей великих габаритів завдяки високій продуктивності наплавлення;
- Швидке нагрівання та охолодження наплавляється;
- Утворена ультрадисперсна структура покриття ефективно протистоїть процесам корозії і ерозії;
- Можливість обробки на потрібну глибину;
- Мінімальне перемішування основного та матеріалу, який наплавляється.

Лазерне наплавлення застосовується в разі, якщо зона термічного впливу повинна бути мінімальною. Крім того, лазерне наплавлення може використовуватися для обробки особливо схильних до зносу деталей з великими габаритами. У деяких випадках проводиться обробка складних або локальних поверхонь.

Лазерне наплавлення може використовуватися в разі, якщо твердість наплавляемого шару повинна знаходитися в межах 70 HRC. Таким чином оброблюються стабілізатори буріння нафтових свердловин.

### 1.3 Переваги та недоліки лазерного наплавлення

Лазерна наплавлення металевих порошкових матеріалів – сучасна технологія, в якій розплавляють основний метал на невелику глибину з допомогою лазерного променя і осаджують на його поверхню шар наплавлювального матеріалу зі специфічними властивостями. Лазерне наплавлення дозволяє наносити шар будь-якого матеріалу або суміші різних матеріалів з широким діапазоном змінних параметрів процесу для отримання заданих функціональних властивостей. Технологія нанесення металу за допомогою лазерного наплавлення дає можливість отримати покриття з високою якістю поверхні при мінімальному часу простою обладнання. Навіть

незначні пошкодження або звичайний знос складних і дорогих деталей пов'язані з великими витратами - пошкоджені деталі часто вимагають повної заміни. Тому відновлення в даному випадку є доцільним. Можливість використання багатьох матеріалів при лазерному наплавленні уможливорює оптимальну підготовку поверхні до виконання відповідної функції, наприклад, для захисту від зносу і корозії.

Аддитивне виробництво деталей або функціональних елементів все ширше використовується в галузі промислового виробництва. В області великогабаритних деталей, наприклад, елементів турбін, установка функціональних елементів за допомогою лазерного наплавлення можна значно знизити витрати на виробництво.

Також перевагою лазерного наплавлення є незначний нагрів в зоні наплавлення - деформація не виходить за межі вузьких допусків, а структура перевершує вимоги, що пред'являються до оригінальних деталей.

Лазерне наплавлення металів має ряд переваг в порівнянні зі звичайними способами, такими, як дугове зварювання. Технологія нанесення металу за допомогою лазерного наплавлення дає можливість отримати набагато кращі покриття з високою якістю поверхні при мінімальному часі простою обладнання.

Цей метод має такі переваги:

1. Зменшення часу підготовки виробництва;
2. Зниження впливу температури на структуру матеріалу;
3. Можливість відновлення пошкоджених ділянок робочих виробів;
4. Виробництво інструментів типу «смарт-структур»;
5. Контрольоване мале проплавлення;
6. Можливість створення тонких наплавлених шарів (до 0,3 мм);
7. Високоміцне зчеплення з основою;
8. Мінімізація області термічного впливу - деформація оброблюваних деталей майже відсутня;

9. Можливість роботи з важкодоступними поверхнями і локальної обробки;

10. Швидке нагрівання та охолодження при наплавленні;

11. Можливість обробки виробів з великими габаритами;

12. Мінімальне змішування наплавлююмого і основного матеріалу. [7]

Основні недоліки лазерного наплавлення

До недоліків лазерного наплавлення можна віднести: наявність поперечних холодних мікротріщин в наплавлених шарах, виникнення яких є наслідком релаксації високих внутрішніх напружень розтягу. Можливість утворення як внутрішніх, так і зовнішніх пор, пов'язана з неметалевими включеннями і залишковою вологістю наплавленого порошку, а також забрудненням поверхні на яку наплавляється. Відносно дорожнечу процесу, пов'язану з порівняно високою собівартістю лазерного обладнання.

Також до недоліків можна віднести:

1. Низький ККД;
2. Мала продуктивність;
3. Необхідність в дорогому, складному обладнанні. [6]

#### 1.4 Дефекти при лазерному наплавленні

При лазерному наплавленні в шарі, якій наплавляється можуть виникнути такі дефекти: кристалізаційні тріщини, відшарування, заниження по висоті, вириви, спучування і тріщини після механічної обробки.

Одна з причин, що стримує впровадження процесу лазерного наплавлення, полягає в утворенні тріщин в наплавлених шарах. Цей вид дефектів є одним з найпоширеніших. В результаті утворення тріщин в покриттях втомна міцність деталей знижується більш ніж в 10-20 разів, що може стати причиною передчасного руйнування та виходу виробу з ладу.

При безперервному режимі лазерного наплавлення в шарах утворюються поперечні тріщини, які знаходяться один від одного по довжині наплавлення на відстані 0,8 мм і більше.

Також в шарі поряд з поперечними тріщинами утворюються і поздовжні тріщини.

### 1.5 Застосування лазерного наплавлення

Нове і основне застосування лазерного наплавлення матеріалів – це технології аддитивного виробництва і швидкого виготовлення інструментів для прискореного виготовлення складних деталей і інструменту. Технології адитивного виробництва є відносно новими і дозволяють виготовляти вироби безпосередньо за даними CAD-програм, без використання традиційних інструментів. Складні авіаційні деталі, які не можна виготовити традиційним способом, можуть виготовлятися з дуже коротким циклом виробництва. Також ці технології дозволяють не тільки скоротити час виробництва, але і зробити деталь з необхідною макроструктурою і мікроструктурою. Це важливо як при виробництві самих авіаційних деталей, так і при виготовленні оснащення для авіаційного виробництва.

## РОЗДІЛ 2

### 2. ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ ЛАЗЕРНОГО НАПЛАВЛЕННЯ

2.1 Вплив параметрів режиму лазерного наплавлення з примусовою подачею порошку на формування наплавлених шарів.

Параметрами режиму, що впливають на формування наплавлених шарів при лазерному наплавленні з примусовою подачею газо-порошкової суміші, є:

1. Потужність лазерного випромінювання;
2. Швидкість наплавлення;
3. Величина розфокусування;
4. Масова витрата порошку;
5. Відстань, з якого вводять порошок;
6. Кут введення порошку;
7. Напрямок подачі порошку слідом або назустріч по відношенню до напрямку руху виробу;
8. Відстань від центру лазерного променя до центру подачі порошку.

Розглянемо їх більш детально.

Підвищення потужності випромінювання при постійних значеннях інших параметрів призводить до збільшення ширини і висоти шару. При цьому також спостерігається тенденція до зростання коефіцієнта змішування.

Зі збільшенням швидкості обробки час опромінення одиниці поверхні і питома погонна енергія зменшуються. Крім того зменшуються відносна витрата порошку, ширина і висота шару. В цьому випадку також є тенденція до підвищення коефіцієнта перемішування.

В процесі зростання величини розфокусування - густина потужності випромінювання знижується, внаслідок чого кількість використовуваного порошку зменшується. При цьому висота шару зменшується, а ширина

спочатку зростає, а потім знову зменшується. Коефіцієнт перемішування при цьому знижується.

При підвищенні масової витрати порошку ширина і висота шару безперервно збільшуються, а коефіцієнт перемішування зменшується. Це обумовлено зростанням щільності потоку частинок і зниженням прямого впливу лазерного променя безпосередньо на основний матеріал.

Зі збільшенням відстані від зрізу сопла до зони обробки (дистанція нанесення) площа порошкової плями збільшується, в той же час щільність потоку частинок знижується. В результаті цього ширина шару збільшується, а їх висота зменшується. Коефіцієнт перемішування при цьому значно зростає.

Вплив кута введення порошку на розміри наплавленого валка визначається впливом порошкового струменя і кількістю потрапляючого порошку в ванну розплаву. При зміні кута подачі до  $30 \dots 45^\circ$  основне значення має вплив струменя. З підвищенням його динамічного тиску на рідку ванну висота шару збільшується. У разі подальшого зростання кута введення починає давати про себе знати зменшення кількості порошку, що надходить у ванну, висота шару при цьому зменшується. Ширина шару при збільшенні кута також трохи зменшується, а коефіцієнт перемішування помітно зростає.

При лазерному наплавленні порошок може подаватися слідом і назустріч руху виробу. У разі подачі порошку слідом досягається задовільний наплавлений шар. В даному випадку під дією тиску порошкового струменя рідкий метал притискається до закристалізованої частини вже наплавленого шару. Процес формування стає стабільним. Коливання геометричних розмірів шару по довжині наплавленого шару незначні.

При подачі порошку назустріч руху зразка формування валків відбувається інакше. Порошковий струмінь діє на розплавлений метал в напрямку, протилежному напрямку руху формування шару, в результаті чого

рідкий метал розтікається по поверхні основи. Збільшення площі рідкого металу призводить до зростання числа частинок порошку, що потрапляють в розплав. При цьому розміри шару в порівнянні з відповідним значенням при подачі порошку слідом за рухом основи збільшуються, разом з тим нерівномірність його розмірів також підвищується. При використанні даного способу спостерігається мінімальне підплавлення основи, так як наявність рідкого прошарку ускладнює вплив лазерного променя на основний метал. У зв'язку з цим коефіцієнт перемішування зменшується в порівнянні зі значенням цього параметра в першому способі подачі порошку і практично наближається до нуля.

У всіх випадках, коли центр потоку порошку поєднується з центром лазерного променя, через потрапляння частинок на ще не закристалізований, але вже вийшовший із під променя наплавлювальний метал, поверхня валків стає шорсткою. Зменшити шорсткість можна повторним опроміненням валка без подачі порошку.

При наплавленні тіл обертання порошок рекомендують подавати зі зміщенням відстані "а" по відношенню до осі обертання.

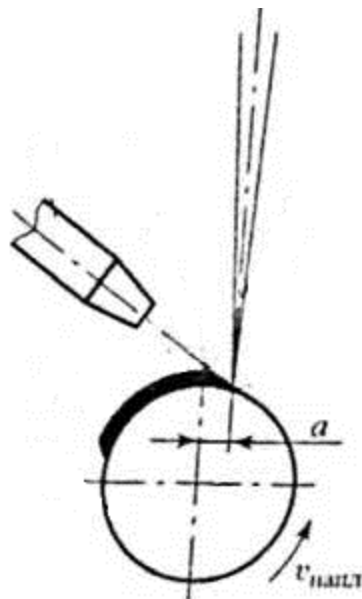


Рисунок 2.1. - Схема процесу наплавлення тіл обертання [8]

## 2.2 Способи подачі порошку в зону обробки.

Є два способи подачі порошкового присадного матеріалу:

- Газовим потоком;
- Під дією гравітаційних сил.

Найбільш ефективним і розвиваючим в даний час є процес безпосереднього транспортування порошкового матеріалу в зону наплавлення за допомогою газового потоку. Використання інертних газів одночасно з подачею порошку дозволяє забезпечити захист розплавленої ванни від окислення. Для подачі порошку застосовують спеціальні пристрої - дозатори. Наплавлювальні порошки завантажують в ємність, транспортуючий газ подають у спеціальний пристрій, який називається інжектором, в якому переріз прохідного каналу зменшується по довжині. При проходженні газу через інжектор його швидкість змінюється, так як його витрата залишається постійною. Ця газо-порошкова суміш подається в область дії лазерного променя.

Недоліками цього способу є:

- 1) Малий коефіцієнт використання порошку;
- 2) Динамічний вплив газового струменя на рідку ванну;
- 3) Нестійкість подачі порошку при його малих витратах;
- 4) Необхідність підігріву газової суміші, а також видалення з неї вологи.

Використання подачі порошкового присадного матеріалу під дією гравітаційних сил є найпростішим з відомих способів. Однак в разі застосування дуже дрібного порошку (діаметр - менше 0,04 мм) під дією молекулярних сил можливе утворення конгломератів з декількох частинок, що може порушити рівномірність подачі. Щоб уникнути цього використовують спеціальні пристрої, наприклад механічні, електромагнітні або пневматичні вібратори і т. д. Це дозволяє забезпечити високу стабільність подачі порошку при його малих витратах.

### 2.3 Основні методи технології лазерного наплавлення

Точність лазерного випромінювання гарантує утворення повністю щільного наплавленого шару з дуже низьким рівнем змішування основного і наплавленого металу, а також забезпечує відмінне металургійне зчеплення. Можливе нанесення декількох захисних шарів, що підвищує стійкість до механізмів руйнування.

Існує три основні методи створення покриттів за допомогою лазера:

Опалювання порошків у вигляді пасти, яку попередньо наносять на поверхню деталі. Вміст суміші підбирають таким, щоб вона практично не впливала на склад створюваного покриття. Пасту розплавляють лазером, послідовно проходячи променем всю поверхню. Для отримання багат шарового покриття порошковий склад наносять знову після чергового циклу обробки деталі. Переваги цього способу полягають в простоті технології та конструкції необхідного обладнання. До головних недоліків відносять високу трудомісткість і нерівномірність покриття, обумовлену поверхневим натягом розплавленого рідкого металу.

Некоаксіальне наплавлення здійснюють за допомогою подачі газопорошкової суміші збоку від сопла лазера (до недавнього часу був найбільш поширеним способом). Ця технологія лазерного наплавлення якісно покращує процес отримання шару з потрібними характеристиками. Коли впорскування порошку відбувається в рідку ванну, то це дозволяє створювати не тільки рівномірні за хімічним складом і товщиною покриття, але також композитні матеріали, у яких зберігається зміцнююча фаза. Газопорошковий струмінь подають збоку відносно напрямку променя або назустріч йому. Формуючі при цьому валки при цьому будуть відрізнятися геометрією поверхні. Недолік способу - несиметрична щодо напрямку лазерного променя подача порошку навіть при створенні плакуючого шару скануванням випромінювання в площині.

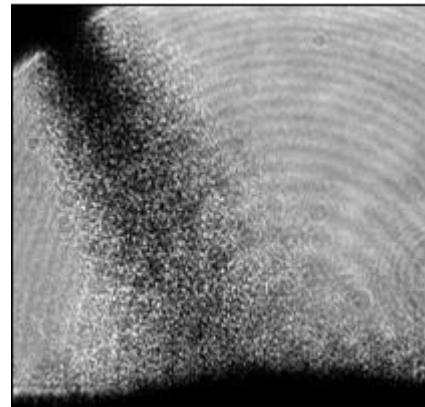
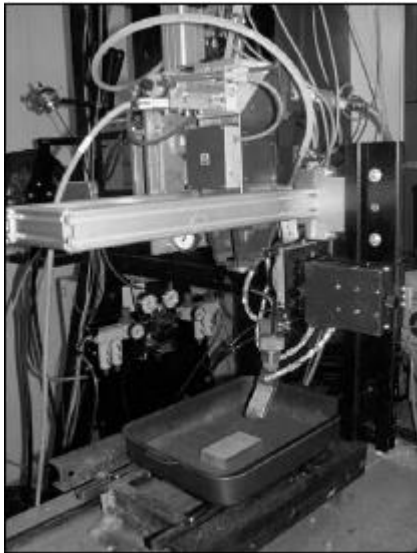


Рисунок 2.2. Лазерне порошкове наплавлення некоаксіальною подачею порошку [4]

Багатоструменева подача з декількох трубок є розвиненим методом некоаксіальної (бічної) подачі. Ця подача забезпечує симетрію подачі порошку відносно напрямку руху. Зазвичай в конструкціях використовують 4 трубки, розташованих осісиметрично. На виході з трубок частинки порошку мають швидкість більш вищу, ніж при інших способах подачі. Це спрощує обробку великогабаритних деталей без їх переміщення в просторі. Недоліком схеми є порівняно низька ефективність використання порошкових матеріалів відносно коаксіальної схеми подачі порошку.

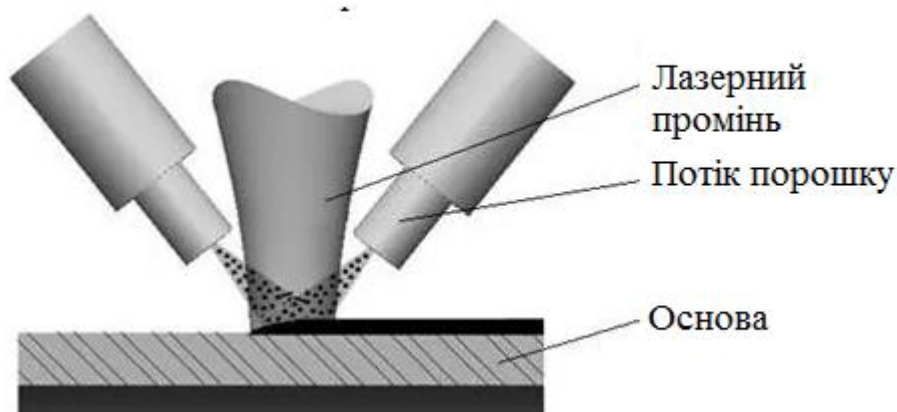


Рисунок 2.3. Схема наплавлення з багатострунною подачею порошкових матеріалів [9]

Коаксіальне наплавлення газо-порошкової суміші подається в область впливу лазерного променя через сопло з усіх боків симетрично. Формування такої рівномірної симетричної подачі - головна складність цієї технології. Коаксіальне наплавлення - самий універсальний метод отримання не тільки однорідних, але і композитних покриттів як на плоских, так і на тривимірних поверхнях. Даний процес забезпечує симетричну подачу щодо напрямку наплавлення, рівномірне формування валків, а також високу продуктивність, ефективність і високий коефіцієнт використання витратного присадного матеріалу. Головний недолік - складність здійснення коаксіальної подачі.

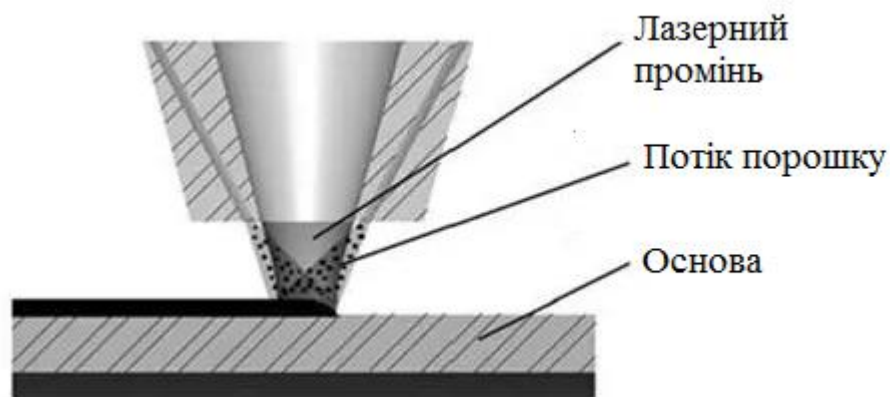


Рисунок 2.4. Схема наплавлення з коаксіальною подачею порошкових матеріалів [10]

При створенні композиційних покриттів все більше застосовується процес лазерного коаксіального газопорошкового наплавлення. Розподіл частинок порошку в газопорошковому потоці є важливим параметром, що впливає як на продуктивність процесу, так і на його якість. Створення композиційної структури покриття з порошкового матеріалу досить утруднене в зв'язку з різною щільністю і формою частинок компонентів. При постійних витратах газу і порошку розподіл є стаціонарним і залежить від багатьох факторів: розміру частинок, їх форми, щільності їх матеріалу, з якого вони складаються. Наприклад, частинки сферичної форми приймають швидкість газу і переносяться в ламінарному потоці. Частинки неправильної форми переміщуються більш розрізнено, потік порошку таких частинок

нестационарний. В результаті наплавлення покриттів такими матеріалами розподіл елементів в кінцевому валку може виявитися нерівномірним.

Якість наплавлення лазером залежить від дуже багатьох параметрів, але головним є витрата порошку. Задавши необхідний діаметр променя, потужність лазера, швидкість наплавлення, масову витрату твердосплавного складу - можна регулювати товщину покриття, що наноситься, розрідження і твердість. [11]

#### 2.4 Метод лазерного наплавлення при подачі порошку в зону обробки одночасно з впливом лазерного випромінювання.

Найбільш ефективним є застосування примусової подачі порошку безпосередньо в розплавлену ванну матеріалу основи. Формування покриття в цьому випадку відрізняється від методу при якому порошок наноситься перед початком дії лазера при переплавленні попередньо нанесеного шлікерного шару. Основна відмінність полягає в тому, що нагрівання частинки починається при попаданні її в промінь і закінчується на основному матеріалі. Оціночні розрахунки показують, що час, необхідний для нагрівання частинки до температури плавлення, менше часу її знаходження в промені. Таким чином, частинки які, залишилися після проведення процесу наплавлення можуть бути використані повторно.

#### 2.5 Реалізація технологій лазерного наплавлення

Для реалізації технологій лазерного наплавлення використовуються потужні твердотільні, газові лазери. Лазерне наплавлення часто застосовується для обробки невеликих деталей або локальних ділянок великогабаритних виробів в гірничовидобувній, аерокосмічній, енергомашинобудівній та інших галузях промисловості. Використання волоконних, дискових і діодних лазерів потужністю понад 10 кВт дозволяє

дуже сильно підвищити продуктивність процесу лазерного наплавлення, що є основною умовою для використання лазерної технології при обробці великогабаритних виробів. Використання існуючих технологій лазерного наплавлення для отримання покриттів великої площі обмежено їх низькою ефективністю. Кінцеві властивості покриттів і промислова придатність лазерних технологій визначається не тільки рівнем потужності лазерного випромінювання, але і характеристиками додаткового обладнання: сопел, пристроїв подачі матеріалу, систем фокусування і формування лазерного променя.

Основною причиною переходу від традиційних технологій отримання покриттів до лазерної є більш висока якість одержання покриттів, яке обумовлене низьким коефіцієнтом перемішування наплавлювального матеріалу з матеріалом основи при більш високих адгезійних властивостях. Але для нанесення покриттів великої площі в основному використовуються традиційні методи наплавлення й напилювання, що забезпечують високу продуктивність процесу і відповідно, більш високу економічну ефективність. Отримання функціональних покриттів великої площі актуально для широкого спектра галузей в важкій промисловості (суднобудування, енергетика, нафтогазова промисловість і гірничодобувна галузь, металооброблювальна, паперова та інші). На сьогоднішній день існують приклади промислового використання CO<sub>2</sub>-лазера потужністю до 20 кВт при ремонті трубних панелей бойлерів електрогенераторів і масивних поршневих штоків для гірничовидобувної індустрії. CO<sub>2</sub>-лазери довгий час були єдиними лазерами, здатними забезпечити такий високий рівень потужності. Однак для CO<sub>2</sub> лазерів характерні низькі ККД і ефективність обробки, високі експлуатаційні витрати, що значно знижує гнучкість технологічного процесу. Останнім часом на ринку з'явилися промислові зразки потужних твердотільних (дискових) і волоконних лазерів потужністю відповідно до 16 і 30 кВт. Ці лазери мають такі переваги над CO<sub>2</sub>-лазерами:

1. Високим ККД;
2. Високим коефіцієнтом поглинання лазерного випромінювання металами;
3. Можливістю транспортування випромінювання через оптичне волокно;
4. Низькими експлуатаційними витратами.

Очевидно, що використання ще більш нових типів лазерів дозволить підвищити продуктивність процесу наплавлення і зробити лазерні технології більш ефективними.

## 2.6 Технологічні фактори, що впливають на процес лазерного наплавлення

- Якість лазерного випромінювання;
- Потужність лазера;
- Методи нанесення лазерного випромінювання;
- Тип та якість газу;
- Транспортування тиску;
- Характеристики захисного газу;
- Композиція та розмір порошку;
- Якість порошку;
- Способи нанесення порошку.

## 2.7 Об'ємне формоутворення методом лазерного переплаву додаткового присадного матеріалу.

В даний час увагу стали приділяти одній з нових технологій, яка використовується для зниження вартості та скорочення термінів виготовлення нових виробів - об'ємному формоутворення шляхом лазерного переплаву додаткового присадного матеріалу. Цей процес є конкурентом не тільки процесів швидкого прототипування, які він нагадує за принципом

роботи (матеріал обробляється за допомогою керованого комп'ютером лазера), але і традиційної механоерозійної і електроерозійної обробки.

Цей процес розроблений на основі лазерного наплавлення з подачею присадного порошку в зону впливу лазерного променя. Його використання дає можливість отримувати просторові фігури шляхом послідовного нанесення шарів по складним криволінійним траєкторіям при мінімальному термічному впливі на основний метал. Побудова об'єкта здійснюється пошарово, що дозволяє виробляти виготовлення деталей з різних матеріалів, наприклад алюмінієві корпусу дроселів, форми для інжекційного лиття, лопатки турбін і т. д. За допомогою цього методу можна виготовляти як нові деталі, так і формувати на поверхні виробу об'ємні елементи, наприклад при ремонті. Широкий вибір присадок дозволяє отримувати деталі, що мають високі механічні і довговічні властивості. Цей процес вкрай привабливий для ремонту найважливіших деталей в авіабудуванні.

Як і в лазерному наплавленні, відомо два основних способи формування виробу методом об'ємного лазерного формоутворення:

- Попереднє розташування присадочних матеріалів на оброблювану поверхню;
- Подача порошку в зону обробки одночасно з дією лазерного випромінювання.

В першому випадку порошок розподіляють тонким шаром на поверхню об'єкта який виготовляється. Промінь лазера фокусують на робочій поверхні і сканують поверхню шару, при цьому утворюється поперечний розріз виробу. Після отримання рисунку шару який складається із закристалізованого порошку, наверх його насипають слідуючий шар і так далі.

Іншим варіантом є безпосереднє впорскуванням присадного матеріалу, з якого формується виготовлювальний виріб, в зону дії лазерного променя. Відмінність процесу полягає в одночасному нанесенні і оплавленні порошку, що здійснюється пошарово по заданому для кожного шару контуру.

Технологія призначена для автоматизованого виробництва тривимірних об'єктів шляхом лазерного плавлення металевого порошку. Результатом лазерного об'ємного формоутворення є деталь. Цю технологію рекомендують для виробів і деталей машин, коли через конструктивні зміни потрібне додавання істотного обсягу металу. За допомогою даного процесу можна вирішувати такі завдання.

1. Зміцнення найважливіших елементів оснащення.
2. Виготовлення металевих прототипів за даними 3D CAD.
3. Ремонт зношених або пошкоджених формотворчих поверхонь.
4. Вирощування металевих елементів складної конфігурації при виготовленні або ремонті оснастки.
5. Виготовлення гібридної біметалічної оснастки.

Оскільки нерозплавлений металевий порошок використовують повторно, процес можна вважати безвідходним. [8]

## РОЗДІЛ 3

### 3. МОДЕЛЮВАННЯ РОЗПОВСЮДЖЕННЯ ПОТОКУ ГАЗО-ПОРОШКОВОЇ СУМІШІ НА ВИХОДІ З СОПЕЛ ДЛЯ ПОДАЧІ ПОРОШКУ

Робота з моделювання витікання газо-порошкової суміші із щілинних сопел була проведена в ANSYS Fluent Software: CFD Simulation, Microsoft Excel, OriginPro.

Ansys Workbench – це універсальна платформа для моделювання, що об'єднує всі інструменти інженерного моделювання компанії ANSYS. Адаптивна архітектура дозволяє користувачу виконувати будь-які дії, від стандартного аналізу течії рідини чи газу, до обробки складних взаємодіючих систем.

Ця проста у використанні платформа забезпечує доступ до двобічної параметричної CAD інтеграції, потужним інструментам для побудови сітки, автоматизованого механізму оновлення на стадії проектування, управління багатодисциплінарним моделюванням і вбудованим інструментом оптимізації.

В результаті цих взаємозв'язків ANSYS CFD забезпечує наступні переваги та можливості:

- швидко підготувати геометрію для аналізу потоку без стомлюючого доопрацювання;
- уникати дублювання вихідних даних, які є загальними для всього потоку рідини;
- легко розрахувати кілька варіантів геометрії, сітки, фізики процесу і автоматично отримати нові результати моделювання для цієї серії розрахунків;
- покращувати якості розроблюваного виробу (процесу) за рахунок чіткого розуміння процесів, що відбуваються з подальшим коректним проектуванням;

Це середовище забезпечує унікальну інтеграцію з CAD системами в процесі проектування.

В середовище ANSYS Workbench входить кілька різних додатків (деякі з них):

- Mechanical - використовується для виконання структурного і теплового аналізу з використанням вирішення ANSYS. Накладення сітки на область розрахунку також включено в Mechanical.
- Fluid Flow (CFX) - додаток для виконання аналізу з використанням CFD CFX.
- Fluid Flow (FLUENT) - додаток для виконання аналізу з використанням CFD FLUENT.
- DesignModeler (геометрія) - призначений для створення і редагування CAD геометрії і підготовки твердотілої моделі для використання в подальших розрахунках.
- Engineering Data - призначений для визначення властивостей матеріалу.
- Meshing Application - призначений для генерації області розрахунку CFD і генерування сітки.
- Design Exploration - призначений для проведення проектних досліджень і оптимізації аналізу.
- Finite Element Modeler (FE Modeler) додаток призначений для адаптації сітки, отриманої в NASTRAN і ABAQUS, для використання в ANSYS.

Основні елементи блоків інженерного аналізу.

Основні елементи інженерного аналізу ANSYS, дозволяє проводити інженерні аналізи різних видів, і всі вони представлені в вікні інструментів Toolbox, такі як:

- Static Structural - статичний міцний аналіз;
- Transient Structural - нестационарний міцний аналіз;
- Steady - State Thermal - стаціонарний тепловий аналіз;
- Transient Thermal - нестационарний тепловий аналіз;
- Harmonic Response - гармонійний аналіз;

- Linear Buckling - аналіз стійкості;
- Explicit Dynamics - твердотілий динамічний аналіз найменування;

Основними елементами інженерного аналізу ANSYS, є створення:

- геометрії.
- генерації сітки (визначення геометрії області дослідження);
- створення областей потоків рідин або газів, твердих областей і задання імен граничним областям, установка параметрів сітки).

Етапи інженерного аналізу що реалізуються в елементах Geometry.

Для геометрії проектного аналізу потоку рідини чи газу, можна створювати геометрію в ANSYS Design Modeler, або імпортувати відповідний файл геометрії. На цьому кроці створюється геометрія в ANSYS Design Modeler, а потім можна переглянути список файлів, створених за допомогою програми ANSYS Workbench.

Якщо є можливість, то краще не створювати геометрію в ANSYS DesignModeler, можна імпортувати попередньо існуючу геометрію натиснувши правою кнопкою миші Geometry і вибрати Імпорт геометрії з контекстного меню. Звідти можна переглядати файлову систему щоб знайти потрібний файл геометрії.

Основні етапи інженерного аналізу в елементі Geometry є:

1) Запуск Design Modeler. Дозволяє створювати геометрію з нуля або імпортувати його з пакета САПР.

2) Правильна орієнтація. Модель може бути створена у трьох площинах - XY, XZ, YZ .

3) Створення контуру геометрії досліджуваної моделі.

4) Визначення розмірів. На етапі створення моделі можна встановлюювати розміри геометрії.

5) Створення поверхні геометрії. В ANSYS, застосовують геометричні граничні умови до "тіла" або до його елементів.

6) Закрити ANSYS Design Modeler, вибравши Файл → Закрити Design Modeler або натиснувши на значок 'X' в верхньому правому куті. ANSYS

Workbench автоматично зберігає геометрію і оновлює Project Schematic відповідно. Знак питання в геометрії в дереві проекту замінюється прапорцем.

Опис програми ANSYS CFX. Функції підпрограм ANSYS CFX.

ANSYS CFX - Потужний інструмент для оптимізації процесу розробки і технологічної підготовки в області обчислювальної динаміки рідин і газів. ANSYS CFX поєднує в собі передову технологію вирішення з сучасним інтерфейсом і адаптивною архітектурою, що робить цей інструмент доступним як для розробників, які володіють загальними інженерними знаннями, так і для фахівців у галузі гідродинаміки, що працюють з моделлю і її властивостями на професійному рівні.

CFX дозволяє детально вивчити обладнання та процеси зсередини, підвищити ефективність, збільшити термін служби і оптимізувати процеси. Пакет ANSYS CFX складається з п'яти додатків, між якими відбувається обмін потоком інформації, що виникає в процесі постановки і рішення задач гідродинаміки.

За етапи процесу постановки і вирішення задачі відповідає кожен додаток пакета. CFX сітки, або інший додаток генерації сітки - це перший крок постановки завдання. На даному етапі відбувається наступне:

- визначення геометрії області дослідження;
- створення областей потоків рідин або газів, твердих областей і завдання імен граничним областям;
- установка параметрів сітки.

Система ANSYS CFX дозволяє імпортувати геометричні дані з більшості сучасних систем автоматизованого проектування (САПР) і автоматично згенерувати сітку на їх основі. Таким чином, перший етап постановки завдання може бути виконаний в зовнішньому додатку (CAD-системі).

Другий крок постановки задачі, це визначення фізичної моделі, на основі яких буде відбуватися симуляція процесу. CFX - Pre дозволяє

визначити граничні умови процесу (вхідні, вихідні параметри), моделі теплообміну.

В ANSYS CFX попередньо проводиться пошук вирішення всіх необхідних змінних: рівняння в похідних інтегруються по всьому об'єму в галузі дослідження;

Отримані інтегральні рівняння перетворюються в систему алгебраїчних рівнянь шляхом апроксимування членів в інтегральних рівняннях; Алгебраїчні рівняння вирішуються чисельним методом.

ANSYS CFX - Solver Manager - це надбудова над CFX - Solver. Вона дозволяє контролювати хід вирішення задач, такі як:

- визначати вхідні файли вирішувача;
- запускати або припиняти CFX - рішення;
- контролювати процес вирішення завдання;
- встановлювати CFX - рішення для проведення паралельних обчислень.

ANSYS CFX - Post - це програма, призначена для аналізу, візуалізації та представлення результатів, отриманих в ході рішення задачі за допомогою ANSYS CFX - Solver. Для цього використовуються такі засоби:

- візуалізація геометрії та досліджуваних областей;
- векторні графіки для візуалізації напрямку та величини потоків;
- візуалізація зміни скалярних величин (такі як температура, тиск) всередині досліджуваної області.

Графіки, зображення та відео, отримані в результаті аналізу рішення задачі можна зберегти у вигляді окремих файлів. ANSYS CFX - Solver - це програма, що реалізує процес вирішення завдання обчислювальної гідродинаміки.

### 3.1 Дослідження характеристик газодинамічних розрахунків в ANSYS

Для моделювання процесу витікання газо-порошкової суміші із щілинних сопел приймаються такі допущення:

- Газ вважається ідеальним;
- Газовий потік є ізоентропним (тобто має постійну ентропію, сили тертя і дисипативні втрати не враховуються) і адіабатичним (тобто теплота не підводить і не відводиться);
- Газо-порошковий потік є стаціонарним і одновимірним, тобто в будь-якій фіксованій точці сопла всі параметри потоку стали в часі і змінюються тільки вздовж осі сопла, причому у всіх точках обраного поперечного перерізу параметри потоку однакові, а вектор швидкості газу всюди паралельний осі симетрії сопла;
- Масова витрата газу однакова у всіх поперечних перетинах потоку;
- Вплив всіх зовнішніх сил і полів (в тому числі гравітаційного) дуже малий.

Для кожного розрахункового випадку необхідно:

- Розрахувати коефіцієнти витрати і тяги сопла;
- Показати картину перебігу витікання газо-порошкової суміші із щілинного сопла на заготовку;
- Порівняти отримані дані при витіканні із щілинних сопел з повним між каналним ребром та укороченим.

### 3.2 Алгоритм газодинамічного розрахунку в ANSYS

Процес багатьох газодинамічних розрахунків складається з п'яти основних етапів:

1. Створення геометричної моделі (CAD-моделі). Для розрахунку потрібно створити комп'ютерну геометричну модель сопла. ANSYS

Fluent дозволяє вирішувати такі задачі як в двомірній, так і трьохмірній постановках;

2. Створення сітки моделі, яка розраховується на базі геометричної. Це розбиття твердотільної моделі, створеної в попередньому пункті, на окремі малі комірки. Ця процедура проводиться напівавтоматично в спеціальних системах – сіткогенераторах;
3. Створення розрахункової моделі з сітчастої шляхом накладення розрахункових граничних умов. В першу чергу, задається набір рівнянь, які потрібно вирішити. Після визначення набору розв'язуваних рівнянь вказуються вхідні дані для вирішення системи рівнянь;
4. Пошук рішення. На даному етапі проводиться пошук значень параметрів в кожній розрахунковій комірці, щоб вся розрахункова зона мала максимально правильні рівняння потоків;
5. Представлення результатів розрахунку. Для наочності результати аналізу представляють у вигляді графіків, кольорових або векторних полів розподілу параметрів, числових значень параметрів в заданих областях. [13]

Хід роботи:

1. Для початку роботи потрібно відкрити середовище ANSYS Workbench. Щоб додати CAE-аналіз в Fluent, знаходимо в списку систем аналізу Fluid Flow [Toolbox→ Analysis Systems→ Fluid Flow] і двічі натискаємо по компоненту лівою кнопкою миші. Після цього він буде автоматично перенесений на поле проекту де з'явиться дерево проекту Fluid Flow. Дерево проекту складається з п'яти пунктів: Geometri(геометрична модель), Mesh (сітка), Setup (постановка задачі), Solution(рішення) та Results(аналіз результатів).

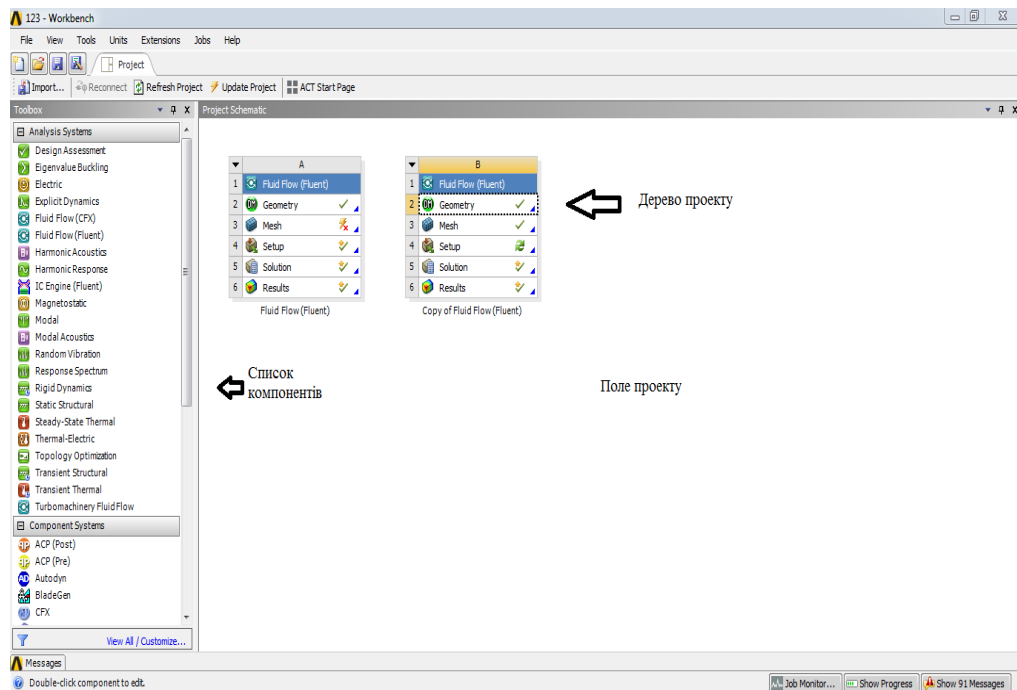


Рисунок 3.1. Вид вікна програми Ansys WorkBench

Для початку обираємо Geometry. Геометричну модель Geometry обробляє вбудована в WorkBench система трьохмірного моделювання Design Modeler. У відкритому вікні вибираємо потрібний варіант розмірностей. На панелі інструментів натискаємо [Look at Face→ Plane→ Sketch] для того щоб вирівняти деталь на зображенні відносно екрана. Далі, використовуючи допоміжну панелі Draw та Modify будуємо геометричну модель щілинного сопла та середовища у вигляді половини циліндра. У вигляді половини циліндра середовище було побудована для більшої наочності результату. Далі натискаємо на [Extrude → Geometry → Apply], після чого обираємо функцію Generate. Ці операції робимо для будовання двох видів сопел - з повним міжканальним ребром та укороченим. Після чого отримуємо дві моделі:

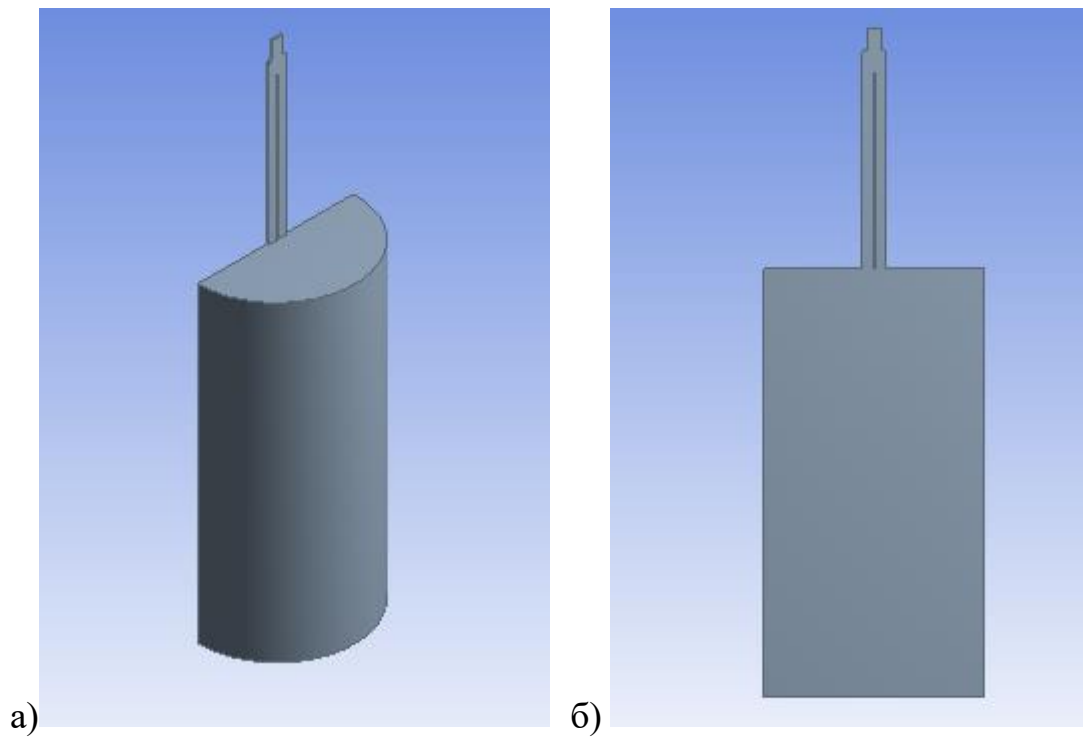


Рисунок 3.2. Модель щілинного сопла з повним міжканальним ребром  
(а – ізометрія моделі; б – вид YZ)

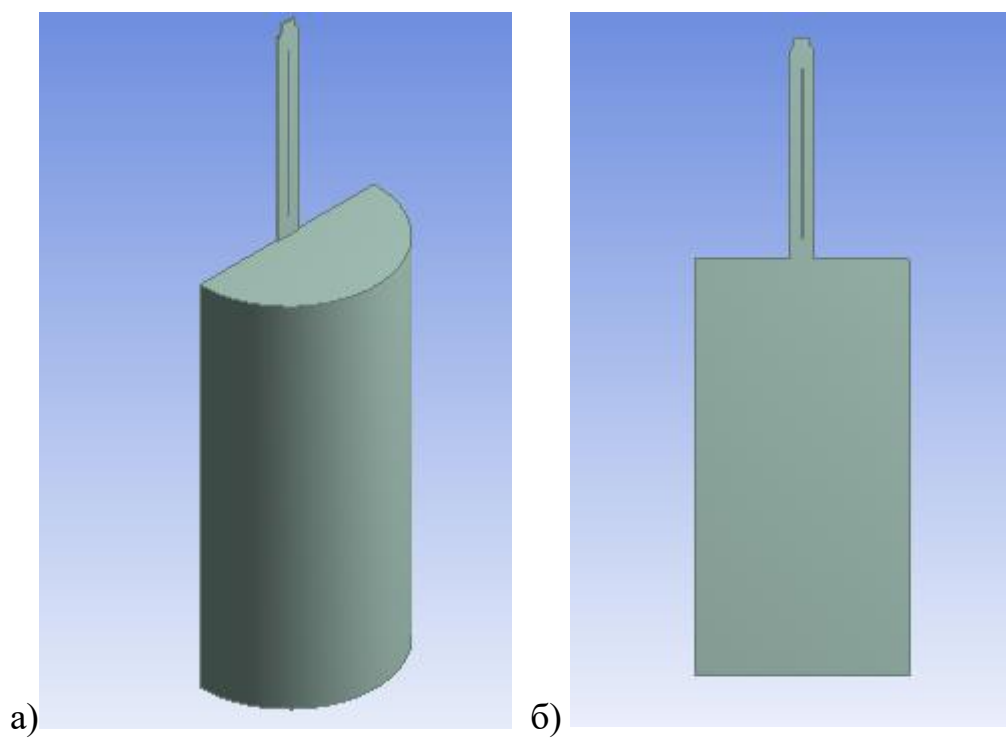


Рисунок 3.3. Модель щілинного сопла з укороченим міжканальним ребром (а – ізометрія моделі; б – вид YZ)

Далі для кожного сопла в середовищі будуємо плоску заготовку та циліндричну. Після чого отримуємо остаточні моделі з якими можна виконувати послідовні операції.

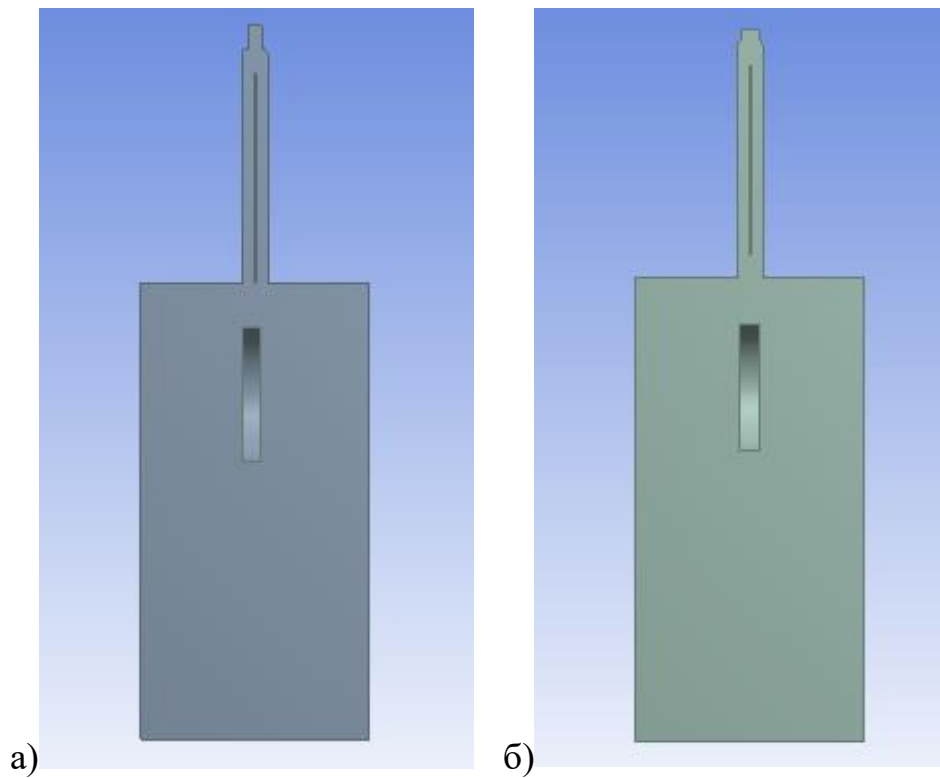


Рисунок 3.4. Геометричні моделі щілинних сопел з повним та укороченим міжканальним ребром та циліндричною заготовкою (а – модель з повним міжканальним ребром; б – модель з укороченим міжканальним ребром)

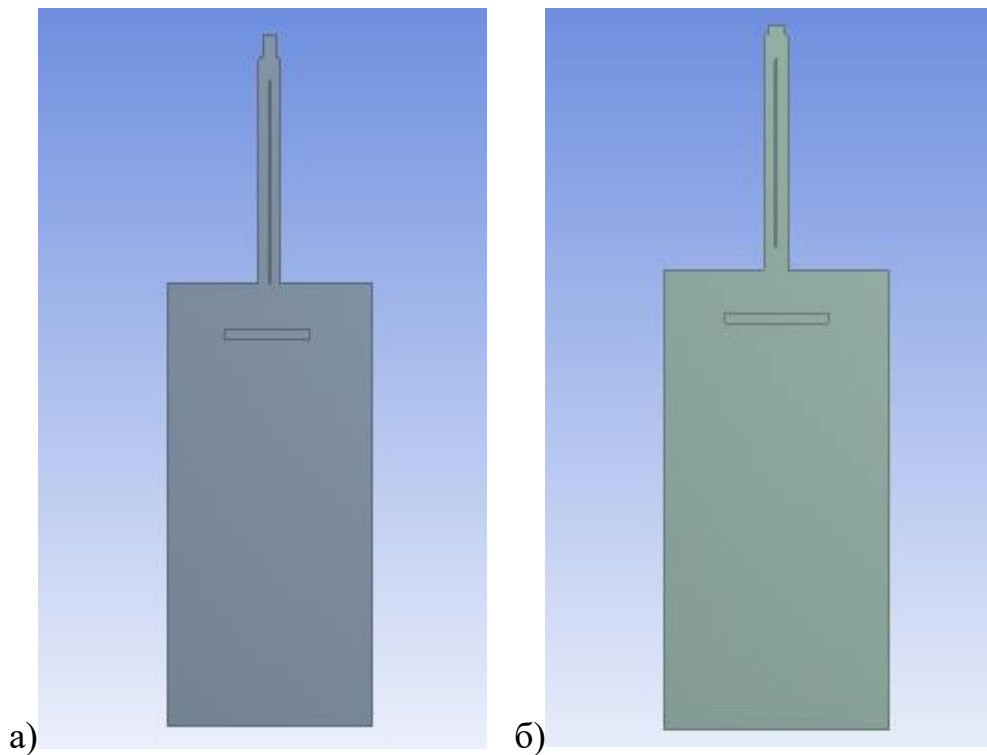


Рисунок 3.5. Геометричні моделі щілинних сопел з повним та укороченим міжканальним ребром та плоскою заготовкою (а – модель з повним міжканальним ребром; б – модель з укороченим міжканальним ребром)

2. Для проведення повноцінного розрахунку потрібно створити сітку розрахункової моделі на базі геометричної. Для цього переходимо в режим Mesh. Сітку Mesh обробляє вбудований в WorkBench - сіткогенератор Mesher. Цей режим для різних типів аналізу генерує розрахункові сітки. ANSYS Meshing має великий набір методів, які відповідають специфічним вимогам тієї чи іншої галузі фізики, а також потужний функціонал в управлінні глобальними параметрами і локальними згущеннями розрахункової сітки. Крім того, ANSYS Meshing містить набір інструментів для виправлення неякісної геометрії і побудови розрахункових сіток для спрощених двовірних і балочних моделей.

В режимі Mesh за допомогою функції Create Named Selections створюємо та відмічаємо границі Inlet (вхід в сопло), Outlet (вихід з середовища обробки), Walls (стінки активних елементів), Symmetry (площина симетрії), Opening.

Після цього необхідно задати параметри сітки і побудувати її. Для цього вибираємо в дереві проекту пункт Mesh і в вікні деталізації вмикаємо опцію загушення сітки в пристіночному шарі Inflation. Для побудови сітки потрібно правою кнопкою миші викликати контекстне меню і вибрати пункт Update або Generate Mesh, та отримуємо результати.

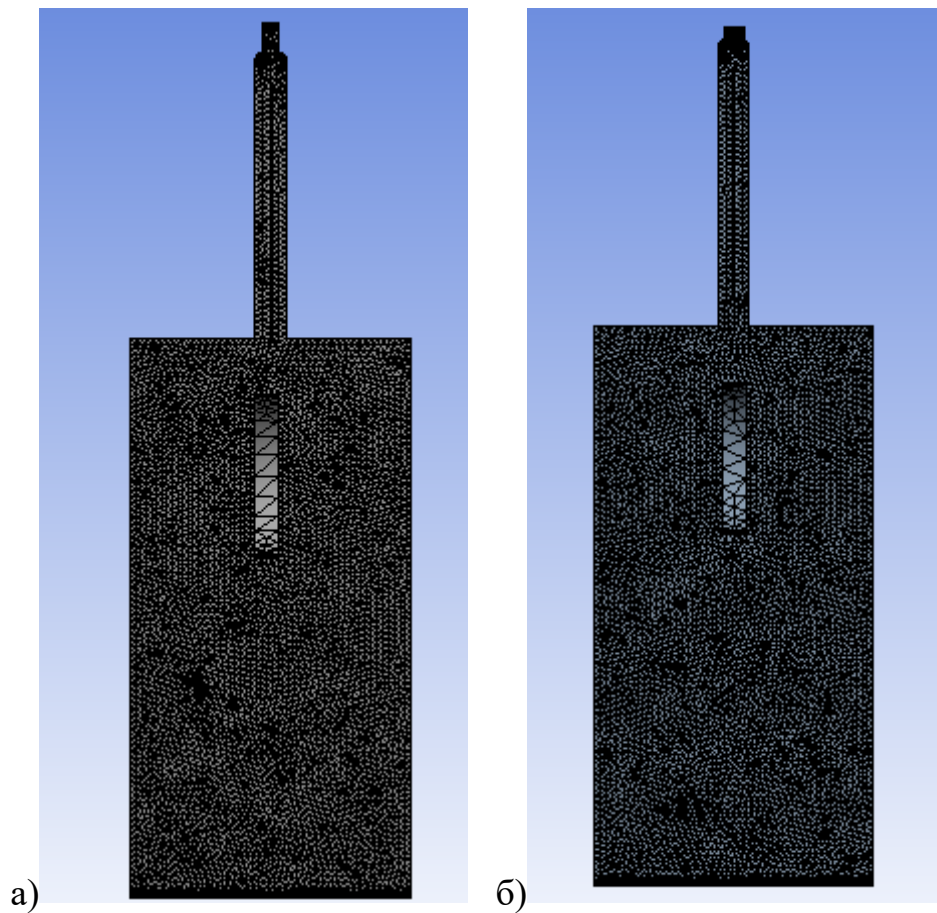


Рисунок 3.6. Сітка розрахункової моделі щілинних сопел з повним та укороченим міжканальним ребром та циліндричною заготовкою (а – модель з повним міжканальним ребром; б – модель з укороченим міжканальним ребром)

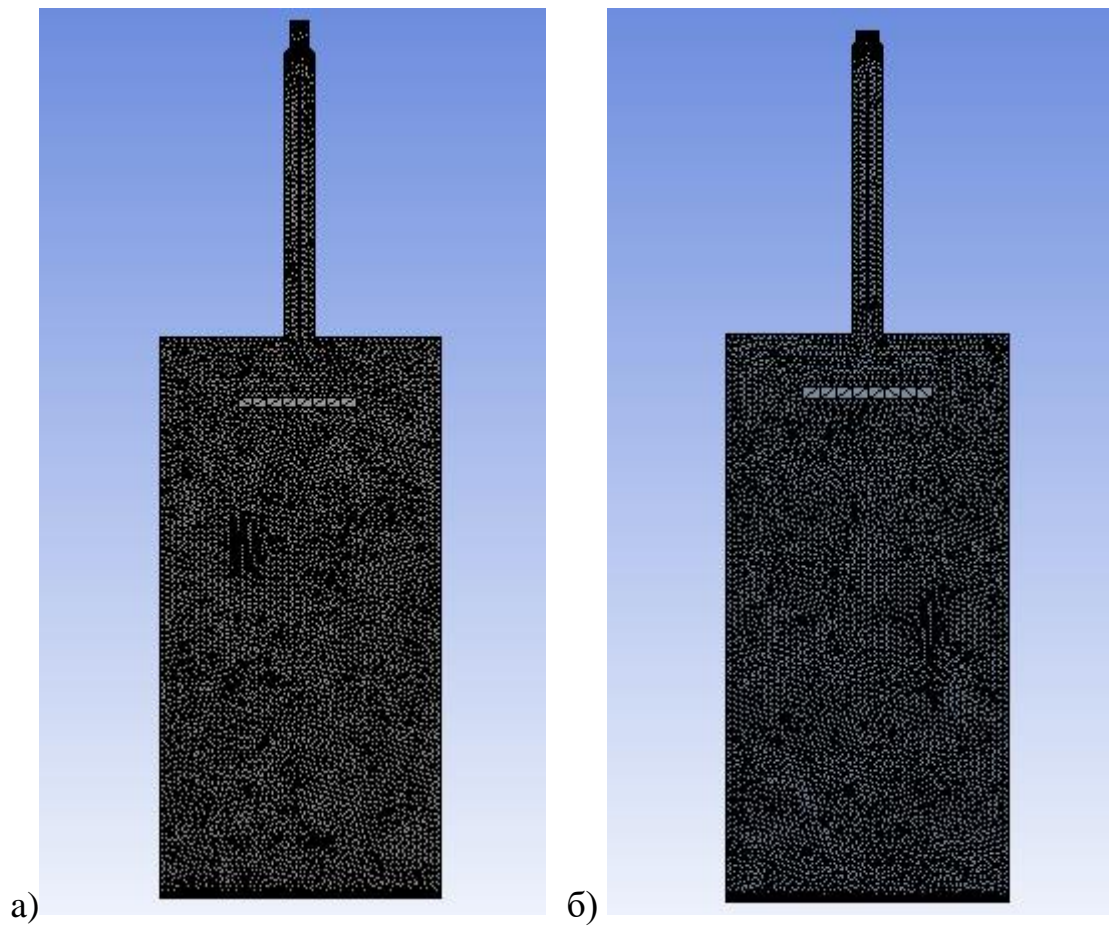


Рисунок 3.7. Сітка розрахункової моделі щілинних сопел з повним та укороченим міжканальним ребром та плоскою заготовкою (а – модель з повним міжканальним ребром; б – модель з укороченим міжканальним ребром)

3. Після цього потрібно відкрити функцію описування розрахункової задачі – Setup. Після відкриття Setup з'являється вікно завантаження параметрів де треба все виставити за замовчуванням і натиснути "ОК".

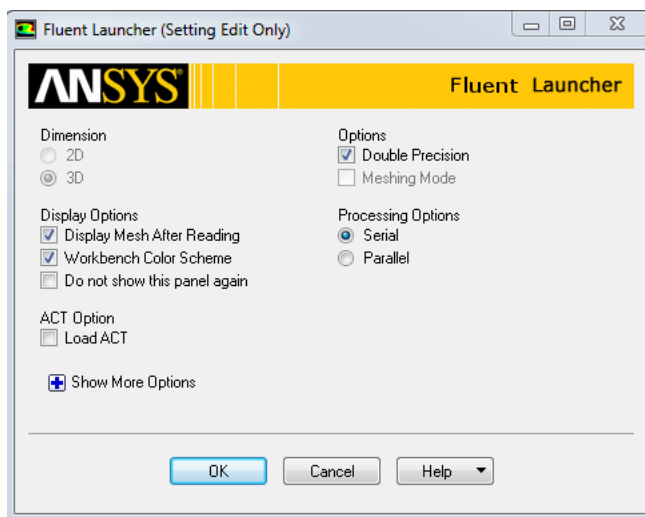


Рисунок 3.8. Вікно загрузки Fluent з параметрами

Вікно Fluent складається з графічного вікна, в якому можна спостерігати завантажену модель, вікна текстових повідомлень, в яке виводяться результати виконання команд, дерева проекту і панелі інструментів. Залежно від того, який пункт вибраний в дереві проекту, відкривається відповідна панель. На панелі General зібрані інструменти для початкового налаштування завдання. Перед початком розрахунку необхідно перевірити сітку на наявність помилок, натиснувши на панелі General функцію Check. При цьому буде виконана перевірка, яка полягає у визначенні габаритів сітки, мінімальних і максимальних об'ємів розрахункових комірок і площ їх граней. Після чого задаємо граничні умови моделювання. Для цього потрібно перейти на вкладку Boundary Conditions, і натиснути по-черзі на inlet, Outlet, Opening. У вікнах, які з'являться задаємо всі необхідні параметри. Такі граничні умови задаємо і для всіх наступних моделей.

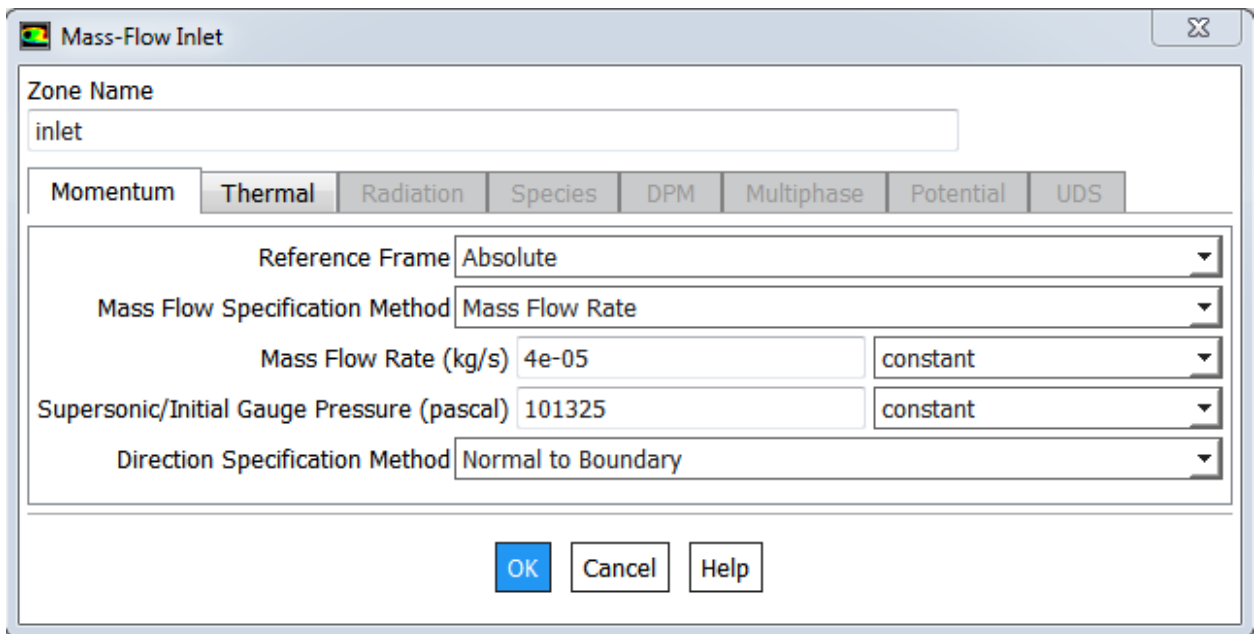


Рисунок 3.9. Налаштування граничної умови входу

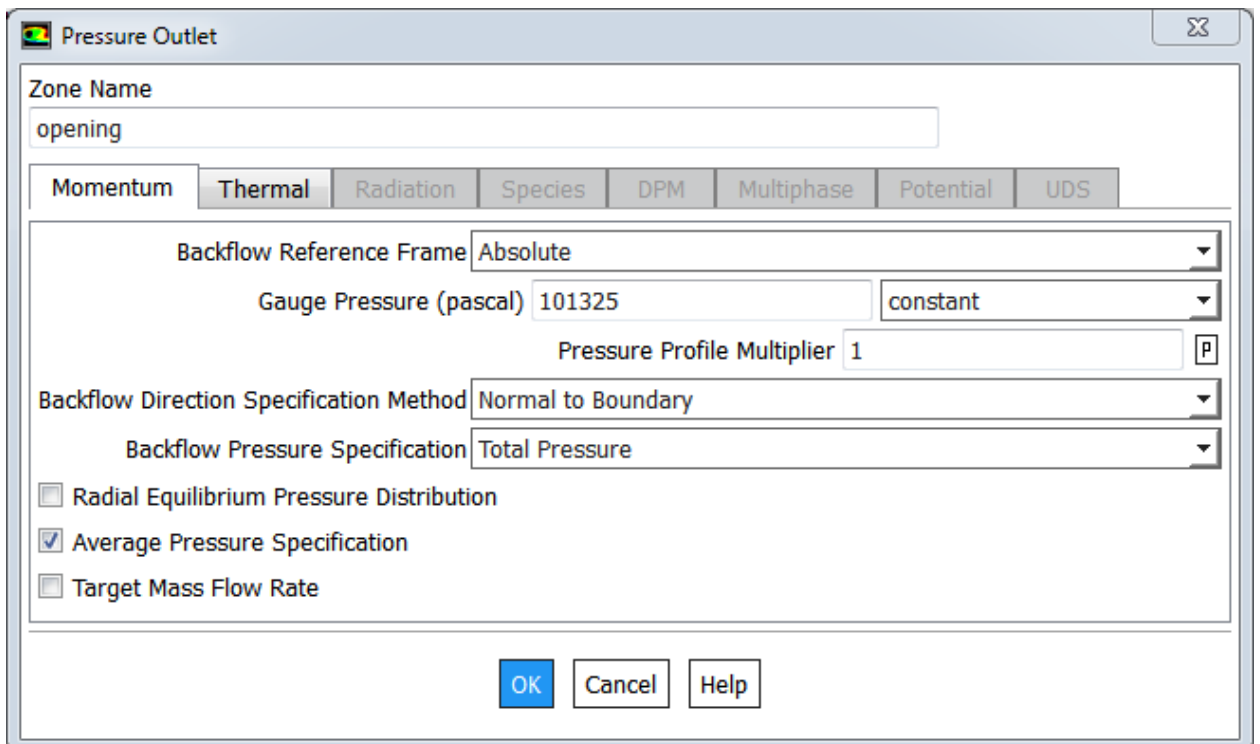


Рисунок 3.10. Налаштування граничної умови активного середовища

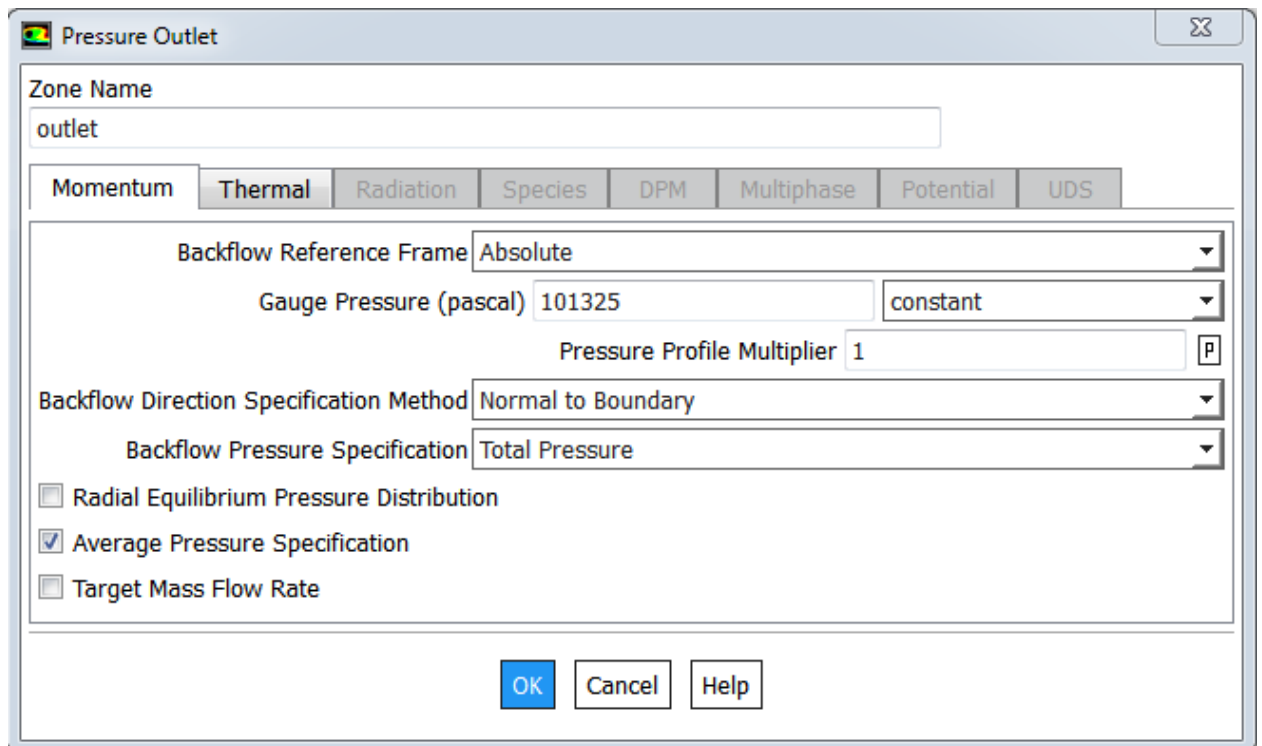


Рисунок 3.11. Налаштування граничної умови виходу

Після цього потрібно задати граничну умову Symmetry. Перехід до налаштування граничної умови здійснюється за допомогою натискання кнопки Operating Conditions. В меню, необхідно ввести нульове значення в Operating Pressure. Після всіх налаштувань потрібно натиснути “ОК”. Такі налаштування потрібно зробити зі всіма моделями.

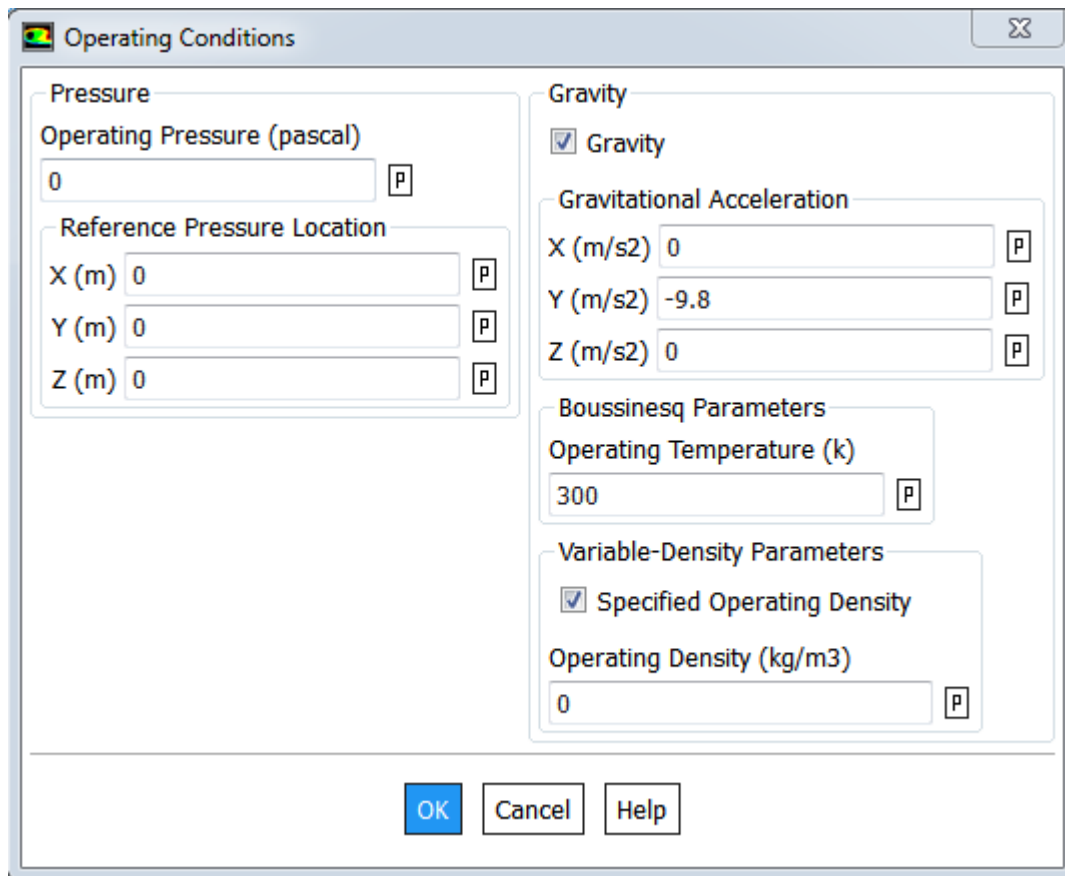


Рисунок 3.12. Налаштування граничної умови симетрії

4. Наступним кроком є функція Solution. У відкритому вікні потрібно перейти на вкладку Run Calculation, ввести в поле Number of Iterations - 500 та натиснути кнопку Calculate. Після чого розпочнеться процес пошуку рішення. При пошуку рішення в графічному вікні відображається графік так званих невязок Residuals за кількістю розв'язуваних рівнянь, а в текстовому вікні виводиться таблиця зміни невязок від ітерації до ітерації.

5. Останнім кроком є функція Results. Після відкриття у дереві проекту Results ми можемо спостерігати характер дії газо-порошкової суміші по торцям циліндра. Для того щоб показати детальний характер дії газо-порошкової суміші на циліндричну заготовку, скористуємося інструментами на панелі у відкритому вікні Results. Натискаємо на інструмент Location і створюємо Plane - нову площину по вісям XY. Координаті Z задаємо 0 міліметрів, для того щоб площина перетинала заготовку посередині. Далі, на панелі інструментів натискаємо Contour, щоб створити новий контур і

прив'язуємо його до нової площини. Також тут задаємо змінну швидкості “Velocity” і кількість контурів. Для більшої наочності необхідна велика кількість контурів. В нашому випадку - 200. Такі операції ми робимо зі всіма моделями сопел та заготовок. В результаті ми можемо спостерігати за характером дії газо-порошкової суміші на заготовку в різних площинах.

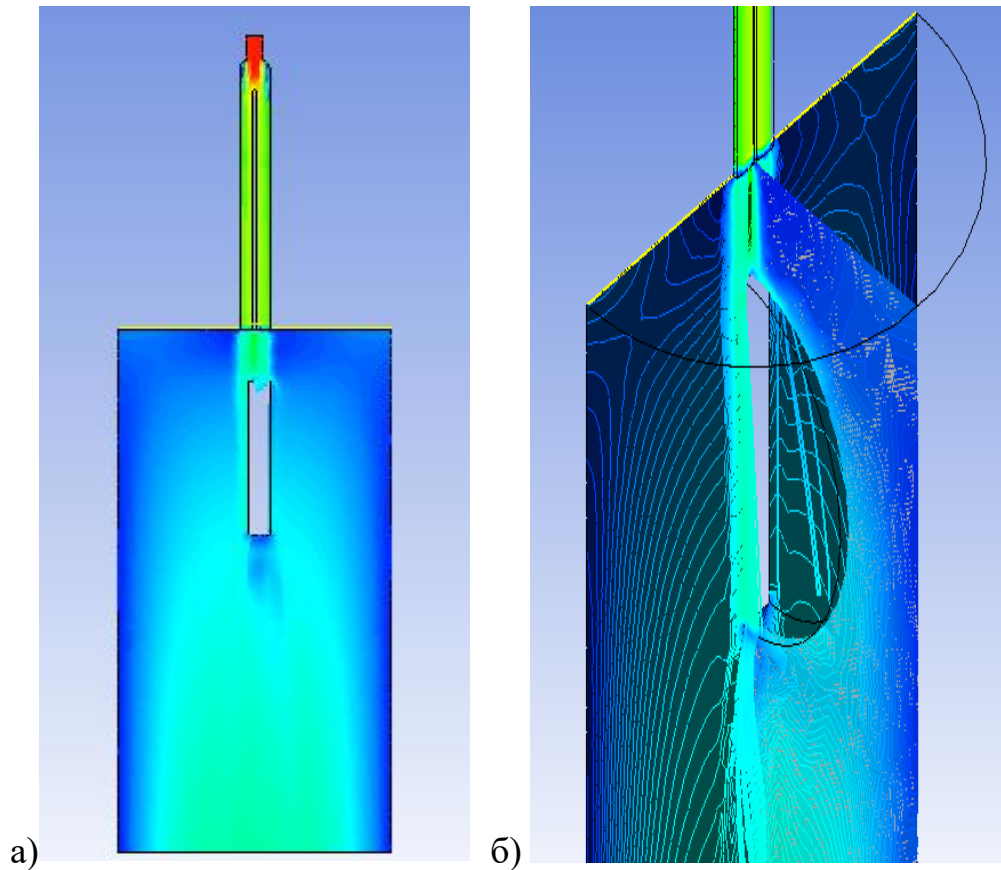


Рисунок 3.13. Характер витікання газо-порошкової суміші на циліндричну заготовку із щілинного сопла з повним міжканальним ребром (а – вид YZ; б – ізометрія моделі)

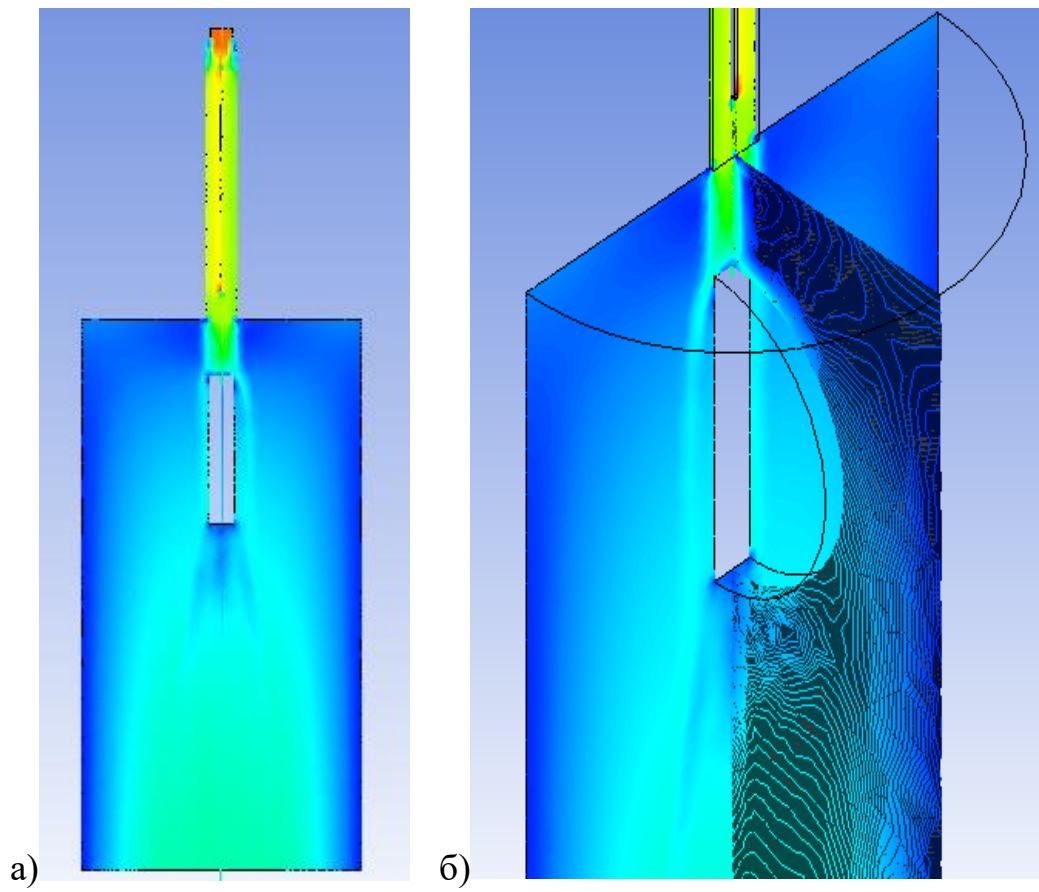


Рисунок 3.14. Характер витікання газо-порошкової суміші на циліндричну заготовку із щілинного сопла з укороченим міжканальним ребром (а – вид  $YZ$ ; б – ізометрія моделі)

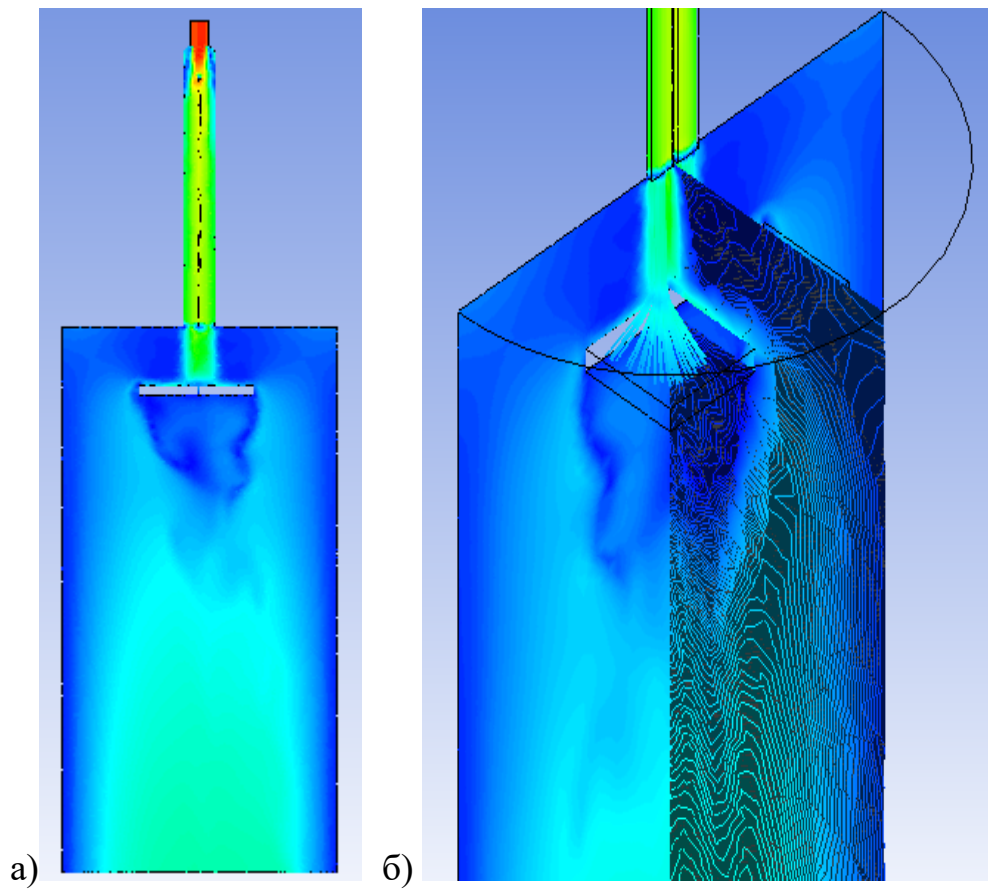


Рисунок 3.15. Характер витікання газо-порошкової суміші на плоску заготовку із щілинного сопла з повним міжканальним ребром (а – вид YZ; б – ізометрія моделі)

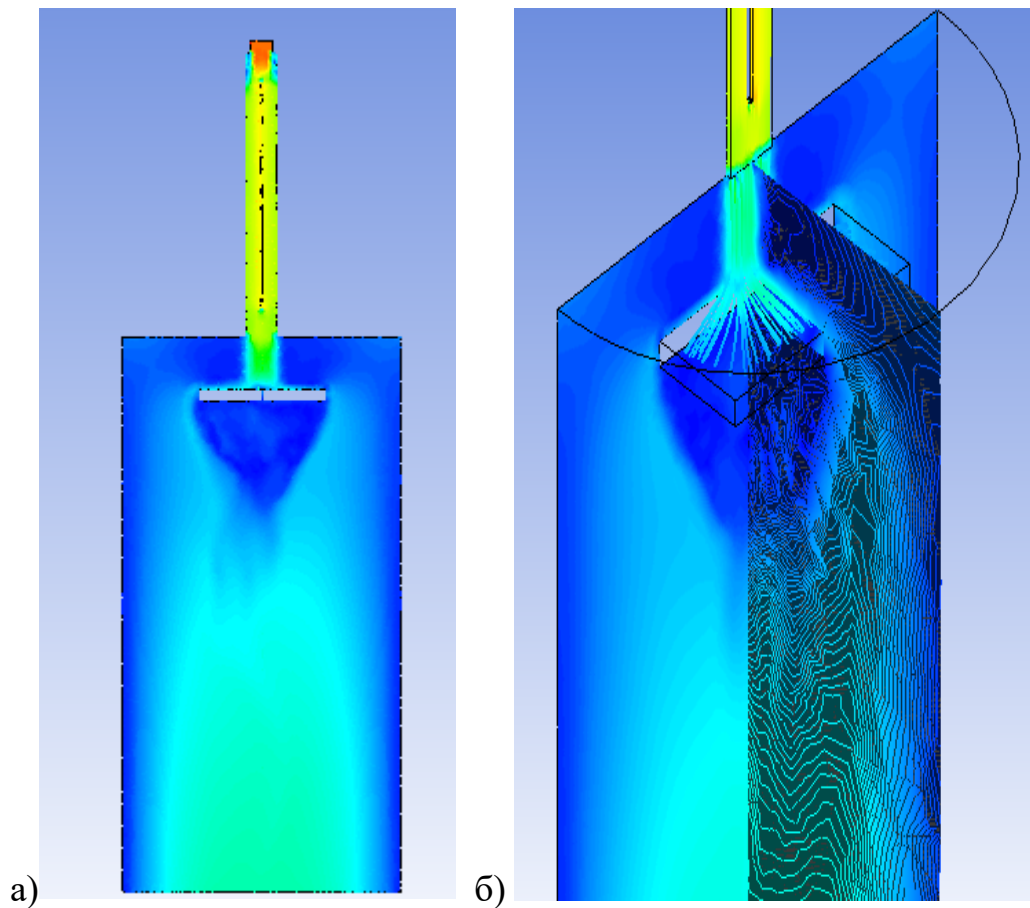


Рисунок 3.16. Характер витікання газо-порошкової суміші на циліндричну заготовку із щілинного сопла з укороченим міжканальним ребром (а – вид  $YZ$ ; б – ізометрія моделі)

Таким же способом розглянемо поперечний переріз струменю газо-порошкової суміші між заготовкою і соплом. Для цього спочатку в робочому вікні Results для сопла з повним міжканальним ребром створимо три площини Plane по вісям  $XZ$ . Координаті  $Y$  в трьох випадках задамо таких значень:  $-0,001$  м;  $-0,01$  м;  $-0,02$  м. Після цього створимо три контури Contour і прив'яжемо до кожного з них по площині. В параметрах кожного контуру вкажемо змінну Velocity. В такій же послідовності робимо поперечний переріз і для струменя який виходить із сопла з неповним міжканальним ребром. В підсумку отримаємо три перерізи для сопла з повним міжканальним ребром і три для сопла з укороченим міжканальним ребром.

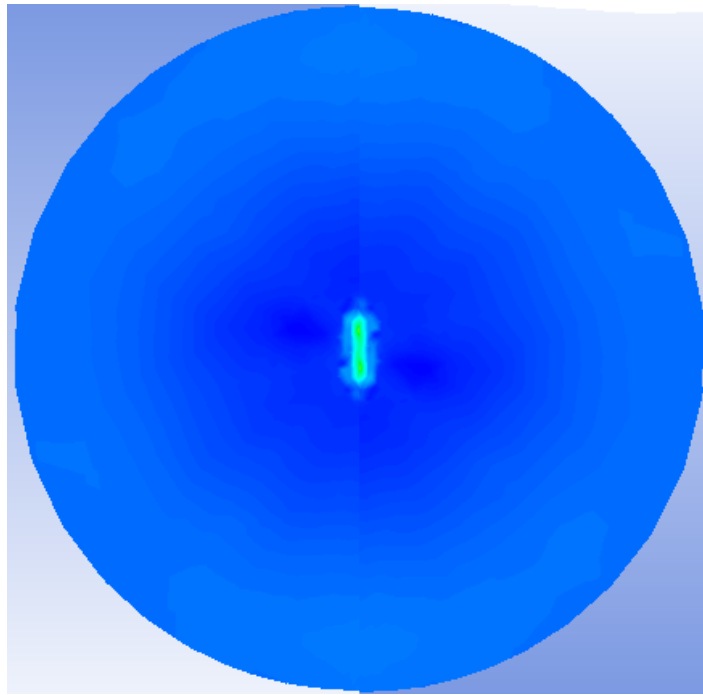


Рисунок 3.17. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.001 м від сопла з повним міжканальним ребром

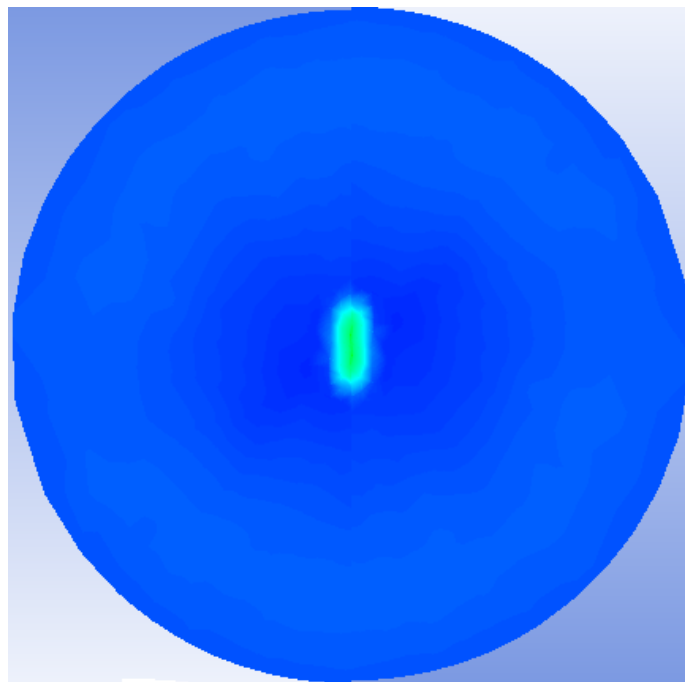


Рисунок 3.18. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.01 м від сопла з повним міжканальним ребром

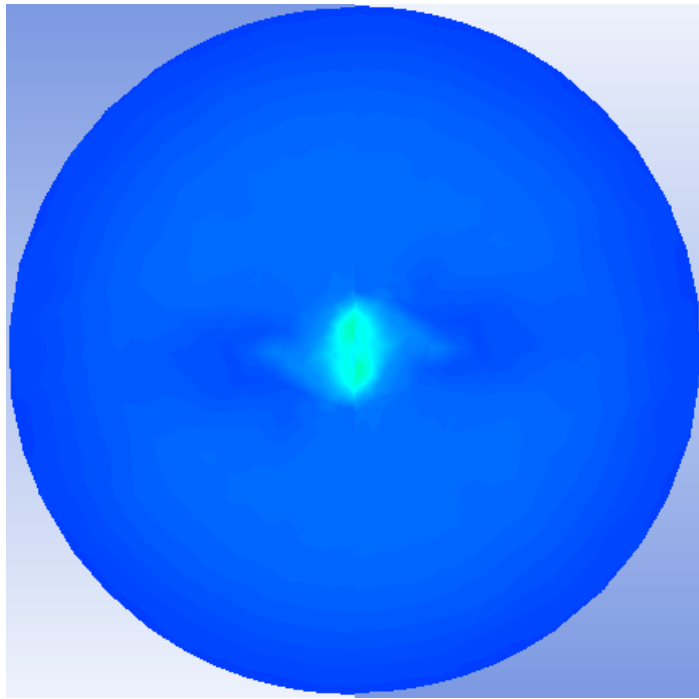


Рисунок 3.19. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.02 м від сопла з повним міжканальним ребром

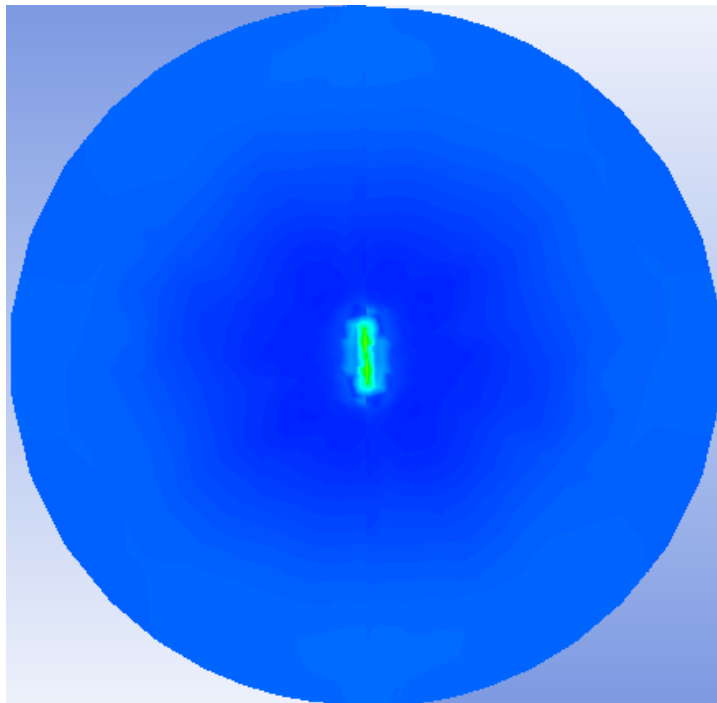


Рисунок 3.20. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.001 м від сопла з укороченим міжканальним ребром

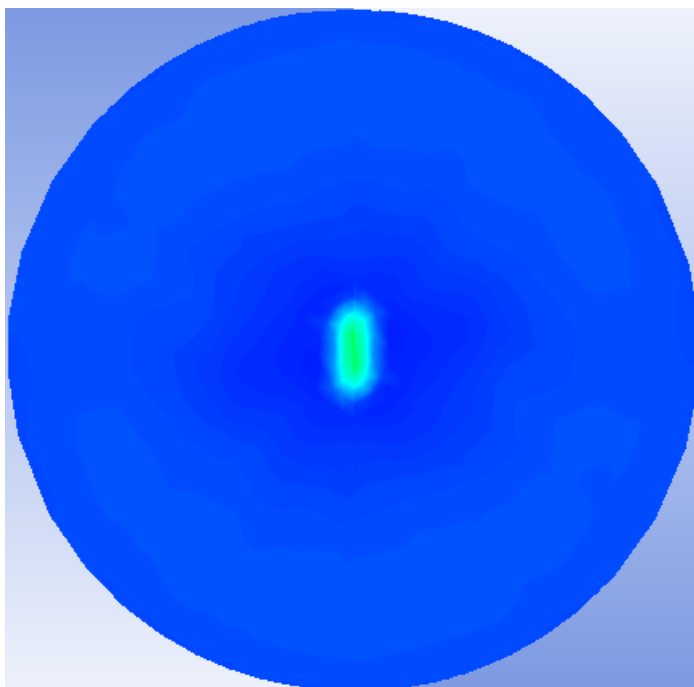


Рисунок 3.21. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.01 м від сопла з укороченим міжканальним ребром

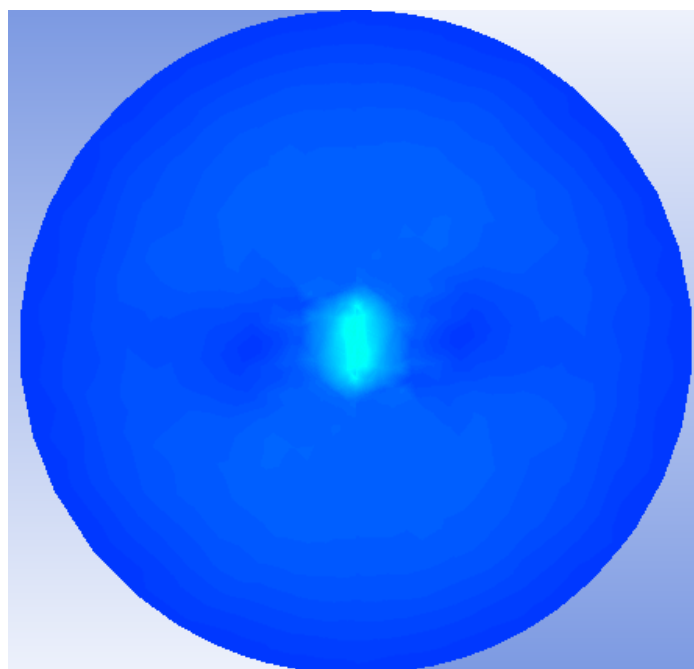


Рисунок 3.22. Поперечний переріз струменя газо-порошкової суміші на відстані 0.02 м від сопла з укороченим міжканальним ребром

Дослідивши отримані перерізи можна зробити висновки що на відстанях 0.001 м і 0,01 м від сопла струмінь газо-порошкової суміші майже

однаковий для сопла з повним міжканальним і з укороченим ребром. А на відстані 0.02 м різницю можна добре побачити. Струмінь, який витікає з сопла з повним міжканальним ребром має більшу площу поперечного перерізу чим струмінь із сопла з укороченим ребром. Це пояснюється тим, що газо-порошкова суміш виходячи з сопла з укороченим міжканальним ребром раніше змішується. Тобто частинки порошу раніше з'єднуються між собою і у підсумку набирають більшу швидкість.

Також за допомогою програм Microsoft Excel і OriginPro визначимо залежність розподілу швидкості в перерізі струменю газо-порошкової суміші. Для цього в робочому вікні Results натиснемо [File →Export]. У таблиці яка відкриється обираємо всі необхідні параметри і натискаємо Save.

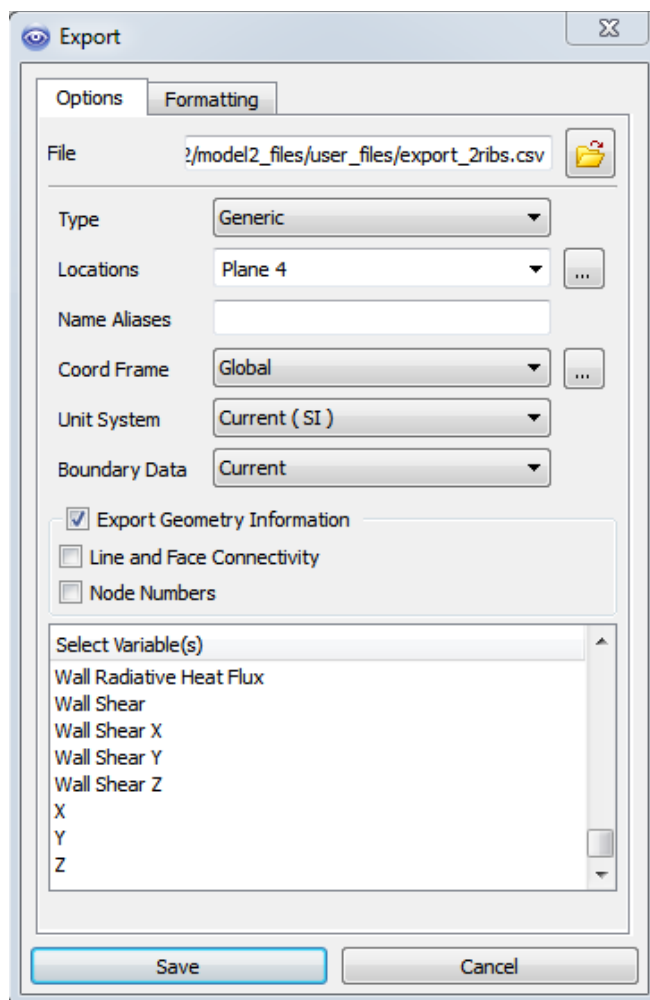


Рисунок 3.23. Параметри експортування з Ansys Fluent в Microsoft Excel

Дані у відкритому збереженому файлі треба перенести в програму OriginPro. В цій програмі будуємо графіки за допомогою функції Contur Profiles.

З одержаних графіків для сопла з повним міжканальним ребром (Рисунок 3.24.) можна зробити висновки що швидкість газопорошкової суміші найбільша в центрі струменя. Також можна спостерігати що швидкість зменшується при віддаленні від центру струменя. З графіка видно, що переріз струменя має прямокутну форму.

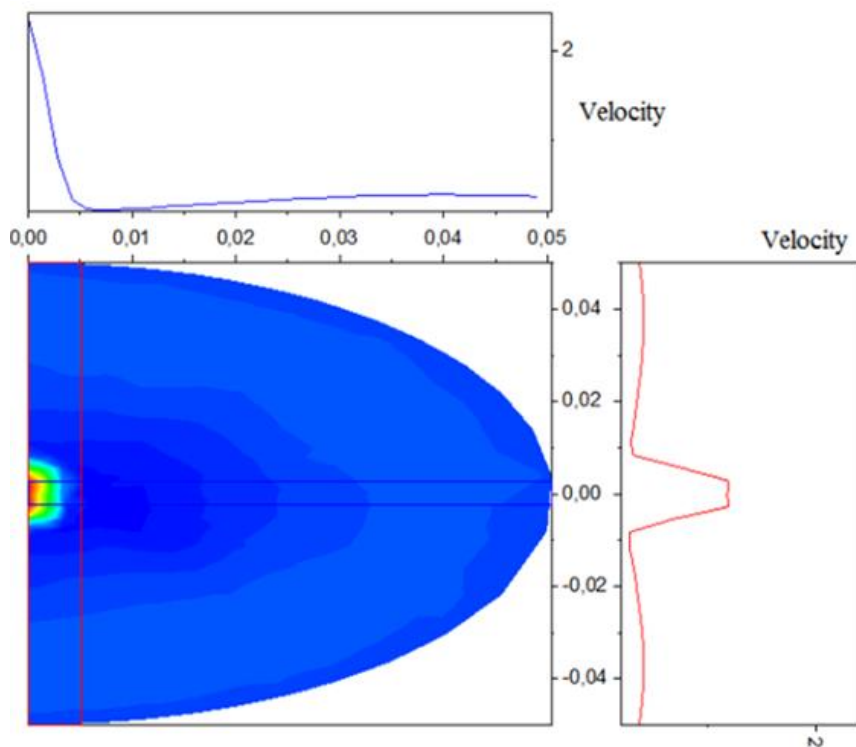


Рисунок 3.24. Графік залежності розподілу швидкості в перерізі струменя газопорошкової суміші, який виходить із сопла з повним міжканальним ребром

На рисунку 3.25. також можна спостерігати, що швидкість газопорошкової суміші найбільша в центрі струменя, а при віддаленні від центру струменя вона падає.

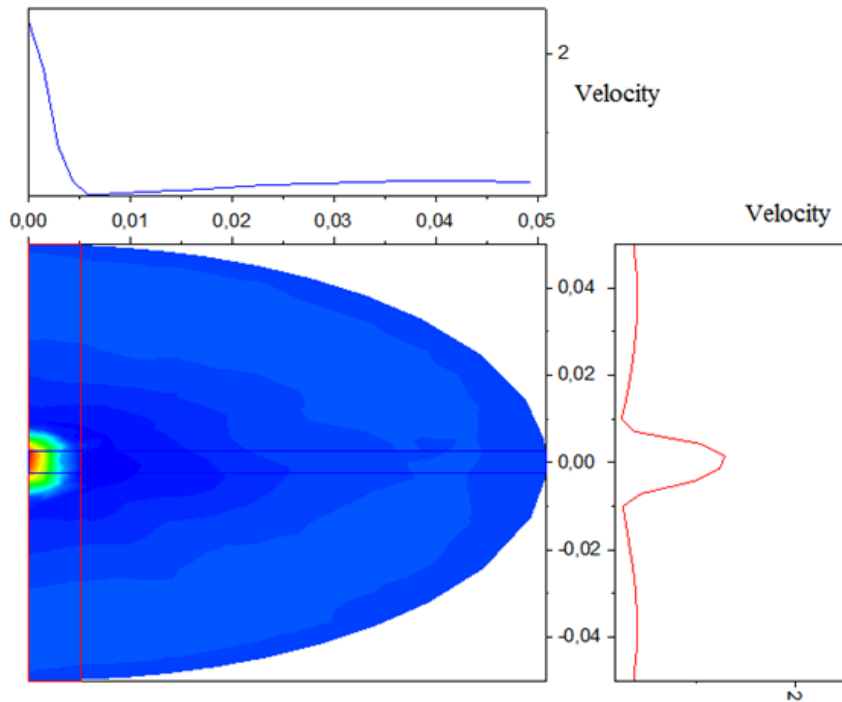


Рисунок 3.25. Графік залежності розподілу швидкості в перерізі струменю газо-порошкової суміші, який виходить із сопла із укороченим міжканальним ребром

### 3.3 Опис газодинамічних розрахунків за допомогою формул

Відношення локальної швидкості  $v$  до локальної швидкості звуку  $C$  є числом Маха, яке також є місцевим, а отже яке залежить від координати  $X$ :

$$M = \frac{v}{C} \quad (1),$$

З рівняння стану ідеального газу слідує:

$$\frac{dp}{d\rho} = C^2, \text{ де } \rho - \text{ локальна густина газу, } p - \text{ локальний тиск газу.}$$

З врахуванням цього, а також з врахуванням стаціонарності і одновимірності потоку, рівняння Ейлера набуває вигляду:

$$v \frac{dv}{dx} = -\frac{1}{\rho} * \frac{dp}{dx} = -\frac{1}{\rho} * \frac{dp}{d\rho} * \frac{d\rho}{dx} = -\frac{C^2}{\rho} * \frac{d\rho}{dx}$$

що, з огляду на (1), перетворюється

$$\frac{1}{\rho} * \frac{d\rho}{dx} = -M^2 * \frac{1}{v} * \frac{dv}{dx} \quad (2)$$

Рівняння (2) є ключовим в даному випадку.

Розглянемо його в такому форматі:

$$\frac{\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx}}{\frac{1}{v} \frac{dv}{dx}} = -M^2 \quad (3)$$

Величини  $\frac{1}{\rho} \frac{d\rho}{dx}$  і  $\frac{1}{v} \frac{dv}{dx}$  дають характеристику відносній ступені змінності по координаті  $X$  густини газу і його швидкості відповідно. До того ж рівняння (3) визначає, що співвідношення між цими величинами є рівним квадрату числа Маха. Отже, на дозвукових швидкостях ( $M < 1$ ) густина змінюється в меншому ступені чим швидкість, а на надзвукових ( $M > 1$ ) – густина змінюється в більшому ступені чим швидкість.

Оскільки масова витрата газу стала, то:

$$\rho * v * A = const,$$

де  $A$  - площа місцевого перетину сопла,

$$\ln\rho + \ln v + \ln A = \ln(const),$$

диференціюючи дві частини цього рівняння по  $X$ , отримуємо:

$$\frac{1}{\rho} * \frac{d\rho}{dx} + \frac{1}{v} * \frac{dv}{dx} + \frac{1}{A} * \frac{dA}{dx} = 0$$

Після підставлення з (2) в це рівняння, отримуємо остаточно:

$$\frac{dA}{dx} = \frac{A}{v} * \frac{dv}{dx} * (M^2 - 1) \quad (4)$$

Треба зауважити, що при збільшенні швидкості газу в соплі знак вираження

$\frac{A}{v} * \frac{dv}{dx}$  позитивний, отже знак похідної  $\frac{dA}{dx}$  визначається знаком виразу:  $(M^2 - 1)$ .

Рухаючись по соплу, газ розширюється, його температура і тиск знижуються, а швидкість зростає. Внутрішня енергія газу переходить в кінетичну енергію його спрямованого руху. ККД цього перетворення в нашому випадку не перевищує 70%. Газ проходячи через сопло на значній швидкості, не встигає

передати стінкам сопла велику кількість своєї теплової енергії, що дозволяє вважати процес адіабатичним.

З рівняння стану ідеального газу, а також з балансу енергії в газовому потоці можна вивести формулу розрахунку лінійної швидкості витоку газу з сопла:

$$v_e = \sqrt{\frac{T^*R}{M} * \frac{2*k}{k-1} \left[ 1 - \left( \frac{p_e}{p} \right)^{(k-1)/k} \right]};$$

Двопараметрична модель турбулентності  $k - \epsilon$ :

$$\frac{\partial}{\partial t} (pk) + \frac{\partial}{\partial x_i} (pk u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - p\epsilon - Y_M + S_k \quad (5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} (p\epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i} (p\epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} p \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon \quad (6)$$

Рівняння для турбулентної кінетичної енергії  $k - 5$ ;

Рівняння для дисипації  $\epsilon - 6$ .

Де:

$G_k$  - джерело за рахунок градієнта середньої швидкості;

$G_b$  - джерело за рахунок архімедових сил;

$S_k, S_\epsilon$  - призначені для користувача джерела.

## РОЗДІЛ 4

### 4. СТАРТАП-ПРОЕКТ

Стартап-проект (форма малого ризикового підприємництва) впродовж останнього десятиліття набув широкого розповсюдження у світі через зниження бар'єрів входу на ринок (із розвитком інтернету як засобу популяризації та торгівлі стало простіше знаходити споживачів та інвесторів, займатись пошуком ресурсів, здійснювати діяльність між різними країнами), і вважається однією із найновіших складових інноваційної економіки, за рахунок мобільності, гнучкості та великої кількості стартап-проектів кількість інноваційних ідей зростає. Створення та впровадження стартап-проектів має підвищену міру ризику. Ринково успішними стає лише невелика частка, що за різними оцінками складає 10%-20%. Сам по собі стартап-проект, не вартує майже нічого: головним завданням керівника проекту на початковому етапі його існування є перетворення ідеї проекту у працюючу бізнес-модель, що починається із формування концепції товару (послуги) для визначеної клієнтської групи за даними ринковими умовами.

Розроблення та виведення стартап-проекту на ринок передбачає здійснення певних кроків, в межах яких визначають ринкові перспективи проекту, графік та принципи організації виробництва, фінансовий аналіз та аналіз ризиків і заходи з просування пропозиції для інвесторів. Узагальнено етапи розроблення стартап-проекту можна подати таким чином.

Етапи розроблення стартап-проекту:

1. Маркетинговий аналіз стартап-проекту:

- розробляється опис самої ідеї проекту та визначаються загальні напрями використання потенційного товару чи послуги, а також їх відмінність від конкурентів;

- на базі аналізу ринкового середовища розробляється стратегія

ринкового впровадження потенційного товару в межах проекту;

- аналізуються ринкові можливості щодо його реалізації;

## 2. Організація стартап-проекту:

- розраховується потреба в основних засобах та нематеріальних активах;

- складається календарний план-графік реалізації стартап-проекту;

- визначається плановий обсяг виробництва потенційного товару, на основі чого формулюється потреба у матеріальних ресурсах та персоналі;

- розраховуються загальні початкові витрати на запуск проекту та планові загальногосподарські витрати, необхідні для реалізації проекту.

## 3. Фінансово-економічний аналіз та оцінка ризиків проекту:

- визначається обсяг інвестиційних витрат;

- розраховуються основні фінансово-економічні показники проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту);

- визначається рівень ризикованості проекту, визначаються основні ризики проекту та шляхи їх запобігання (реагування на ризики).

- розрахунок основних фінансово-економічних показників проекту (обсяг виробництва продукції, собівартість виробництва, ціна реалізації, податкове навантаження та чистий прибуток) та визначаються показники інвестиційної привабливості проекту (запас фінансової міцності, рентабельність продажів та інвестицій, період окупності проекту).

4. Заходи з комерціалізації проекту(цей етап спрямовано на пошук інвесторів та просування інвестиційної пропозиції):

- створення інвест-пропозиції (оферти): стислої характеристики проекту для попереднього ознайомлення інвестора із проектом;

- визначення цільової групи інвесторів та опису їх ділових інтересів;
- планування заходів з просування оферти: визначення комунікаційних каналів та площадок та планування системи заходів з просування в межах обраних каналів;
- планування ресурсів для реалізації заходів з просування оферти.

В даному розділі буде виконано головний етап розроблення старпап-проекту, а саме маркетинговий аналіз, з метою виявлення ринкових можливостей використання результатів роботи. [14]

#### 4.1 Опис ідеї послуги

Ідея послуги заключається в тому, щоб створити центри з лазерного відновлення складних об'ємних деталей в машинобудуванні. Послугу можна розширити, за рахунок створення мобільних центрів з лазерного відновлення деталей по місцю їх безпосереднього розташування.

Послуга може бути запропонована всім підприємствам, які мають потребу у відновлення деталей, устаткування яке працює в агресивних середовищах.

Окрім того, можна запропонувати підприємствам послугу виготовлення елементів пристроїв та запчастин зміцнених газо-порошковим наплавленням.

Головною відмінністю даних послуг від існуючих аналогів та замінників є: можливість обробки не прями поверхні, а поверхні різноманітної форми, корпусні деталі, опуклі та випуклі деталі.

Таблиця 4.1. Опис ідеї стартап-проекту

Зміст ідеї	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Центри з лазерного відновлення деталей загального машинобудування	1.Відновлення лопаток турбін	Швидкість та точність виготовлення
	2.Відновлення елементів гідравлічної арматури	Швидкість виготовлення. Відсутність пор та тріщин
	Зміцнення поверхонь	
Мобільний центр з лазерного відновлення деталей по місцю їх безпосереднього розташування	1.Відновлення компонентів сільськогосподарської техніки	Швидкість виготовлення. Відсутність пор та тріщин
	2.Відновлення важких анілоксових валів	Швидкість та точність виготовлення
Укріплення елементів об'ємних пристроїв та запчастин з складною поверхнею	1.Виготовлення компонентів сільськогосподарської техніки які вийшли з ладу та не можуть бути відновлені	Швидкість та точність виготовлення. Відсутність пор та тріщин
	2. Виготовлення прецизійних одиничних виробів	Швидкість та точність виготовлення. Відсутність пор та тріщин

## 4.2 Аналіз потенційних техніко-економічних переваг ідеї

На теперішній час, лазерне відновлення деталей не має конкурентів, які могли б забезпечити такі самі показники якості та швидкості виготовлення замовлення. Одним з аналогів є плазмове нанесення покриттів, але ця технологія передбачає велику кількість фінішних операцій, які потребують великих часових витрат.

Єдиним чинником, який може стати на заваді успішного розвитку впровадження технологій лазерного відновлення в промисловості може стати кінцевий користувач – покупець.

За схемою п'яти сил М. Портера [20], серед основних впливових факторів, які можуть стати на заваді з боку покупця – це рівень чутливості до зміни цін та змінні витрати на виготовлення готової продукції, оскільки все це пов'язане з витратами порошкової суміші, вартістю електроенергії та витратами на транспортування лазерного технологічного комплексу на місце розташування зламаної деталі.

Таблиця 4.2. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту

№ п/ п	Техніко- економічні характерис- тики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Плазма	Виготов- лення аналогів	Придб. запас. частин			
1.	Економія на масштабах	Так			Так			S
2.	Патенти на продукти	Так		Так	Так			S
3.	Розмір капітало- вкладень	Так	Так	Так	Так			S
4.	Значення розміру поставок	Так	Так	Так	Так			W

Визначений перелік слабких W, сильних S та нейтральних N характеристик та властивостей ідеї потенційного товару є підґрунтям для формування його конкурентоспроможності.

### 4.3 Технологічний аудит ідеї проекту

В межах даного підрозділу необхідно провести аудит технології, за допомогою якої можна реалізувати ідею проекту (технології створення товару).

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту передбачає аналіз таких складових (табл. 4.3.):

- за якою технологією буде виготовлено товар згідно ідеї проекту?
- чи існують такі технології, чи їх потрібно розробити/доробити?
- чи доступні такі технології авторам проекту?

Таблиця 4.3. Технологічна здійсненність ідеї проекту

№ п/п	Ідея проекту	Технології реалізації	Наявність технологій	Доступність технологій
	Центри з лазерного відновлення деталей загального машинобудування	Відновлення деталей за допомогою лазерного газопорошкового наплавлення	Наявна	Так
	Мобільний центр з лазерного відновлення деталей по місцю їх безпосереднього розташування	Відновлення деталей за допомогою лазерного газопорошкового наплавлення	Наявна	Так
	Відновлення деталей складної форми та робота над 3D деталями	Відновлення деталей за допомогою лазерного газопорошкового наплавлення	Наявна	Так
Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Відновлення складних деталей за допомогою лазерного газопорошкового наплавлення				

За результатами аналізу таблиці можна зробити висновок щодо можливості технологічної реалізації проекту: так чи ні, а також технологічного шляху, яким це доцільно зробити.

#### 4.4 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Визначення ринкових можливостей, які можна використати під час ринкового впровадження проекту, та ринкових загроз, які можуть перешкодити реалізації проекту, дозволяє спланувати напрями розвитку проекту із урахуванням стану ринкового середовища, потреб потенційних клієнтів та пропозицій проектів-конкурентів.

Спочатку проводиться аналіз попиту: наявність попиту, обсяг, динаміка розвитку ринку (табл. 4.4.).

Таблиця 4.4. Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

№ п/ п	Показники стану ринку (найменування)	Характеристика
1	Кількість головних гравців, од;	3
2	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од;	1000000 у.о.
3	Динаміка ринку (якісна оцінка);	Зростає
4	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень);	Немає обмежень. Ринок вільний
5	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації;	Немає
6	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %;	30

Середня норма рентабельності в галузі (або на ринку) порівнюється із банківським відсотком на вкладення. За умови, що останній є вищим, можливо, є сенс вкласти кошти в інший проект. В нашому випадку, банківський відсоток на вкладення складає 20 відсотків, отже можна зробити висновок про те, що ринок є привабливим для входження за попереднім оцінюванням.

Тепер доцільно визначити потенційні групи клієнтів, їх характеристики, та сформувані орієнтовний перелік вимог до товару для кожної групи (таблиця 4.5.).

Таблиця 4.5. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
	Відновлення деталей за допомогою лазерного газопорошкового наплавлення	Підприємства важкого машинобудування	Технічні умови щодо стану відновленої деталі	Якість виготовлення, відсутність пор та тріщин

#### 4.5 Фактори, що сприяють ринковому впровадженню

Після визначення потенційних груп клієнтів проводиться аналіз ринкового середовища: складаються таблиці факторів, що сприяють

ринковому впровадженню проекту, та факторів, що йому перешкоджають (таблиці 4.6 – 4.7). Фактори в таблиці подаються в порядку зменшення значущості.

Таблиця 4.6. Фактори загроз

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
	Якість	Недотримання стандартів щодо виготовлення або відновлення деталі	Перемовини з клієнтом
	Вартість	Перевищення витрат щодо виготовлення або відновлення деталі	Перемовини з клієнтом

Таблиця 4.7. Фактори можливостей

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
	Якість	Підвищення якості	Зміна технологічних параметрів процесу.
	Вартість	Зменшення вартості виготовлення	Використання більш дешевих порошків

Тепер проведемо аналіз пропозиції: визначимо загальні риси конкуренції на ринку (табл. 4.8.).

Таблиця 4.8. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)
1. Вказати тип конкуренції - монополія/олігополія/ монополістична/чиста	чиста	Створення аналогічних центрів (підвищення якості та покращення логістичних послуг)
2. За рівнем конкурентної боротьби	міжнародний	Створення аналогічних центрів (підвищення якості та покращення логістичних послуг)
3. За галузевою ознакою - міжгалузєва/ внутрішньогалузєва	міжгалузєва	Поки немає відповіді
4. Конкуренція за видами товарів: - товарно-родова - товарно-видова - між бажаннями	між бажаннями	Наша перевага в тому, що ми готові задовольнити будь-яке бажання клієнта
5. За характером конкурентних переваг - цінова / нецінова	нецінова	Репутація буде найкращою рекламою
6. За інтенсивністю - марочна/не марочна	не марочна	Джоб-шопи не є конкурентами, оскільки вони не можуть надати повний перелік послуг

Проведемо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (за моделлю 5 сил М. Портера, (таблиця 4.9)).

Таблиця 4.9. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Постачальники	Клієнти	Товар-замінник
Складові аналізу	Компанія Булат, Інститут електрозварювання ім. Патона	Визнач. бар'єри входження в ринок	Визнач. фактори сили постачальників	Визна. фактори сили споживачів	Фактори загроз з боку замінника
Висновки :	Партнерські засади	є можливості входу в ринок. Немає потенційних конкурентів, що могли б ввійти на ринок	Вартість порошків для наплавлення. Все залежить від ціни на метал на лондонській біржі	Клієнти не диктують умови роботи на ринку	Немає

За результатами аналізу таблиці зробимо висновок про те, що існує принципова можливість роботи на ринку з огляду на конкурентну ситуацію. Також можемо зробити висновок щодо характеристик (сильних сторін), які має наш проект, щоб бути конкурентоспроможним на ринку.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в таблиці 4.9., а також із урахуванням характеристик ідеї проекту, вимог споживачів до товару та факторів маркетингового середовища визначимо та обґрунтуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз таких чинників представлено в таблиці 4.10.

Таблиця 4.10. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Швидка адаптованість технології під запити покупця	Лазерне випромінювання є безконтактним інструментом, тому можливості виростити деталь будь-якої складності
2	Відсутність обмежень щодо конфігурації відновлюваної деталі	Лазерне випромінювання є безконтактним інструментом, тому можливості виростити деталь будь-якої конфігурації
3	Відсутність обмежень щодо матеріального складу відновлюваної деталі	Широка різноманітність порошків для лазерної наплавки, а також, використання багатоканальних сопел для подачі газо-порошкової суміші

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 4.10.) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 4.11.).

Таблиця 4.11. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін

№ п/ п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з ... (назва підприємства)						
			-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
1	Швидка адаптованість технології під запити покупця	20	+						
2	Відсутність обмежень щодо конфігурації відновлюваної деталі	20	+						
3	Відсутність обмежень щодо матеріального складу відновлюваної деталі	20	+						

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних “Strength” та слабких “Weak” сторін, загроз “Troubles” та можливостей “Opportunities” (таблиця 4.12.) на основі виділених ринкових загроз, можливостей, та сильних і слабких сторін.

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринку можливостей є наслідками (прогнозованими результатами) впливу факторів, і на вімину від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення. Наприклад: зниження доходів потенційних споживачів – фактор загрози, на основі якого можна зробити прогноз щодо посилення значущості цінового фактору при

виборі товару та відповідно, – цінової конкуренції (а це вже – ринкова загроза).

Таблиця 4.12.SWOT- аналіз стартап-проекту

Сильні сторони	Слабкі сторони: Вартість технологічного процесу
Можливості: Перехід від одиничного до масового виробництва. Продаж ліцензій	Загрози: Вплив людського фактору на результат лазерного наплавлення в мобільних центрах з лазерного відновлення деталей

На основі SWOT-аналізу розробимо альтернативи ринкової поведінки (перелік заходів) для виведення стартап-проекту на ринок та орієнтовний оптимальний час їх ринкової реалізації з огляду на потенційні проекти конкурентів, що можуть бути виведені на ринок.

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (таблиця 4.13.).

Таблиця 4.13.Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

№ п/п	Альтернатива (орієнтовний комплекс заходів) ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Створення розгалуженої мережі демонстраційних центрів із залученням іноземних партнерів	За програмою «One road one belt» Китайської народної республіки – велика імовірність отримання грантів	1-2 роки з моменту перших інвестицій
	Створення спільного підприємства	Невелика	4-5 роки

Перша альтернатива містить в собі великі переваги і має всі шанси бути реалізованою, оскільки для неї отримання ресурсів є більш простим та ймовірним, а строки реалізації – більш стислими.

#### 4.6 Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (таблиця 4.14.).

Таблиця 4.14. Вибір цільових груп потенційних споживачів

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	Виробники та користувачі лопаток для турбін	Готові	Відновлення 20-30 лопаток на місяць	низька	проста
2	Виробники та користувачі великогабаритних різальних інструментів	Готові	Відновлення 20-30 протяжок на місяць	висока	проста
3	Користувачі поліграфічного обладнання (з анілоксовими валами)	Скоріше не готові, ніж готові	Не відомо	низька	проста
Які цільові групи обрано: Виробники та користувачі лопаток для турбін та користувачі поліграфічного обладнання (з анілоксовими валами)					

За результатами аналізу потенційних груп споживачів (сегментів) обираємо стратегію диференційованого маркетингу. Для роботи в обраних сегментах ринку необхідно сформувавши базову стратегію розвитку (таблиця 4.15.).

Таблиця 4.15. Визначення базової стратегії розвитку

№ п/п	Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
1	Створення розгалуженої мережі демонстраційних центрів із залученням іноземних партнерів	Диференційований маркетинг	Швидка адаптованість технології під запити покупця Відсутність обмежень щодо конфігурації відновлюваної деталі Відсутність обмежень щодо матеріального складу відновлюваної деталі	Стратегія диференціації

Тепер виберемо стратегію конкурентної поведінки (таблиця 4.16.).

Таблиця 4.16.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
	Ні	Забирати існуючих у конкурентів	Ні	Стратегія виклику лідера

На основі вимог споживачів з обраних сегментів до постачальника (стартап-компанії) та до продукту, а також в залежності від обраної базової стратегії розвитку та стратегії конкурентної поведінки розробляємо стратегію позиціонування (таблиця 4.17.). що полягає у формуванні ринкової позиції (комплексу асоціацій), за яким споживачі мають ідентифікувати торгівельну марку/проект.

Таблиця 4.17.Визначення стратегії позиціонування

№ п/п	Вимоги до товару цільової аудиторії	Базова стратегія розвитку	Ключові конкурентоспроможні позиції власного стартап-проекту	Вибір асоціацій, які мають сформувавши комплексну позицію власного проекту (три ключових)
	Точність, якість та час відновлення	Стратегія диференціації	Багатоканальні сопла для лазерного відновлення деталей	Знаю як, зможу будь де, мінімальна фінішна обробка

#### 4.7 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у таблиці 4.18. потрібно підсумувати результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

Таблиця 4.18.Визначення переваг концепції потенційного товару

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)
	Відновлення деталей	Оперативність, точність, якість	Робота 24\7

Нажаль через обмеженість інформації щодо наявних потреб українських споживачів було вирішено не створювати маркетингової кампанії для даної послуги. Наразі вивчається можливість просування цієї

послуги компаніям за кордоном та створення в Україні хабу з відновлення деталей.

#### Висновки:

- Наразі є можливість ринкової комерціалізації проекту (наявний скритий попит, динаміка ринку, рентабельність роботи на ринку);
- Також є перспективи впровадження з огляду на потенційні групи клієнтів, бар'єри входження, стан конкуренції, конкурентноспроможність проекту;
- Для ринкової реалізації проекту бажано обрати альтернативу «Створення розгалуженої мережі демонстраційних центрів із залученням іноземних партнерів»
- Подальша імплементація проекту є доцільною. [15]

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Проведена робота дозволила вирішити задачу по дослідженню газо-порошкової суміші сформованими щілинними соплами.

Основні результати і висновки роботи:

1. Проведений теоретичний аналіз існуючих технологій наплавлення поверхонь. Досліджені особливості, переваги та недоліки лазерного газо-порошкового наплавлення.
2. Досліджені основні методи технології лазерного наплавлення та технологічні фактори, що впливають на процес лазерного наплавлення. Також проведене теоретичне опрацювання способів подачі порошку в зону обробки, впливу параметрів режиму лазерного наплавлення з примусовою подачею порошку на формування наплавлених шарів та методу лазерного наплавлення при подачі порошку в зону обробки одночасно з впливом лазерного випромінювання.
3. Були розроблені моделі витікання газо-порошкової суміші із сформованих щілинних сопел з повним між канальним ребром та укороченим на циліндричну заготовку та плоску. Зроблені висновки щодо впливу форми між канального ребра на швидкість газо-порошкової суміші. Побудовані графіки залежностей розподілу швидкості в перерізі струменю газо-порошкової суміші, яка витікає із сопла з повним та укороченим між канальним ребром.
4. Була проведена спроба створення стартап-проекту, але через обмеженість інформації щодо наявних потреб українських споживачів автором було вирішено не створювати маркетингової кампанії для даної послуги.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <http://tutmet.ru/wp-content/uploads/2015/10/provoloka-svarochnaja-poroshkovaja-naplavki-tehnologija-primenenie-5.jpg>
2. <https://novosibirsk.shtorm-its.ru/info/articles/tekhnologiya-dugovoy-naplavki-metallov/>
3. <http://delta-grup.ru/bibliot/30/133.htm>
4. <http://tutmet.ru/wp-content/uploads/2015/10/provoloka-svarochnaja-poroshkovaja-naplavki-tehnologija-primenenie-3.jpg>
5. <http://tutmet.ru/provoloka-svarochnaja-poroshkovaja-naplavki-tehnologija-primenenie.html>
6. Процессы упрочнения и нанесения покрытий с использованием лазерного излучения Хаскин В.Ю. Автоматическая сварка 2008, с. 24-32
7. <http://www.plackart.com/coatings/lazernaya-naplavka.html>
8. Григорьянц А.Г., Шиганов И.Н., Мисюров А.И. Технологические процессы лазерной обработки . – Москва: МГТУ им. Е.Э. Баумана, 2006. – 662.
9. [http://www.sciencebsea.bgita.ru/2014/mashin\\_2014\\_19/asutin\\_eksper.files/443x222ximage002.jpg.pagespeed.ic.rzA38XNILb.webp](http://www.sciencebsea.bgita.ru/2014/mashin_2014_19/asutin_eksper.files/443x222ximage002.jpg.pagespeed.ic.rzA38XNILb.webp)
10. [http://www.sciencebsea.bgita.ru/2014/mashin\\_2014\\_19/asutin\\_eksper.files/414x219ximage003.jpg.pagespeed.ic.b65xqDWC7T.webp](http://www.sciencebsea.bgita.ru/2014/mashin_2014_19/asutin_eksper.files/414x219ximage003.jpg.pagespeed.ic.b65xqDWC7T.webp)
11. [http://www.science-bsea.bgita.ru/2014/mashin\\_2014\\_19/asutin\\_eksper.htm](http://www.science-bsea.bgita.ru/2014/mashin_2014_19/asutin_eksper.htm)
12. <http://tutmet.ru/lazernaja-naplavka-svarka-poverhnosti-metalla-tehnologija.html>
13. Kinnas, S. A. (2011). ANSYS FLUENT :, (Fall), 1–23.
14. Розроблення стартап-проекту [Електронний ресурс] : Методичні рекомендації до виконання розділу магістерських дисертацій для студентів

інженерних спеціальностей / За заг. ред. О.А. Гавриша. – Київ : НТУУ «КПІ»,  
2016. – 28 с.

15. <https://infopedia.su/14x1475b.html>