

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет машинобудування, екології та хімічних технологій

Кафедра обладнання видобувних та перероблювальних комплексів

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри

_____ А.А. Топоров
(підпис) (ініціали, прізвище)

“ ____ ” _____ 2020 року

ВИПУСКНА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

_____ Магістр

на тему: «Підвищення ефективності роботи установки для створення захисних покриттів методом холодного газодинамічного напилення.»

Виконав: магістр 2-го курсу, групи ТПМм-19

спеціальності 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Техніка переробки сировинних матеріалів»

_____ Полякова Юлія Павлівна

(прізвище та ініціали)

_____ (підпис)

Керівник доц.,к.т.н. Трет'яков Павло Васильович

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

_____ (підпис)

Рецензент _____

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

_____ (підпис)

Засвідчую, що у цій дипломній роботі немає за-позичень з праць інших авторів без відповідних посилань.

Студент _____
(підпис)

Покровськ – 2020 р.

ДВНЗ «Донецький національний технічний університет»

Факультет Машинобудування, екології та хімічних технологій

Кафедра «Обладнання видобувних та перероблювальних комплексів»

Освітній ступінь магістр

Спеціальність 133 Галузеве машинобудування, спеціалізації «Техніка переробки сировинних матеріалів»

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри:

_____ А.А.Топоров
 (підпис) (ініціали, прізвище)
 “ _____ ” _____ 2020 року

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА

Поляковій Юлії Павлівні

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: «Підвищення ефективності роботи установки для створення захисних покриттів методом холодного газодинамічного напилення»

керівник роботи Трет'яков Павел Васильович, доц., к.т.н.

затверджені наказом по університету від „___” _____ 20__ р. № _____

2. Строк подання студентом роботи _____

3. Вихідні дані до роботи _____

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) _____

5. Перелік графічного матеріалу (з точною вказівкою обов'язкових креслень) _____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання _____

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів випускної кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Написання теоретичної частини (Розділ 1)		
2	Моделювання роботи установки (Розділ 2)		
3	Аналіз результатів моделювання та створення параметричного креслення сопла (розділ 3, 4)		
4	Розробка заходів з підвищення ефективності установки (розділ 5)		
5	Підготовка презентації		
6	Оформлення пояснювальної записки		

Студент _____
(підпис)Полякова Ю.П.
(прізвище та ініціали)Керівник роботи _____
(підпис)Трет'яков П.В.
(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

Полякова Ю.П. Підвищення ефективності роботи установки для створення захисних покриттів методом холодного газодинамічного напилання / Випускна кваліфікаційна робота на здобуття освітнього ступеня «магістр» за спеціальністю 133 Галузеве машинобудування (спеціалізація «Техніка переробки сировинних матеріалів»). – ДВНЗ ДонНТУ, Покровськ, 2020.

Одним з актуальних завдань розвитку технології холодного газодинамічного напилання і її широкого застосування в різноманітних галузях промисловості, є можливість отримання покриттів з наперед заданими властивостями з максимальною ефективністю напилання, ґрунтуючись на дослідженні комплексних параметрів процесу напилання, виду та розмірів сопла, процесів, які відбуваються у нагрівачі газу тощо. У даній роботі запропоновано напрямки підвищення ефективності установок для холодного газодинамічного розпилення. Створено параметричне креслення сопла Лавалю. Розроблено базу даних установки. Завдяки участі у програмі DAAD (Німецька служба академічних обмінів) на базі Технічного Університету міста Кайзерслаутерн (Німеччина) було проведено моделювання роботи установки за допомогою чисельних розрахунків та симуляцій з використанням програми FEM ABAQUS/Explicit. Окрема подяка висловлюється професору та доктору технічних наук Антонюку Сергію за допомогу у проведенні досліджень.

Метою роботи є розробка заходів для підвищення ефективності роботи установки для створення захисних покриттів методом холодного газодинамічного напилання.

Об'єкт дослідження – процеси при створенні захисних покриттів методом холодного газодинамічного напилання та роботи установки.

Предмет дослідження – підвищення ефективності установки для холодного газодинамічного напилання.

Методи дослідження – робота у програмах MS Excel, Mathcad, ABAQUS, Access, опрацювання нормативної документації, літературних джерел у процесі написання кваліфікаційної роботи, пошук необхідної інформації та її систематизація.

ХОЛОДНЕ ГАЗОДИНАМІЧНЕ НАПИЛЕННЯ, МОДЕЛЮВАННЯ, ABAQUS, УДАРНА ПОВЕДІНКА, СОПЛО ЛАВАЛЯ, БАГАТОКАНАЛЬНИЙ НАГРІВАЧ ГАЗУ, ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ, БАЗА ДАНИХ, ПАРАМЕТРИЗАЦІЯ

Список публікацій:

1. Петряєв М. В. Порівняльно-оглядова характеристика екструдерних та грануляційних установок/ М. В. Петряєв, Ю. П. Полякова та ін.// ISSN 2308-51312 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство» No1(16)'2019: стаття. – с. 37. – Покровськ: ДонНТУ, 2019. УДК 631.363.28.

2. Полякова Ю. П. Огляд установок для холодного газодинамічного напилення/ Ю. П. Полякова, О. Ю. Герасименко та ін.// ISSN 2308-51312 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство» No1(16)'2019: стаття. – с. 53. – Покровськ: ДонНТУ, 2019. УДК 621.793.7.

3. Полякова Ю. П. Дослідження ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів/ Ю. П. Полякова, О. Ю. Герасименко та ін.// ISSN 2308-51312 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство» No1(16)'2019: стаття. – с. 53. – Покровськ: ДонНТУ, 2019. УДК 621.793.7.

4. Герасименко О.Ю. Вплив мікроструктури поверхні на ударну поведінку дрібних частинок в різних ситуаціях / О.Ю. Герасименко, Ю. П. Полякова та ін.// ISSN 2308-51312 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство» No1(16)'2019: стаття. – с. 53. – Покровськ: ДонНТУ, 2019. УДК 621.793.7.

ANNOTATION

Poliakova Yuliia. Improving the efficiency of the installation to create protective coatings / Qualification work for obtaining an educational degree "Master" in specialty 133 "133 Sectoral engineering" (specialization "Equipment of processing technological complexes"). – DonNTU, Pokrovsk, 2020.

One of the urgent tasks of cold gas-dynamic spraying technology development and its wide application in various industries is the possibility of obtaining coatings with predetermined properties with maximum spraying efficiency, based on the study of complex parameters of the spraying process, nozzle type and size, processes occurring in the heater, gas, etc. In this work the directions of increase of efficiency of installations for cold gas-dynamic spraying are offered. A parametric drawing of the Laval nozzle is created. An installation database has been developed. Thanks to participation in the DAAD program (German Academic Exchange Service) at the Technical University of Kaiserslautern (Germany), the installation was modeled using numerical calculations and simulations using the FEM ABAQUS / Explicit program. Special thanks are expressed to Professor and Doctor of Technical Sciences Sergiy Antonyuk for assistance in conducting the research.

The purpose of the work is to increase the efficiency of the installation to create protective coatings by cold gas-dynamic spraying.

The object of research - the processes of creating protective coatings by cold gas-dynamic spraying and operation of the installation.

The subject of research is to increase the efficiency of the installation for cold gas-dynamic spraying.

Research methods - work in MS Excel, Mathcad, ABAQUS, Access, development of regulatory documentation, literature sources in the process of writing a qualification work, search for the necessary information and its systematization.

COLD GAS DYNAMIC SPRAYING, SIMULATION, ABAQUS, IMPACT BEHAVIOR, LAVAL NOZZLE, MULTICHANNEL GAS HEATER, EFFICIENCY IMPROVEMENT, DATABASE, PARAMETRIZATION

List of publications:

1. Petryaev M. Comparative and review characteristics of extruder and granulation plants (Porivnialno-ohliadova kharakterystyka ekstrudernykh ta hranuliatsiinykh ustanovok) / Petryaev M., Polyakova Y. etc. // ISSN 2308-51312 Scientific works of DonNTU. Series: «Mechanical Engineering and Mechanical Engineering» No. 1 (16) '2019: article. – p. 37. – Pokrovsk: DonNTU, 2019. UDC 631.363.28.

2. Polyakova Y. Review of installations for cold gas-dynamic spraying (Ohliad ustanovok dlia kholodnoho hazodynamichnoho napyleniia) / Polyakova Y., Gerasimenko O. etc.// ISSN 2308-51312 Scientific works of DonNTU. Series: «Mechanical Engineering and Mechanical Engineering» No. 1 (16) '2019: article. – p. 53. – Pokrovsk: DonNTU, 2019. UDC 621.793.7.

3. Polyakova Y. Investigation of the impact behavior of a particle when interacting with a substrate by the finite element method (Doslidzhennia udarnoi povedinky chastky pry vzaiemodii z pidkladkoiu metodom kintsevykh elementiv) / Polyakova Y., Gerasimenko O. etc.// ISSN 2308-51312 Scientific works of DonNTU. Series: «Mechanical Engineering and Mechanical Engineering» No. 1 (16) '2019: article. – p. 53. – Pokrovsk: DonNTU, 2019. UDC 621.793.7.

4. Gerasimenko O. Influence of surface microstructure on impact behavior of small particles in different situations (Vplyv mikrostruktury poverkhni na udarnu povedinku drobnykh chastynok v riznykh sytuatsiiakh)/ Gerasimenko O., Polyakova Y., etc.// ISSN 2308-51312 Scientific works of DonNTU. Series: «Mechanical Engineering and Mechanical Engineering» No. 1 (16) '2019: article. – p. 53. – Pokrovsk: DonNTU, 2019. UDC 621.793.7.

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	10
ВСТУП.....	15
1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ	17
1.1 Актуальність створення захисних покриттів	17
1.2 Технологія отримання захисних покриттів	18
1.3 Місце холодного газодинамічного напилення серед інших методів порошкового напилення	20
1.4 Основні складові установки для холодного газодинамічного напилення.. ..	26
1.5 Огляд установок для холодного газодинамічного напилення	29
1.6 Пошук заходів з підвищення ефективності роботи установки для холодного газодинамічного напилення	37
1.7 Постановка задачі дослідження.....	38
2 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ.....	39
2.1 Модель надзвукового сопла.....	39
2.2 Модель багатоканального нагрівача газу	42
2.3 Методологія створення моделі ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів з використанням ABAQUS	47
2.4 Створення базової моделі для проведення симуляції в ABAQUS.....	50
3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ	65
3.1 Аналіз розробленої моделі надзвукового сопла	65

3.2 Аналіз сумісності критеріїв чисельної моделі багатоканального нагрівача газу	69
3.3 Результати моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою при різних температурах частки.....	75
3.4 Результати моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою при різних температурах частки та підкладки	81
4 РОЗРОБКА ПАРАМЕТРИЧНОЇ 3D-моделі та КРЕСЛЕННЯ СОПЛА лавалю	90
4.1 Постановка задачі.....	90
4.2 Геометричні зв'язки і обмеження.....	91
4.3 Таблиці зовнішніх змінних	98
4.4 Розробка параметричного креслення	101
5 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З Підвищення ефективності роботи установки ДЛЯ холодного газодинамічного наповнення	105
5.1 Вдосконалення обладнання установки	105
5.2 Моделювання ударної взаємодії частки та підкладки, як спосіб створення захисного покриття	106
5.3 Створення бази даних установки для холодного газотермічного наповнення	109
5.4 Створення запитів для бази даних.....	121
ВИСНОВКИ.....	126
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	130
ДОДАТОК А.....	135

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

Розділ 1:

ВХН – вакуумне холодне напылення;

ЕН – ефективність напылення

ІГН – імпульсне газодинамічне напылення;

КМ – кінетична металізація;

МАО – метод аерозольного осадження;

НДІ – науково-дослідний інститут;

ХГН – холодне газодинамічне напылення;

ХРВТ – холодний розпилювач високого тиску;

ХРНТ – холодний розпилювач низького тиску;

d_p – розмір частки, *мкм*;

h_n – менший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, *мм*;

L_h – довжина нагрівального елемента, *м*;

M_{ex} – число Маха;

$m_{пок}$ – маса покриття, *кг*;

$m_{пор}$ – маса порошку, *кг*;

T – температура робочого матеріалу, *°C*;

T_0 – температура гальмування газу, *°C*;

T_{pm} – температура плавлення матеріалу частки, *°C*;

V_{pi} – швидкість зіткнення частинки, *м/с*;

V_{cr} – критичне значення швидкості частинки, *м/с*;

u_{cr1} – перша критична швидкість частки, *м/с*;

u_p – поздовжня компонента швидкості частки, *м/с*.

Z_0 – відстань від перерізу сопла до підкладки, *м*;

Z_w – товщина стиснутого шару, *мкм*

Розділ 2:

AISI 316L – марка нержавіючої сталі.

c_f – коефіцієнт опору тертя;

c_p – теплоємність газу, *Дж/(кг·К)*;

D – діаметр частки, *мкм*;

d_h – внутрішній діаметр нагрівального елемента, *м*;

G – витрата газу, *м³/год*;

G_h – витрата газу всередині трубки, *м³/с*;

$G_{p\ max}$ – максимально можлива витрата порошку через сопло, *м³/год*;

H_n – більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, *мм*;

h_{cl} – товщина напилювального за один прохід покриття, *м*;

JS – модель поведінки матеріалу Джонсона-Кука;

k_d – коефіцієнт напилення;

L_h – довжина нагрівального елемента, *м*;

Nu – число Нуссельта;

N_h – кількість нагрівальних елементів (трубок);

P_m – продуктивність па масі, *кг/с*;

P_h – максимальна потужність нагрівача, *Вт*.

P_s – продуктивність за площиною напилення, *м²/год*;

p_0 – тиск гальмування газу, *МПа*;

p_h – густина газу всередині трубки, *кг/м³*;

R – постійна газу, *Дж/(моль·К)*;

Re_h – число Рейнольдса течії газу всередині трубки;

S_{cr} – площа критичного перерізу сопла, *м²*;

T – температура робочого матеріалу, $^{\circ}\text{C}$;

T_0 – температура гальмування газу, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{h_{max}}$ – максимальна температура підігріву газу, $^{\circ}\text{C}$;

T_{hex} – температура газу на виході нагрівального елемента, $^{\circ}\text{C}$;

T_{hin} – температура газу на вході та виході нагрівального елемента, $^{\circ}\text{C}$;

T_m – температура плавлення робочого матеріалу, $^{\circ}\text{C}$.

T_{room} – кімнатна температура, $^{\circ}\text{C}$;

T_{su} – температура Сезерленда, $^{\circ}\text{C}$.

T_{wex} – температура внутрішньої поверхні нагрівального елемента, $^{\circ}\text{C}$;

u_h – швидкість газу всередині трубки, м/с ;

u_s – швидкість переміщення поверхні, що напиляється, відносно зрізу сопла, м/с ;

α – коефіцієнт теплопередачі.

γ – показник адіабати;

Δp_h – гідравлічний опір нагрівача, МПа ;

ϵ – пластична деформація;

$\dot{\epsilon}_0$ – еталон швидкості пластичної деформації, с^{-1} ;

λ – коефіцієнт теплопровідності газу.

μ – динамічна в'язкість газу всередині трубки, $\text{Па}\cdot\text{с}$;

μ_0 – в'язкість газу в середині трубки при температурі K ;

ρ_c – щільність покриття, кг/м^3 ;

σ_{eq} – напруження матеріалу.

Розділ 3:

AISI 316L – марка нержавіючої сталі.

b_{cr} – розмір критичного перерізу прямокутного сопла, мм ;

c_p – теплоємність газу, Дж/(кг·К);
 d_h – внутрішній діаметр нагрівального елемента, м;
 G_h – витрата газу всередині трубки, м³/с;
 h_{cl} – товщина покриття, яке напиляється за один прохід, мкм;
 H_n – більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, мм;
 h_n – менший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, мм;
 JC – модель поведінки матеріалу Джонсона-Кука;
 k_d – коефіцієнт напилення;
 L_h – довжина нагрівального елемента, м;
 L_n – довжина надзвукової частини сопла, мм;
 M_{ex} – число Маха;
 N_h – кількість нагрівальних елементів (трубок);
 p_0 – тиск гальмування газу, МПа;
 P_s – продуктивність за площиною напилення, м²/год;
 R_h – опір нагрівача, Ом;
 S_{cr} – площа критичного перерізу сопла, мкм;
 T_0 – температура гальмування газу, °С;
 T_{hex} – температура газу на виході нагрівального елемента, °С;
 T_{hin} – температура газу на вході та виході нагрівального елемента, °С;
 U – робоча напруга джерела, Вт.
 $u_{s\ max}$ – максимально можлива швидкість переміщення поверхні, м/с;
 α_{cr} – критичний кут розширення пневмоканалу;
 α_n – кут розширення пневмоканалу;
 δ_h – товщина стінки нагрівального елемента, м;
 ρ_c – щільність покриття, кг/м³;
 p_h – гідравлічний опір нагрівача, МПа.

Розділ 4:

САРП – система автоматизованого проектування.

Розділ 5:

БД – база даних;

СУБД – система управління базами даних;

ХГН – холодне газодинамічне наплення;

JS – модель поведінки матеріалу Джонсона-Кука.

ВСТУП

Сучасне обладнання, яке працює у важких умовах, піддається механічним, тепловим та хімічним навантаженням, тому для захисту поверхні такого обладнання створюються захисні покриття.

У якості матеріалів для захисного покриття зазвичай використовуються метали, від властивостей яких залежать захисні характеристики покриття. З існуючих методів створення захисних покриттів виокремлюється холодне газодинамічне напилення, яке має певні переваги у порівнянні з іншими методами.

Холодне газодинамічне напилення (далі ХГН) – це метод нанесення покриття, який полягає у наступному: металеві частки майбутнього покриття розміром 1-50 *мкм* прискорюються до надзвукової швидкості (до 1200 *м/с*) потоком холодного або підігрітого газу (повітря, гелію, азоту тощо), унаслідок чого під час ударної взаємодії частки деформуються та утворюють покриття на поверхні, яка напиляється. Основна відмінність такого методу напилення від інших полягає у тому, що температура газопорошкової суміші не перевищує температури плавлення матеріалу, який використовується для створення покриття, а сам процес напилення відбувається в основному за рахунок високої швидкості напилювального потоку.

Сучасні установки для ХГН становляться все більш затребуваними у виробництві, але це не відмінняє того факту, що існує необхідність у підвищенні їх ефективності.

Установки для ХГН бувають різними: від великогабаритного обладнання для нанесення захисного покриття на труби великих розмірів до невеликих установок пістолетного типу, які використовуються для фарбування важкодоступних ділянок.

Складовими установки є сопло, дозатор часток та нагрівач газу. Сопло відповідає за прискорення газопорошкової суміші і від того, які конструктивні параметри має сопло, напряму залежить якість майбутнього захисного покриття.

Дозатор часток призначений для подачі часток певного розміру у камеру для змішування з газом. Нагрівач газу, призначений для підігріву робочого газу до необхідної температури, що має вплив на процес прискорення суміші газу та часток, що напиляється.

Вдосконалення конструкції обладнання установки та вибір оптимальних параметрів для отримання високоякісного покриття – один із напрямків підвищення ефективності установки, а у якості методів вирішення такої задачі може використовуватися чисельне моделювання та параметризація.

Другий напрямок підвищення ефективності установки є дослідження процесу напилення. Процесу руху часток у соплі присвячено багато досліджень, але додаткових досліджень потребує сам процес взаємодії під час удару частки о підкладку. Одним із способів проведення такого дослідження є моделювання ударної поведінки з використанням спеціального програмного забезпечення.

Таким чином, ця робота присвячена вдосконаленню конструкції обладнання установки та дослідженню ударної поведінки, яка відбувається між часткою та підкладкою, яка напиляється.

1 АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИКОРИСТАННЯ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

1.1 Актуальність створення захисних покриттів

В даний час темпи розвитку промисловості такі, що застосування традиційних конструкційних матеріалів уже не в змозі вирішити проблему збільшення ресурсу в екстремальних умовах експлуатації техніки. У зв'язку з цим доцільно шукати принципово нові наукові підходи до вибору конструкційних матеріалів та їх захисту, починаючи зі стадії проектування. Наприклад, застосування конструкційних матеріалів на основі тугоплавких металів, таких як молібден, вольфрам, тантал, ніобій тощо, взагалі неможливо без захисних покриттів. Володіючи необхідними механічними властивостями при високих температурах, ці матеріали окислюються вже при нагріванні до 1000-1200 K [1].

Тому використання антикорозійних, зносостійких і інших видів покриттів в техніці може істотно знизити матеріальні, енергетичні і трудові витрати на експлуатацію машин і механізмів, скоротити простої устаткування, збільшити випуск продукції, підвищити її якість і ресурс, значно зменшити витрату легуючих сталей і сплавів. Це обумовлює значущість проблеми формування захисних покриттів як радикального шляху підвищення довговічності деталей машин, механізмів і металоконструкцій.

Застосування функціональних покриттів дозволяє реалізувати принципово новий підхід до використання конструкційних матеріалів. Наукова концепція цього підходу полягає в тому, що механічна міцність конструкції гарантується властивостями матеріалу основи. Опір впливу зовнішніх факторів (корозії, зносу, термічним, хімічним, радіаційним та іншим навантажень) досягається локальним формуванням на поверхні широкої гами (за складом і призначенням) тонких шарів

покриттів з інших матеріалів. В результаті, забезпечується підвищена довговічність металоконструкції навіть в екстремальних умовах експлуатації. При використанні захисних покриттів виявляються інші корисні якості такі як, зниження маси виробів, поліпшення механічних, тепло-фізичних, електричних та інших властивостей. Реалізується економія дорогих легуючих елементів [2].

В результаті застосування різнофункціональних покриттів можуть бути створені вироби з унікальним поєднанням властивостей, недосяжним при використанні традиційних конструкційних матеріалів. Наприклад, можна в кілька разів підвищити жароміцність і термостійкість конструкції, досягти в необхідних випадках аморфного стану робочої поверхні деталей тощо. Все це покращує експлуатаційні характеристики виробів в цілому.

Все це визначає актуальність проблеми, необхідність розробки наукових основ формування захисних покриттів.

1.2 Технологія отримання захисних покриттів

Нанесення зносо-, корозійно- і жаростійких, а також електро- і теплоізоляційних покриттів спрямовано на скорочення втрат металів при експлуатації машин, устаткування і споруд, а також на підвищення їх якості, надійності і довговічності.

Технологія отримання захисних покриттів включає в себе підготовку поверхні основи, формування на поверхні основи шару покриття з вихідних матеріалів необхідної структури і заданого хімічного складу і (при необхідності) подальшу термічну або термомеханічну обробку нанесеного шару для додання останньому необхідних властивостей і створення міцного зв'язку між шаром, що формується, і основою. Міцність зчеплення при нанесенні покриттів забезпечується за рахунок таких процесів, як схоплювання, спікання, змочування тощо. Для протікання цих процесів (крім термодинамічних умов) необхідні чистота і активування поверхонь.

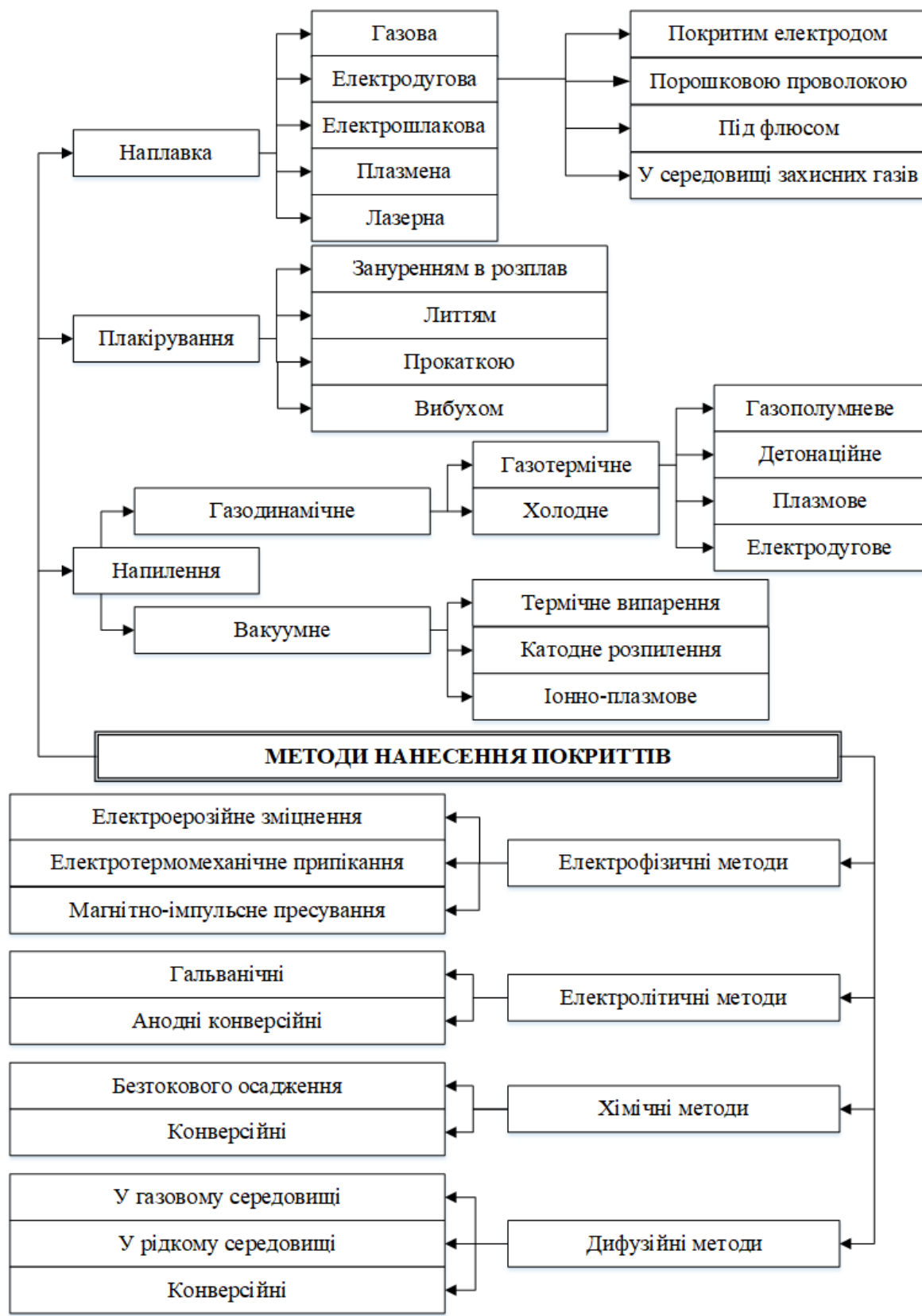


Рисунок 1.1 – Методи нанесення захисних покриттів

Очищення поверхні передбачає видалення органічних (жирів, мастила) і неорганічних (плівок оксидів, солей, гідратів) з'єднань і інших забруднень. Способи підготовки поверхонь поділяються на хімічні, фізичні, механічні та комбіновані (фізико-хімічні, хіміко-механічні, фізико-механічні). Хімічні способи очищення поверхні припускають знежирення і травлення виробів в органічних і неорганічних розчинах кислот, лугів, а також в розплавах. Спосіб очищення відпалом в відновлювальній атмосфері також слід віднести до хімічних способів. Фізичні способи очищення засновано на використанні для цих цілей різних фізичних явищ. До механічних способів відносяться різні методи зняття поверхневого шару з виробу механічним шляхом. Комбіновані способи підготовки поверхні включають травлення в розчинах з накладенням ультразвукових коливань, відпалювання з електроіскровим створенням шорсткості, відпалювання з зачисткою щіткою, обробку в барабанах з розчином лугу тощо. Вибір способу очищення поверхні визначається видом і характером виробництва, розмірами деталі, її хімічним складом тощо. На рисунку 1.1 зображено існуючі методи нанесення захисних покриттів та їх класифікацію [3].

Нанесення покриттів як процес поверхневої обробки матеріалів характеризується різноманіттям методів і широтою їх застосування.

1.3 Місце холодного газодинамічного напилення серед інших методів порошкового напилення

Серед великого класу методів нанесення покриттів та модифікації поверхні – хімічних [4], електрохімічних (гальванічних) [5], термохімічних (цементация, азотування, ціанування тощо), фізичних [6] (лазерне і електронно-променеве порошкове наплавлення) особливе місце займають наступні методи порошкового напилення – газополум'яний [7], плазмовий, детонаційний [8] та їх різновиди [9]. Великий науковий і практичний інтерес до цих методів обумовлений їх широкими

можливостями як по виду напilenня речовин, створення гомогенних і гетерогенних матеріалів покриттів, так і можливості обробки виробів різного типорозміру і геометрії. Слід підкреслити, що технічні властивості матеріалу покриття обумовлюються для кожного методу конкретними процесами фізико-хімічної взаємодії між двофазним потоком (газ + частинки) і перешкодою, а також складовими його фазами. При цьому визначальний вплив на властивості надають динамічні (швидкість, кінетична енергія частинок) і температурні умови формування покриттів, стабільність цих параметрів у часі, рівномірність розподілу полідисперсних частинок по перетину тощо.

Загальним для всіх газотермічних методів є те, що матеріал покриття нагрівається і прискорюється в високотемпературному газовому потоці. На поверхню підкладки напилування матеріал надходить у вигляді дрібних розплавлених або пластифікованих частинок, які, вдаряючись об неї, деформуються і, закріплюючись, утворюють суцільне покриття [10].

У методах нанесення покриттів з порошкових матеріалів (газополум'яний, плазмовий тощо) можливості варіювання кінетичної енергії частинок, що розпилюються, обмежені. Поліпшення якості покриттів в цьому випадку досягається наступними способами:

- вдосконалення якості вихідної підготовки поверхні підкладки;
- підігрів підкладки в процесі напилування;
- застосування металевих підшарів;
- використання дрібнодисперсних порошків і потужних плазмотронів з відповідними розмірами і конфігурацією розпилювальних сопел;
- застосування високоентальпійних матеріалів;
- створення контрольованого навколишнього середовища;
- подальша спеціальна обробка покриттів;
- перегрів частинок, що напилуються тощо.

Однак багато технологічних та конструкторських задач, що виникають при створенні нових зразків техніки, не можуть бути вирішені за допомогою цих методів напилення. Тому з'явилась необхідність у пошуку та розробці нових методів нанесення покриттів. [10, 11]

Поряд з очевидними досягненнями в області газотермічних методів нанесення покриттів виявлено ряд факторів негативного характеру, пов'язаних з використанням високотемпературних струменів. Це, звичайно ж, накладає певні обмеження на області застосування даних методів.

При русі порошку в високотемпературному струмені можуть відбутися значні зміни його властивостей (окислення, фазові переходи, розкладання тощо), що в ряді випадків є причиною неможливості нанесення покриттів з певними, заданими властивостями.

Наявність високих температур в багатьох випадках робить абсолютно неможливим нанесення композиційних покриттів з механічної суміші порошків, що значно розрізняються за фізико-хімічними властивостями.

Зі зменшенням розміру часток, що використовуються при напиленні, поліпшується заповнення покриття – щільність його збільшується, обсяг мікропорожнеч зменшується, будова покриттів стає більш однорідною, з'являється можливість зменшити товщину покриття. Однак занадто дрібні порошки не можуть бути використані для газотермічних методів напилення, особливо це стосується нетугоплавких матеріалів, так як, будучи введеними в високотемпературну струмінь, такі порошки можуть в ній повністю випаруватися. З цієї причини для напилення цими методами зазвичай використовують порошки розміром більше 10 мкм [12].

Наявність високотемпературного струменя може стати причиною істотного нагрівання оброблюваного виробу (особливо при покритті на досить дрібні деталі).

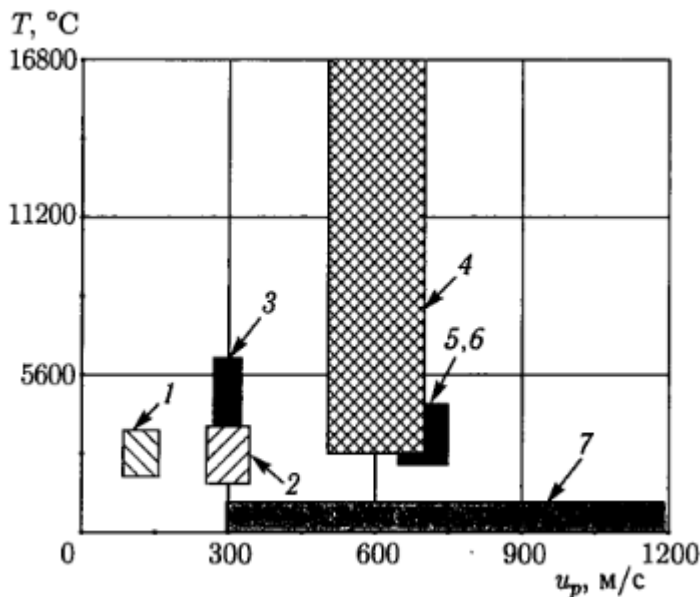
В процесі напилення частки можуть розкладатися, а також утворювати при високих температурах різні токсичні сполуки, що викликає необхідність проведення

додаткових робіт по захисту обслуговуючого персоналу. До вже зазначених вище недоліків традиційних методів напилення (плазмовий і детонаційно-газовий) слід додати складність і високу вартість обладнання, малий ресурс роботи окремих вузлів, а також складність управління процесом напилення. Все це є причиною необхідності пошуку і створення нових методів напилення [13].

В [14] під час дослідження обтікання тіл надзвуковим двофазним потоком «повітря + тверді частинки» було виявлено утворення міцного металевго шару на лобовій поверхні тіла в умовах «холодного» обтікання, тобто при температурі гальмування газу $T_o \approx 300 \text{ K}$. Відсутність високих температур, характерних для газотермічних методів напилення, дозволяє говорити, що в даному випадку було реалізовано новий метод нанесення покриття, який був названий авторами методом «холодного» газодинамічного напилення.

Порівняння основних параметрів двофазного потоку, при яких реалізується метод ХГН, з параметрами, властивими традиційним методам напилення [15], показує, що вони істотно розрізняються (рис. 1.2). Згідно з раніше поширеною думкою, для формування покриттів необхідно, щоб падаючі частки перебували в розплавленому або передрозплавленому стані. Даний метод показав, що наявність високих температур у струмені, не є обов'язковою умовою та покриття можна отримувати з часток, що мають температуру значно менше їх температури плавлення, а це відкриває широкі можливості для створення нових технологій та нової техніки для напилення [16].

Дослідження [17] показали визначальну роль величини швидкості частинок u_p , що обумовлює процес формування покриття. Для всіх матеріалів частинок з розміром $d_p \leq 50 \text{ мкм}$ існують критичні швидкості взаємодії їх з підкладкою ($u_{cr_1} = 500-600 \text{ м/с}$).



1 – низькошвидкісний газополум’яний; 2 – високошвидкісний газополум’яний;
 3 – електродуговий; 4 – плазмовий; 5, 6 – детонаційний та високошвидкісний
 рідкопаливний; 7 – ХГН; T – температура робочого матеріалу, $^{\circ}\text{C}$; u_p – поздовжня
 компонента швидкості частки, м/с

Рисунок 1.2 – Діаграма використовуваних значень температури та швидкості часток для порівняння різноманітних методів напилення.

Тобто при взаємодії з підкладкою твердих металевих частинок спостерігається класичний процес ерозії, якщо швидкість частинок менше критичної. При швидкостях більше критичної процес ерозії переходить в процес напилення, причому в залежності від швидкості частинок в дуже широких межах змінюються і властивості покриттів, такі як адгезія, пористість, мікротвердість тощо. З цього випливає, що швидкість чи кінетична енергія частинок є найбільш важливим параметром при напиленні методом ХГН.

Таким чином, сутність методу ХГН полягає в тому, що попередньо сформовану газопорошкову суміш з частками розміром 0,01-50 $\mu\text{м}$ (що витікає з дозатора)

прискорюють в надзвуковому холодному чи підігрітому потоці повітря або іншого газу (гелій, азот), з температурою істотно меншою ніж температура плавлення матеріалу часток ($T_0 = 0,4 - 0,7T_{pm}$), і направляють на поверхню, що напиляється. В результаті ударної взаємодії часток з перешкодою на останній формується покриття з пластично деформованих часток порошку, що напиляється [10].

У порівнянні з термічними способами, метод ХГН має низку переваг:

1. Нанесення покриття в повітряній атмосфері відбувається при нормальному тиску, при будь-якій температурі і вологості атмосферного повітря;
2. При нанесенні покриттів виявляється незначний тепловий вплив на виріб, що покривається (виріб у зоні нанесення покриття не нагрівається вище 100-150 °C), що виключає виникнення внутрішніх напружень у виробах і їх деформацію, а також окислення матеріалів покриття і деталі;
3. Технологія нанесення покриттів екологічно безпечна (відсутні високі температури, небезпечні гази і випромінювання, немає хімічно агресивних відходів, що вимагають спеціальної нейтралізації);
4. При впливі високошвидкісного потоку напилювальних частинок відбувається очищення поверхні від технічних забруднень, олій, фарб та активація кристалічної решітки матеріалу виробу;
5. Потік напилювальних частинок є вузькоспрямованим і має невеликий поперечний переріз. Це дозволяє, на відміну від традиційних газотермічних методів напилення, наносити покриття на локальні (з чіткими кордонами) ділянки поверхні виробів;
6. Можливе нанесення багатокомпонентних покриттів зі змінним змістом компонентів по його товщині;
7. Можливо нанесення різних типів покриттів за допомогою однієї установки;
8. Можливе використання обладнання не тільки в стаціонарних, але і в польових умовах.

Єдиним недоліком газодинамічного напилення є можливість нанесення покриттів тільки з відносно пластичних металів, таких як мідь, алюміній, цинк, нікель тощо [18].

1.4 Основні складові установки для холодного газодинамічного напилення

Загальну схему установки для холодного газодинамічного напилення зображено на рисунку 1.3.

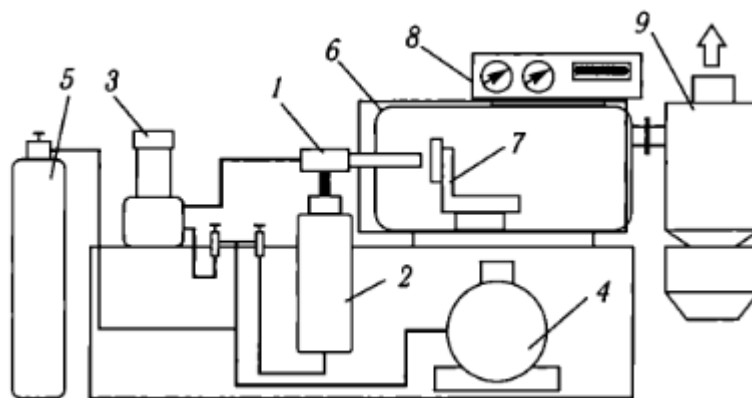


Рисунок 1.3 – Схематичне зображення установки ХГН

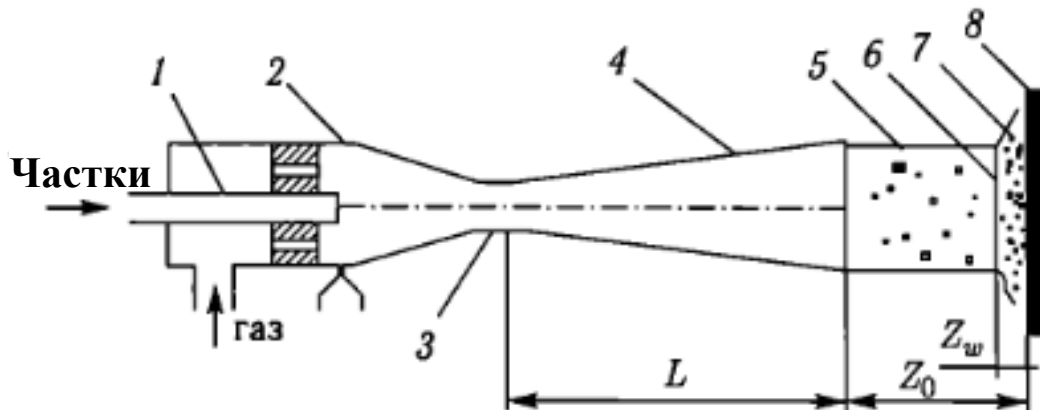
Основними елементами установки є: вузол напилення 1, що складається з форкамери і плоского надзвукового сопла; підігрівач газу 2; дозатор частинок 3; джерело стисненого повітря 4; джерело гелію 5; камера напилення 6; координатник 7 для переміщення напилювальної підкладки; пульт управління і контролю параметрів (тиск газу в форкамері і дозаторі, температура газу в форкамері) 8; сепаратор часток 9.

Установка повинна забезпечувати [10]:

- можливість регулювання у широких межах (200-1200 м/с);

- рівномірність концентрації часток у струмені з можливістю її регулювання у широких межах;
- постійність технологічних параметрів (тиск та температура гальмування) в форкамері надзвукового сопла.

Серед перерахованих вище основних вузлів установки ХГН, головним, найбільшою мірою визначаючим роботу установки, є надзвукове сопло (рис. 1.4). Проведені в [14] дослідження показали, що при практичній реалізації методу ХГН можуть використовуватися плоскі сопла, що забезпечують мінімальну товщину стисненого шару газу перед перешкодою і рівномірне нанесення покриття на великій площі. Менший розмір вихідного перетину сопла становить $h_n = 2-3$ мм при довжині надзвукової частини сопла $L_n = 80-120$ мм і числі Маха на зрізі сопла $M_{ex} = 2,0-3,0$, що дозволяє отримати надзвуковий двофазний струмінь з необхідною швидкістю частинок.



- 1 – трубка введення часток в форкамеру; 2 – форкамера; 3 – критичний переріз; 4 – надзвукова частина сопла; 5 – ділянка вільного струменя; 6 – головна ударна хвиля; 7 – стиснутий шар; 8 – перешкода; Z_0 – відстань від перерізу сопла до підкладки, м; Z_w – товщина стиснутого шару, мм

Рисунок 1.4 – Схема газодинамічного тракту прискорення часток у надзвуковому соплі, руху їх у вільному струмені та гальмування у стиснутому шарі

Для вирішення деяких завдань, особливо там, де необхідно максимально локалізувати пляму напилювання, використовуються також і осесиметричні сопла.

Іншим важливим в установці ХГН вузлом є дозатор частинок, який повинен забезпечувати рівномірну керовану подачу порошку в форкамеру сопла. Більшість застосовуваних для ХГН порошків мають розміри частинок 1-50 *мкм*. Такі частинки мають погану сипучість, що ускладнює використання багатьох традиційних способів дозування порошку.

Принцип роботи дозатора часток описано далі по тексту. Порошок, що знаходиться у вертикальній циліндричній ємності, під власною вагою падає на дозуючий барабан, що обертається за допомогою електроприводу. Порошок захоплюється пазами (заглибленнями), розташованими на циліндричній поверхні барабана і падає в змішувальну камеру, де змішується з повітрям (або іншим газом) і захоплюється ним у вихідний патрубок і, далі, в надзвукове сопло. Газ, що рухається від вхідного патрубку до змішувальної камері, очищає зубці барабана від налиплого порошку. Пропускний патрубок вирівнює тиск в ємності для порошку і в корпусі, манометр служить для контролю тиску. Привід на основі електродвигуна постійного струму дозволяв змінювати швидкість обертання дозуючого барабана від 0,03 *об./с* до 0,1 *об./с* і, відповідно, витрату порошку. Маючи набір барабанів з різною глибиною пазів, можна змінювати витрату порошку в широких межах 0-5 *г/с*. Випробування змішувачів-дозаторів показали їх високу надійність при відсутності помітних пульсацій концентрації частинок в струмені. Важливим фактором, особливо при експериментальних роботах в процесі відпрацювання технології, є можливість в даному дозаторі використовувати досить невелику кількість порошку (50-100 *г*) і швидко його змінити без суттєвого розбирання дозатора. Даний дозатор, який має барабан з малою кількістю пазів, забезпечує дуже малі витрати частинок, що дозволяє,

зокрема, використовувати його при проведенні експериментів по взаємодії з поверхнею підкладки одиночних частинок.

Нагрівач газу призначений для підігріву робочого газу з певною витратою G до необхідної температури. При цьому він повинен відповідати таким вимогам:

- бути простим у виготовленні, надійним і зручним в експлуатації;
- не вносити в пневмотрасу істотного гідродинамічного опору;
- мати мінімальні габарити, при цьому не повинно бути занадто енергонапружених вузлів.

Основний принцип розробки нагрівача полягає в тому, щоб підібрати необхідну кількість тепловиділяючих каналів певної довжини і діаметру, проходячи через які повітря за рахунок теплообміну буде нагріватися до заданої температури.

Дана схема роботи дозволяє набрати необхідний омичний опір нагрівача (за рахунок послідовно-паралельного з'єднання) і істотно знизити його гідродинамічний опір. Окремим випадком є нагрівач, що складається з однієї трубки. У наступному розділі представлені рекомендації щодо розрахунку багатоканального нагрівача при типових для ХГН умовах [10].

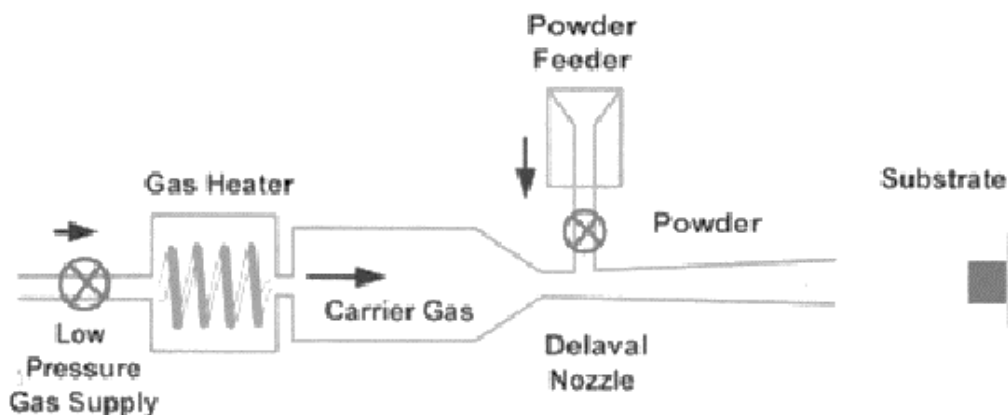
1.5 Огляд установок для холодного газодинамічного наплення

В даний час існує два основних типи систем ХГН: холодний розпилювач високого тиску (ХРВТ) (рис. 1.5) [22], в якому частинки впорскуються до горловини розпилювальної форсунки від подачі газу високого тиску [19] і холодний розпилювач низького тиску (ХРНТ) (рис. 1.6) [22], в якому порошки вводяться в розбіжні секції розпилювального сопла з подачею газу низького тиску [20]. Системи ХРНТ, як правило, набагато менше, портативні і обмежені швидкостями частинок $300-600 \text{ мс}^{-1}$. Вони використовуються при застосуванні більш легких матеріалів, і вони зазвичай використовують легкодоступне повітря або азот в якості газів-витискувачів. Замість

цього в системах високого тиску використовуються частки з більш високою щільністю. Вони використовують гази більш високого тиску, є стаціонарними і зазвичай генерують швидкості частинок $800-1400 \text{ м/с}^{-1}$. Гази з більш низькою масою, такі як азот або гелій, є кращими газами-витискувачами для ХРВТ.

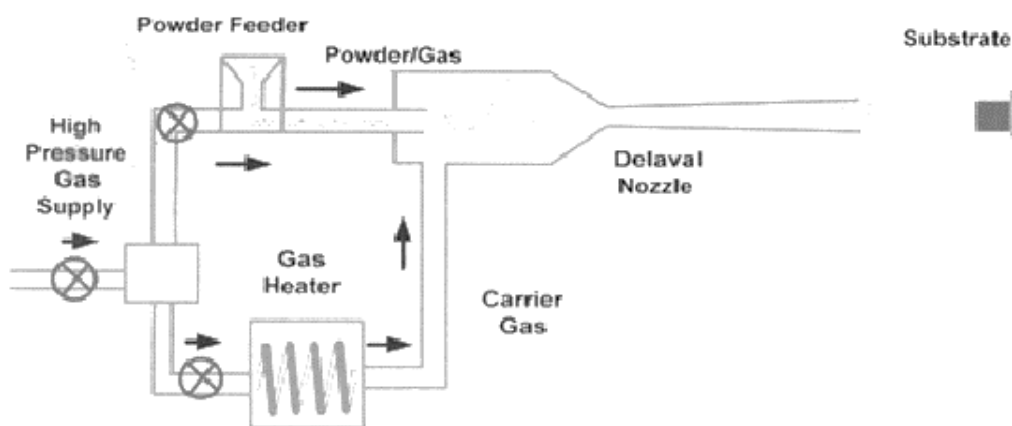
Обидві вищезгадані системи мають деякі обмеження. У системах ХГН (високого тиску) подачі порошку вгору по потоку, щоб уникнути зворотного потоку порошку, необхідно використовувати механізм подачі порошку високого тиску, що працює під тиском, що перевищує тиск в основному газовому потоці. Порошкові живильники високого тиску зазвичай дуже великі і дорогі. Інша серйозна проблема пов'язана із засміченням сопла. Це більш серйозно, коли швидкість і температура частинки збільшуються. Щоб вирішити цю проблему, друга популяція часток з великим середнім діаметром частинок або більш високою межею плинності (знаходиться, як відношення твердості до модуля пружності) повинна бути змішана з першою популяцією частинок [21]. Іншим недоліком системи ХРВТ є сильний знос горловини форсунки через ерозію частинок, що впливає на роботу форсунки і призводить до значних змін в умовах експлуатації і якості відкладень. Це стає гірше, коли розпорошуються тверді частинки.

З іншого боку, системи ХГН (низького тиску) подачі порошку нижче по потоку мають більш просте обладнання. Однак конструкція сопла в цьому випадку обмежена відносно низьким числом Маха на виході (зазвичай 3). Тиск на вході також обмежена (зазвичай 1 МПа), інакше атмосферний тиск більше не зможе подавати порошки в сопло. В результаті нижня швидкість подачі порошку може бути досягнута завдяки відносно низьким швидкостям частинок [23].



Low Pressure Gas Supply – подача газу низького тиску; Gas Heater – газовий обігрівач; Carrier Gas – газ-носіє; Powder Feeder – порошкова годівниця; Delaval Nozzle – сопло Лаваля; Powder – порошок; Substrate – підкладка

Рисунок 1.5 – Схематичне зображення холодного розпилювача низького тиску



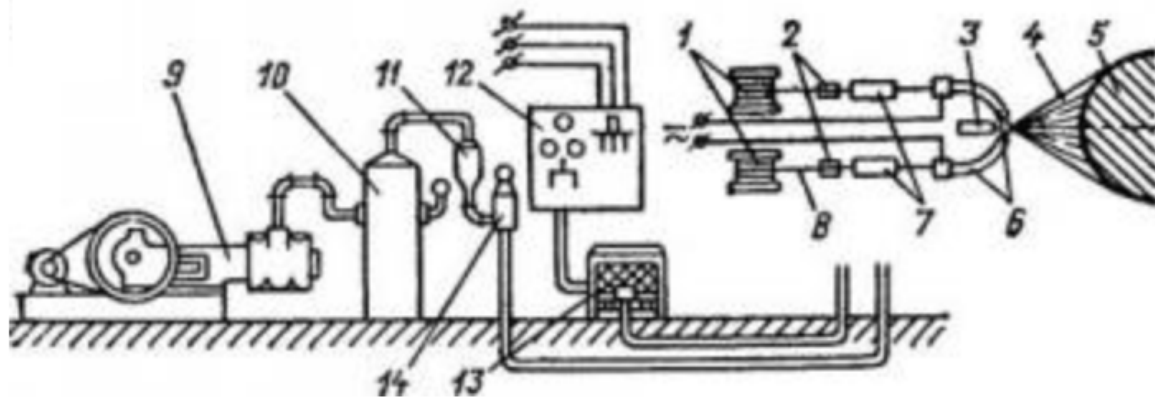
Powder Feeder – порошкова годівниця; Powder/Gas – порошок/газ; Substrate – підкладка; High Pressure Gas Supply – подача газу високого тиску; Gas Heater – газовий обігрівач; Carrier Gas – газ-носіє; Delaval Nozzle – сопло Лаваля

Рисунок 1.6 – Схематичне зображення холодного розпилювача високого тиску

З розвитком процесу ХГН, було проведено ряд досліджень, щоб представити технологію і її основні принципи [24], і, отже, були вивчені потенційні застосування

ХГН в різних областях [25]. Зовсім недавно в цю технологію були внесені деякі зміни. Далі буде представлено різні варіанти стандартного апарату ХГН.

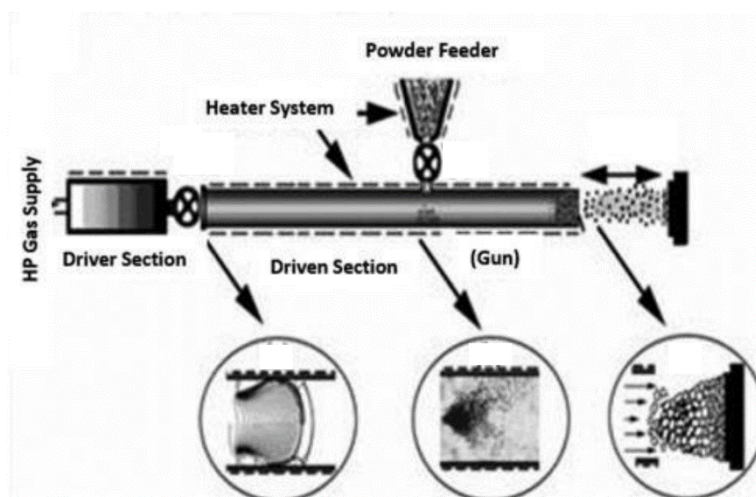
Перший метод називається кінетичною металізацією (КМ) (рис. 1.7), яка також є твердотілим процесом [26]. КМ є варіантом ХГН, в якому для забезпечення швидкості газу на виході (число Маха 1) використовується конвергентне сопло циліндра в умовах засміченого потоку з невеликим розходженням для компенсації ефектів тертя. Покриття КМ характеризуються низькою пористістю або відсутністю пористості і чисто металевої, дуже дрібнозернистої мікроструктурою. Ніякої попередньої обробки поверхні або термічного управління не потрібно. У більшості інших систем ХГН (включаючи холодне розпорошення під низьким тиском) використовується конвергентно-дивергентне сопло Лавалю для прискорення технологічного газу до надзвукової швидкості [23].



1 – барабани з електродним дротом; 2, 7 – ролики; 3 – сопло; 4 – струмінь; 5 – деталь; 6 – прийомні трубки; 9 – компресор; 10 – повітряний редуктор; 11 – масловіддільник; 12 – електрощит; 13 – трансформатор; 14 – редуктор з манометром

Рисунок 1.7 – Схематичне зображення кінетичної металізації

Інший варіант установки ХГН називається імпульсним газодинамічним напиленням (ІГН) (рис. 1.8) [27]. Цей процес полягає у тому, що частки нагріваються до проміжної температури (все ще нижче температури плавлення), яка, як очікується, буде вище, ніж температура, яка спостерігаються в процесі ХГН. Підвищення температури призведе до зниження критичної швидкості, яка має технологічну цінність. Крім того, це призводить до більш високого рівня пластичної деформації при збереженні тієї ж швидкості удару. Цей процес також має переривчасту природу, в якій використовуються нестационарні хвилі тиску для одночасного генерування більш високих тиску і температури, ніж в процесі ХГН (де існує безперервний, стаціонарний потік) [23].

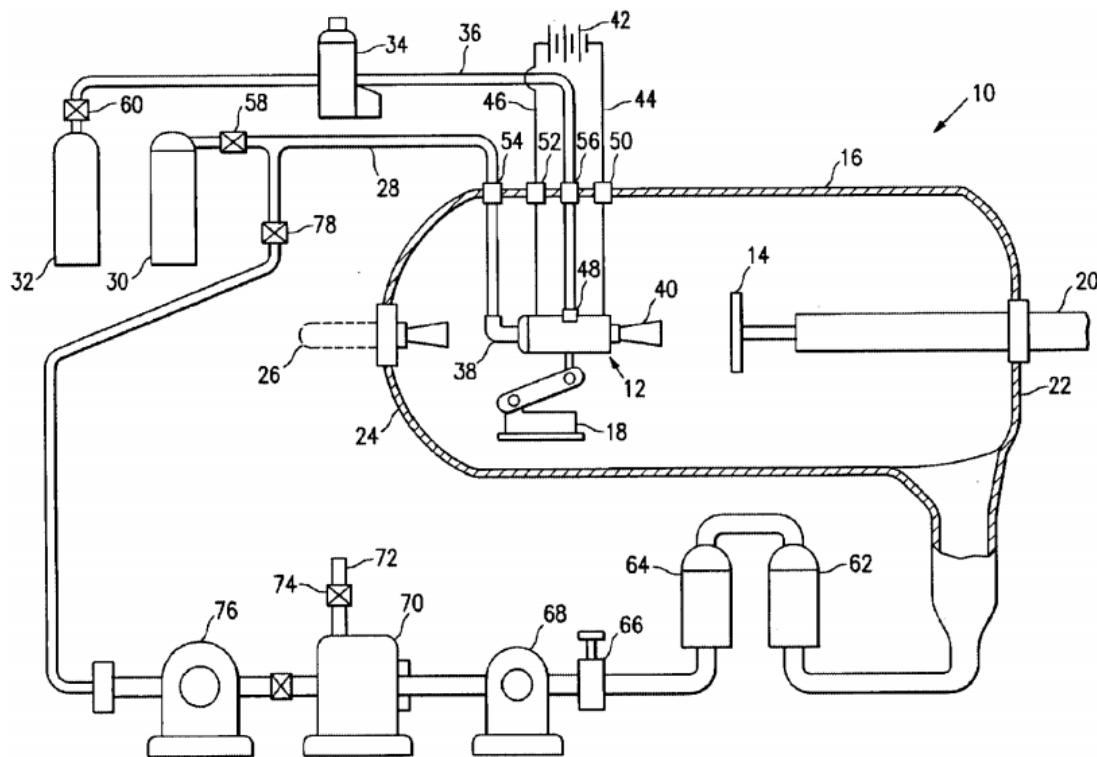


Heater System – система обігрівача; Powder feeder – порошкова годівниця; Gun – пістолет; Driver Section – відділ управління; HP Gas Supply – подача газу високого тиску

Рисунок 1.8 – Схематичне зображення імпульсного газодинамічного напилення

Інший варіант ХГН називається вакуумним холодним напиленням (ВХН) (рис. 1.9) [22]. У цьому процесі зразок поміщається в вакуумний резервуар з тиском, який

істотно менше атмосферного тиску. Серед низького тиску забезпечується вакуумним резервуаром, сполученим з вакуумним насосом. Вакуумний резервуар дозволяє витягувати газ і збирати надмірну кількість порошку [28].



10 – система ХГН низького тиску; 12 – пістолет-розпилювач низького тиску;
 14 – заготовка; 16 – вакуумний бак; 18 – робот маніпуляції з пістолетом; 20 –
 пристрій маніпулювання заготовкою; 22, 24 – торцеві стінки вакуумного баку; 28 –
 магістральна газова лінія; 30, 32 – контейнери для зберігання газу; 34 – порошкова
 годівниця; 36 – лінія подавання газу; 38 – кінець вводу холодного розпилювача
 низького тиску; 40 – розпилювальне сопло; 42 – джерело електроживлення; 44, 46 –
 протилежні силові кабелі; 48 – поєднуюча точка; 50, 52, 54, 56 – фітинги; 58, 60, 66,
 74, 78 – клапани; 62, 64 – фільтри; 68 – вакуумний насос; 70 – передній насос; 72 –
 вихлопна труба; 76 – газовий компресор

Рисунок 1.9 – Схематичне зображення вакуумного холодного наплення

Варто відзначити, що була також розкрита аналогічна конструкція, яка називається методом аерозольного осадження (МАО). У цьому процесі наночастинки розпорошуються у вакуумній камері з використанням газового потоку палива з гелію або повітря. У цьому методі тиск газу-витискувача також нижче атмосферного тиску, і досягнута швидкість нижче, ніж для ХГН. Цей процес значно зменшує присутність ударної хвилі на підкладці або ефект ударної хвилі, дозволяючи брати в облогу дуже дрібні частинки.

При статичному тиску всього 10 атмосфер (147 фунтів на квадратний дюйм) швидкість виходу газу збільшується через високий відношення загального тиску в пістолеті до вихідного тиску навколишнього середовища. Швидкості виходу газу збільшуються, і швидкості часток також збільшуються. Процес розпилення повністю стриманий, не містить шуму і пилу.

Через більш низький загальний тиск в пістолеті масова витрата газу зменшується до однієї третини у порівнянні з рівними числами Маха (швидкостями виходу газу) при атмосферному тиску. Розпилення порошку здійснюється легко і ефективно, і рециркуляція дорогих газів, таких як гелій, здійснюється простим додаванням ступені газового компресора в систему. При більш низькому атмосферному тиску розпилювальне сопло (40, рис. 1.9) можна усунути, щоб збільшити розпилювальний струмінь і, таким чином, покрити великі заготовки. Використання інертного газу і створеної таким чином інертної атмосфери дозволяє нагрівати порошок без окислення [23].

ХГН є процесом нанесення покриття з високою швидкістю осадження, який використовує кінетичну, а не теплову енергію. Сировина порошку залишається значно нижче температури плавлення. Усунення шкідливого впливу високої температури на покриття і підкладки дає значні переваги і нові можливості, що робить ХГН перспективним для багатьох промислових застосувань. Кількість досліджень в цій

області швидко зростає. У цьому огляді була зроблена спроба представити сучасний стан досліджень і розробок у цій галузі з матеріальної точки зору.

При підготовці огляду було визначено, що експериментальні дослідження становлять основну частину сукупності знань в цій області, і менше уваги приділяється основним принципам і комп'ютерному моделюванню. У таблиці 1.1 відображено стислий огляд вищеописаних систем ХГН [23].

Таблиця 1.1 – Порівняння систем холодного газодинамічного напилення

Назва системи ХГН	Принцип роботи	Переваги	Недоліки
Холодний розпилювач високого тиску (ХРВТ)	Частинки впорскуються до горловини розпилювальної форсунки від подачі газу високого тиску	• Конструкція сопла обмежена відносно низьким числом Маха (3); • Обмежений тиск на вході (1 МПа)..	• Великі та дорогі порошкові живильники; • Засмічення сопла; • Сильний знос горловини форсунки; • Складне обладнання;
Холодний розпилювач високого тиску (ХРНТ)	Порошки вводяться в розбіжні секції розпилювального сопла з подачею газу низького тиску	• Просте та компактне обладнання;	• Конструкція сопла обмежена відносно низьким числом Маха на виході
Кінетична металізація (КМ)	Для забезпечення швидкості газу на виході використовується конвергентне сопло циліндра в умовах засміченого потоку з невеликим розходженням для компенсації ефектів тертя	• Покриття КМ характеризуються низькою або відсутністю пористості та чистою металевою, дуже дрібнозернистою мікроструктурою.	• Складне обладнання;
Імпульсне газодинамічне напилення (ІГН)	Процес полягає у тому, що частки нагріваються до проміжної температури, яка, як очікується, буде вище, ніж температура, яка спостерігається в процесі ХГН	• Більш високий рівень пластичної деформації при збереженні тієї ж швидкості удару; • Використовуються нестационарні хвилі тиску для одночасного генерування більш високих тиску і температури, ніж в процесі ХГН; • Просте обладнання;	• Металургійні перетворення, або термічні реакції як в порошку, так і в підкладці

Продовження таблиці 1.1

Вакуумне холодне напилення (ВХН)	У цьому процесі зразок поміщається в вакуумний резервуар з тиском, який істотно менше атмосферного тиску.	• Процес значно зменшує присутність ударної хвилі на підкладці або ефект ударної хвилі, дозволяючи брати в облогу дуже дрібні частинки; • Збільшена швидкість газу та часток; • Зменшена витрата газу; • Легке та ефективне розпилення; • Процес розпилення повністю стриманий, не містить шуму і пилу;	• Складне обладнання;
----------------------------------	---	---	---

1.6 Пошук заходів з підвищення ефективності роботи установки для холодного газодинамічного напилення

Однією з важливих характеристик процесу ХГН є ефективність напилення. Її залежність від параметрів процесу напилення (температура і тиск гальмування потоку, матеріал, форма і розмір часток порошку, дистанція і кут напилення, тип робочого газу тощо) дозволяє більш глибоко зрозуміти природу процесу ХГН, і як наслідок, встановити, як ці параметри впливають на властивості покриття. Ефективність напилення ЕН зазвичай визначається як відношення приросту маси зразка $m_{\text{пок}}$ (маса покриття) до маси використаного для отримання даного покриття порошку $m_{\text{пор}}$, виражається у відсотках [29]:

$$\text{ЕН} = \left(\frac{m_{\text{пок}}}{m_{\text{пор}}} \right) \cdot 100\% \quad (1.1)$$

Досить добре відомо, що формування покриттів при ХГН здійснюється в результаті високошвидкісного зіткнення часток порошку об поверхню підкладки з подальшою їх деформацією. Виникаюча адіабатична нестійкість зсуву забезпечує

достатню течію матеріалу і нагрів для формування зв'язків на кордоні частки і підкладки [30]. Обов'язковою умовою для формування покриття є швидкість зіткнення частинки. Утворення зв'язків відбувається за умови, якщо швидкість зіткнення частинки V_{pi} перевищує критичне значення V_{cr} [31]. Залежність швидкості частинок від великої кількості факторів (що ускладнює вибір оптимальних параметрів напilenня) і визначення впливу комплексних параметрів процесу ХГН на ефективність процесу формування покриттів є актуальним завданням розвитку технології. Раніше проведені роботи по вивченню газодинаміки процесу ХГН, зіткнення частинок об підкладку, а також властивостей покриттів, дозволили виділити параметри, в більшій мірі впливають на процес напilenня: температура [32] і тиск гальмування повітря [33], дистанція напilenня [34], матеріал напильованого порошку і розмір часток [35]. Проте, залишається відкритим питання визначення оптимальних параметрів для досягнення максимальної ефективності формування покриттів.

1.7 Постановка задачі дослідження

Метою роботи є підвищення ефективності роботи установки для створення захисних покриттів методом холодного газодинамічного напilenня. Поставлена мета роботи є вирішенням ряду основних задач:

1. Моделювання роботи установки для холодного газодинамічного напilenня з чисельним розрахунком надзвукового сопла та багатоканального нагрівача газу.
2. Моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів за допомогою ABAQUS.
3. Розробка параметричної 3D-моделі та креслення сопла.
4. Базуючись на результатах проведеного моделювання створення бази даних установки для холодного газодинамічного напilenня.

2 МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Моделювання роботи установки для холодного газодинамічного наплення полягає у виконанні наступних задач:

1. Створення чисельної моделі для розрахунку продуктивності сопла по масі. Ця модель повинна враховувати не тільки параметри сопла, а також дозатора часток та нагрівача газу. Мета створення моделі – оцінка шляхів підвищення продуктивності.

2. Створення чисельної моделі багатоканального нагрівача газу з попередньо заданими припущеннями. Мета створення моделі – розрахунок основних параметрів нагрівача за умов дотримання заданих припущень (максимальна температура підігріву газу, ступінь нагрівання патрубків, забезпечення розвинутого турбулентного режиму, певний гідравлічний опір нагрівача та сумарний прохідний переріз нагрівальних елементів).

3. Створення чисельної моделі ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів з використанням ABAQUS. Мета створення – отримання базової моделі для проведення подальших симуляцій удару частки о підкладку з урахуванням різних параметрів (швидкість частки, температура частки та підкладки, матеріали тощо)

2.1 Модель надзвукового сопла

При помірних та малих концентраціях часток їх швидкість можна розраховувати у приближенні руху поодинокі частки, тобто не враховувати вплив часток на параметри течії газу. Для такого розрахунку необхідно попередньо дослідити експериментально та чисельно, течію газу в соплах, що використовуються

при ХГН, течію від зрізу сопла до ударної хвилі, від головної ударної хвилі до підкладки (див. рис. 1.4).

У деяких практичних випадках необхідні соплові вузли мають велику продуктивність по площі ($\text{м}^2/\text{год}$). Зокрема це відноситься до процесу високопродуктивного нанесення антикорозійного покриття на металопрокат і труби. Зв'язок параметрів основних вузлів (дозатор, нагрівач газу, соплової вузол) з продуктивністю по масі можна записати так:

$$P_m = u_s H_n h_{cl} \rho_c, \quad (2.1)$$

де P_m – продуктивність па масі, $\text{кг}/\text{с}$;

u_s – швидкість переміщення поверхні, що напиляється, відносно зрізу сопла, $\text{м}/\text{с}$;

H_n – більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, м ;

h_{cl} – товщина напилювального за один прохід покриття, м ;

ρ_c – щільність покриття, $\text{кг}/\text{м}^3$.

Максимально можлива витрата порошку через сопло $G_{p \max}$ – така витрата, при якій вплив дисперсної фази на параметри течії всередині надзвукового сопла ще не дуже істотний. Дослідження показують, що ця витрата рівна приблизно половині витрати газу $G_{p \max} = 0,5G$, який для надзвукового сопла визначається за формулою:

$$G = p_0 S_{cr} \left(\frac{2}{\gamma + 1} \right)^{\frac{\gamma + 1}{2(\gamma - 1)}} \sqrt{\frac{\gamma}{RT_0}}, \quad (2.2)$$

де p_0 – тиск гальмування газу, МПа ;

S_{cr} – площа критичного перерізу сопла, м^2 ;

γ – показник адіабати;

R – постійна газу, Дж/(моль·К);

T_0 – температура гальмування газу, °С.

Для повітря

$$G = \frac{0,04p_0S_{cr}}{\sqrt{T_0}}, \quad (2.3)$$

Отже, для максимальної витрати порошку через сопло отримуємо:

$$G_{p \max} = 0,5G = \frac{0,02p_0S_{cr}}{\sqrt{T_0}}, \quad (2.4)$$

Продуктивність за масою дорівнює максимальній витраті порошку, помноженому на коефіцієнт напilenня k_d :

$$u_s H_n h_{cl} \rho_c = k_d \frac{0,02p_0S_{cr}}{\sqrt{T_0}}, \quad (2.5)$$

Продуктивність за площиною напilenня з цього виразу визначається як:

$$P_s = u_s H_n = k_d \frac{0,02p_0S_{cr}}{h_{cl}\rho_c\sqrt{T_0}}, \quad (2.6)$$

Виходячи з проведених перетворювань, P_s можна підвищувати тільки за рахунок збільшення площі критичного перерізу сопла S_{cr} , тому що p_0 , T_0 , технологічні параметри процесу напilenня; h_{cl} задається; ρ_c визначає щільність матеріалу покриття.

2.2 Модель багатоканального нагрівача газу

Модель нагрівача розроблюється на основі наступних умов та припущень:

1. Максимальна температура підігріву $T_{h_{max}}$ дорівнюється обраний (наприклад 250 °C):

$$\Delta T_{h_{max}} = (T_{hex} - T_{hin})_{max} = 250 \text{ }^{\circ}\text{C}, \quad (2.7)$$

де T_{hin} , T_{hex} – температура газу на вході та виході нагрівального елемента.

2. Поверхня трубок (в першу чергу це буде відбуватися на виході нагрівача) не повинна нагріватися вище температури, що визначається конструктивною міцністю матеріалу нагрівального елемента (наприклад 700 °C):

$$T_{wex} - T_{hex} \leq 450^{\circ}\text{C}, \quad (2.8)$$

де T_{wex} – температура внутрішньої поверхні нагрівального елемента.

3. Для інтенсивної теплопередачі від стінок трубок до газу необхідно забезпечити розвинутий турбулентний режим течії газу в трубках, що досягається при:

$$Re_h = \frac{p_h u_h d_h}{\mu} = \frac{4G_h}{\pi N_h d_h \mu} \geq 10^4, \quad (2.9)$$

де Re_h – число Рейнольдса течії газу всередині трубки;

p_h – густина газу всередині трубки, $\text{кг}/\text{м}^3$;

u_h – швидкість газу всередині трубки, $\text{м}/\text{с}$;

d_h – внутрішній діаметр нагрівального елементу, м;

μ – в'язкість газу всередині трубки, $Па \cdot с$;

G_h – витрата газу всередині трубки, $м^3/с$;

N_h – кількість нагрівальних елементів (трубок).

4. Необхідно забезпечити малий гідравлічний опір нагрівача Δp_h (витрати тиску), наприклад, $\Delta p_h \leq 0,1 МПа$.

5. Сумарний прохідний переріз нагрівальних елементів повинен бути, як мінімум, в два рази більше критичного перерізу сопла S_{cr} (9 мкм), тобто:

$$N_h \frac{\pi d_h^2}{4} \geq 2S_{cr}, \quad (2.10)$$

Необхідна максимальна потужність нагрівача P_h виражається через витрату G_h , максимальну температуру підігріву $T_{h_{max}}$ та теплоємність c_p газу:

$$P_h = G_h c_p (T_{hex} - T_{hin}), \quad (2.11)$$

Прирівнявши потужність та теплопередачу до одиниці довжини трубки, отримуємо:

$$\alpha \pi d_h (T_{wex} - T_{hex}) = \frac{G_h c_p (T_{hex} - T_{hin})}{N_h L_h}, \quad (2.12)$$

де L_h – довжина нагрівального елементу, м;

α – коефіцієнт теплопередачі.

Коефіцієнт теплопередачі обчислюється за формулою (3.7):

$$\alpha = \frac{\lambda Nu}{d_h}, \quad (2.13)$$

Для повітря при $Re_h \geq 10^4$ число Нуссельта можна оцінити за формулою $Nu \approx 0,018 Re^{0,8}$ [36]. Коефіцієнт теплопровідності газу λ для повітря оцінимо за формулою $\lambda \approx 1,41 \cdot 10^3 \mu$.

Залежність в'язкості повітря μ від температури визначається за формулою Сезерленда [37]:

$$\mu = \mu_0 \left(\frac{T_h}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_{su}}{T_h + T_{su}}, \quad (2.14)$$

де $T_0 = 273 \text{ K}$; $T_{su} = 124 \text{ K}$; $\mu_0 = 17,08 \cdot 10^{-6} \text{ кг/м}^3 \cdot \text{с}$; $c_p = 1,05 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг} \cdot \text{град}$ (для повітря).

Після всіх підстановок отримаємо з формули (2.12):

$$T_w - T_h = \left(\frac{G_h}{N_h \mu_0} \right)^{0,2} \frac{c_p (T_{hex} - T_{hin}) d_h^{0,8}}{96,7 L_h} \left[\left(\frac{T_h}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_{su}}{T_h + T_{su}} \right]^{0,8}. \quad (2.15)$$

З урахуванням формули (2.15) умова з формули (2.8) запишеться у вигляді

$$\left(\frac{G_h}{N_h \mu_0} \right)^{0,2} \frac{c_p (T_{hex} - T_{hin}) d_h^{0,8}}{96,7 L_h} \left[\left(\frac{T_h}{T_0} \right)^{\frac{3}{2}} \frac{T_0 + T_{su}}{T_h + T_{su}} \right]^{0,8} \leq 450 \text{ } ^\circ\text{C}. \quad (2.16)$$

Та після підстановки численних значень отримаємо один з критеріїв:

$$N_h \geq \frac{3,125 \cdot 10^8 G_h d_h^4}{L_h^5}. \quad (2.17)$$

У випадку нагрівача з одним нагрівальним елементом отримаємо відношення між довжиною нагрівального елемента та його діаметром:

$$L_h \geq 50 \cdot G_h^{0,2} d_h^{0,8}. \quad (2.18)$$

Розглянувши подібним чином критерій $Re_h \geq 10^4$, отримаємо:

$$N_h \leq \frac{7,45 G_h}{d_h}. \quad (2.19)$$

Для нагрівача з одним нагрівальним елементом отримаємо:

$$d_h \leq 7,45 G_h. \quad (2.20)$$

Гідродинамічний опір газу в трубці визначається за формулою [38]:

$$\Delta p_h = 4c_f \frac{L_h}{d_h} \rho_h \frac{u_h^2}{2}. \quad (2.21)$$

де c_f – коефіцієнт опору тертя.

Для $Re_h = 8 \cdot 10^3 - 10^7$ приймаємо апроксимацію у вигляді $c_f = 0,047 \cdot Re^{-0,2}$. Місцевим гідравлічним опором на вході та виході трубок можна знехтувати.

Підставив все у формулу (2.21) отримаємо:

$$\Delta p_h = 0,145 \frac{L_h G_h^{1,8} \mu^{0,2}}{\rho_h d_h^{4,8} N_h^{1,8}} \quad (2.22)$$

Наприклад, гідродинамічний опір трубчатого нагрівача ($L_h = 5$ м, $d_h = 8 \cdot 10^{-3}$ м) при нагріванні $0,03$ кг/с повітря при повному тиску $1,6$ МПа за формулою (2.22) буде дорівнювати $0,06$ МПа.

З критерію $\Delta p_h \leq 0,1$ МПа для робочого тиску $1,6$ МПа з урахуванням формули (2.22) отримаємо:

$$N_h \geq \frac{4,04 \cdot 10^{-5} G_h L_h^{5/9}}{d_h^{8/3}}. \quad (2.23)$$

Для нагрівача з одним елементом отримаємо:

$$L_h \leq 8,1 \cdot 10^7 \frac{d_h^{4,8}}{G_h^{1,8}}. \quad (2.24)$$

Умову на прохідний переріз можна записати у вигляді:

$$N_h \geq \frac{200 G_h \sqrt{T_{hex}}}{\pi p_0 d_h^2}. \quad (2.25)$$

Для нагрівача з одним нагрівальним елементом:

$$d_h^2 \geq \frac{200 G_h \sqrt{T_{hex}}}{\pi p_0}. \quad (2.26)$$

Витрата газу через надзвукове сопло визначається тиском p_0 та температурою T_{hex} газу у форкамері і розміром критичного січення сопла S_{cr} . Для робочих тисків $p_0 = 1,2 - 1,6$ МПа та температур $T_{hex} = 0 - 250$ °C витрата повітря через сопло з критичним перерізом $S_{cr} = 9 \cdot 10^{-6}$ м² буде змінюватися в межах $G = 0,018 - 0,033$

кг/с. В режимі передачі максимальної потужності від нагрівача до газу ($p_0 = 1,6 \text{ МПа}$, $T_{hex} = 250 \text{ }^\circ\text{C}$) витрата повітря $G_h = 0,0245 \text{ кг/с}$.

Таким чином завдяки створенню чисельної моделі багатоканального нагрівача газу було отримано чотири критерія, які відповідають заданим раніше припущенням.

2.3 Методологія створення моделі ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів з використанням ABAQUS

Діаметр частки був встановлений на $D = 2 \text{ мкм}$ для всіх симуляцій. Час кожної симуляції – $3,5 \text{ нс}$. Початкові швидкості були визначені для всіх вузлів частки і знаходяться між 100 і 1000 м/с (крок 100 м/с); 600 і 700 м/с (крок 10 м/с); 1000 і 2000 м/с (крок 200 м/с). Початкові температури були визначені для всіх вузлів частки і мали значення $25, 100, 200, 300, 400, 500$ і $600 \text{ }^\circ\text{C}$.

Для аналізу ударної взаємодії було використано шестигранні елементи континууму з додатковим ступенем температурної свободи і вісьмома вузлами кожен (C3D8RT). Після вибору відповідного елемента в ABAQUS створюється структурована сітка. Для цього геометрію необхідно було розбити, щоб ABAQUS міг створити мережу шестигранників. [39], який має як ступеня температури, так і свободу переміщення. Ефектами гравітації знехтували. Загальний контактний алгоритм з коефіцієнтом тертя $0,2$ був використаний для всіх розглянутих випадків.

У даній роботі використовувалася модель поведінки матеріалу Джонсона-Кука (JC) – це загальна чисельна модель поведінки матеріалу для металів, яка широко використовується при моделюванні проблем з ударами і проникненням. Популярність обумовлена простою формою рівняння і відносною легкістю визначення констант моделі [40]. Модель враховує вплив гідростатичного тиску, навантаження, швидкості і температури. Модель є емпіричною, тому вона враховує ефекти ізотропного

зміцнення, кінематичного зміцнення, зміни температури і пов'язаної з цим зміни межі текучості.

Відповідно до цієї моделі напруження визначається відповідно до рівняння:

$$\sigma_{eq} = (A + B\epsilon^n) \left(1 + C \cdot \ln \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0} \right) \right) \left(1 - \left(\frac{T - T_{room}}{T_m - T_{room}} \right)^m \right). \quad (2.27)$$

де ϵ – пластична деформація;

$\dot{\epsilon}$ – швидкість пластичної деформації, s^{-1} ;

$\dot{\epsilon}_0$ – еталон швидкості пластичної деформації, s^{-1} ;

T – температура робочого матеріалу, $^{\circ}C$;

T_{room} – кімнатна температура, $^{\circ}C$;

T_m – температура плавлення робочого матеріалу, $^{\circ}C$.

Параметри моделі (табл. 2.1) визначаються на основі даних про пластичні деформації матеріалу з різними інтенсивностями деформацій і температурами [42]. Параметр A є лімітом текучості при низькій швидкості навантаження. Параметр ϵ межею плинності із заданою температурою, яка згадується як $R0,2$. Відповідно, значення $A = R0,2$ слід приймати для кімнатної температури. Параметр m враховує термічне розм'якшення матеріалу. Ці параметри можна отримати на основі даних з $R0,2$ для різних температур. Параметри B і n моделі матеріалу Джонсона Кука відповідають за ізотропне (статичне) зміцнення в разі подовжень. Ці параметри визначаються на основі даних про поведінку матеріалу при повільному навантаженні (квазістатичному). Параметр C моделі матеріалу Джонсона Кука відповідає за кінематичне посилення (тобто за ефекти інтенсивності напружень). Ця характеристика оцінюється на основі даних про вплив швидкості деформації на напруження.

Таблиця 2.1 – Матеріальні константи AISI 316L для моделі матеріалу Джонсона-Кука

	A	B	C	n	m	ϵ_0
M1	305	1161	0,01	0,61	0,517	1
M2	305	441	0,057	0,1	1,041	1
M3	301	1472	0,09	0,807	0,623	0,001
M4	280	1750	0,1	0,8	0,85	200
M5	514	514	0,042	0,508	0,533	0,001

Константи M1-M5 отримано за результатами існуючих досліджень [42, 43, 44, 45, 46].

Ударну поведінку частинок було вивчено за допомогою програми FEM ABAQUS/Explicit, в якій використовується явний динамічний аналіз. Цей метод ефективний в обчислювальному відношенні для аналізу великих моделей з відносно коротким часом динамічного відгуку та для аналізу надзвичайно переривчастих подій або процесів. Це також дозволяє визначити загальні умови контакту, що дозволяє розраховувати великі обертання і деформації в моделях.

Матеріал, використаний для моделювання – нержавіюча сталь AISI 316L. Визначення параметрів наведено в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Властивості матеріалу AISI 316L

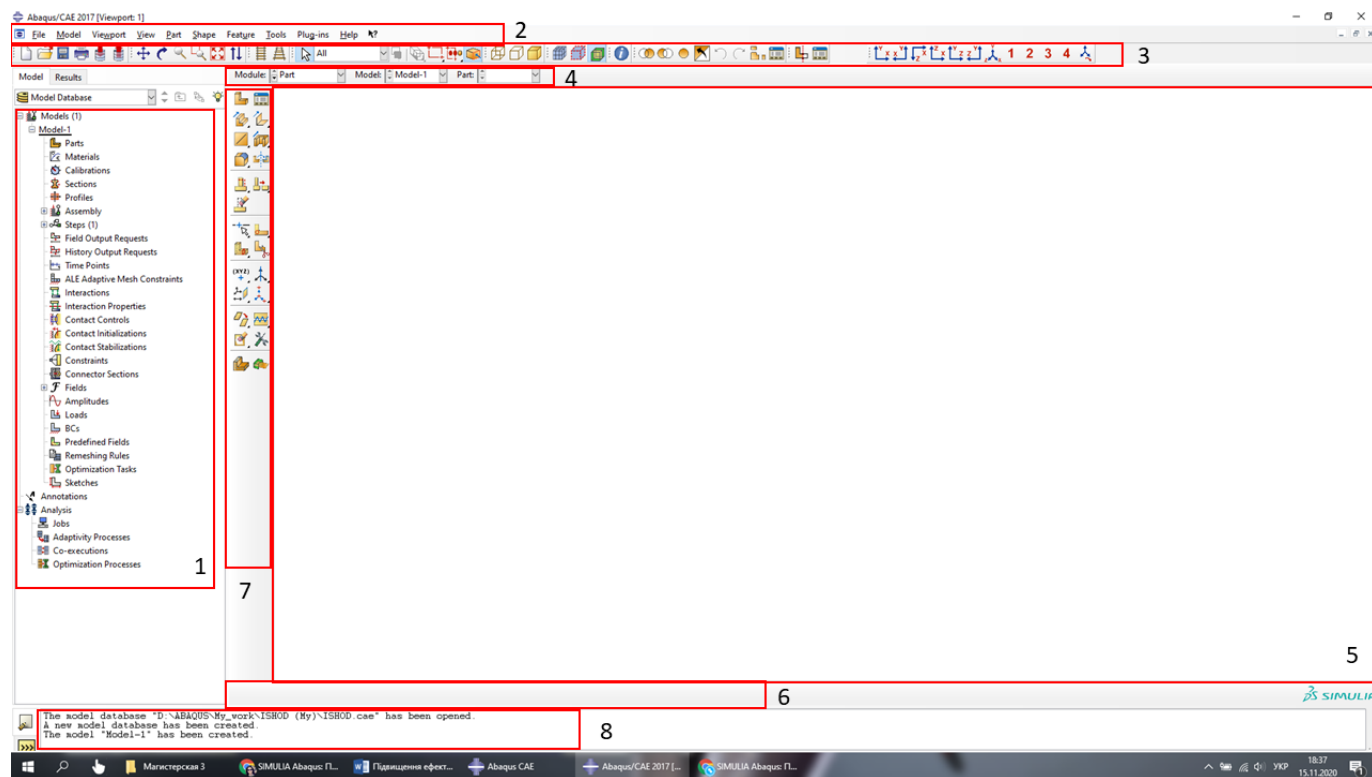
Щільність	кг/м^3	8000
Модуль пружності	ГПа	193
Число Пуассона	–	0,27
Температура плавлення	K	1100
Питома теплоємність	$\text{Дж}/(\text{кг}\cdot\text{K})$	500
Теплопровідність	$\text{Вт}/(\text{м}\cdot\text{K})$	16,3
Коефіцієнт теплового розширення	$1/\text{K}$	$17,2 \times 10^{-6}$

Визначення матеріалу в ABAQUS визначає поведінку матеріалу і надає всі відповідні дані властивостей. Можна визначити кілька поведінок матеріалу, які

залежать від температури і/або змінних поля. Ім'я присвоюється для тих частин моделі, які складаються з цього матеріалу.

2.4 Створення базової моделі для проведення симуляції в ABAQUS

Перед початком створення моделі в ABAQUS розглянемо структуру графічного інтерфейсу користувача (рис. 2.1).



1 – дерево моделі; 2 – панель меню; 3 – панель інструментів; 4 – панель стану;
5 – робоче вікно перегляду моделей «Viewport»; 6 – допоміжна панель інструкцій; 7
– поточна панель компонент модулів; 8 – вікно повідомлень

Рисунок 2.1 – Інтерфейс користувача ABAQUS

Одною з особливостей ABAQUS є використання модулів, кожен з котрих містить певний набір дій, близьких по значенню та необхідних для побудови кінцево-

елементної моделі та подальших операцій з нею. Це спрощує та робить більш наглядною роботу в ABAQUS. Для вибору модуля в лівій частині панелі стану є список «Module» (рис. 2.2).

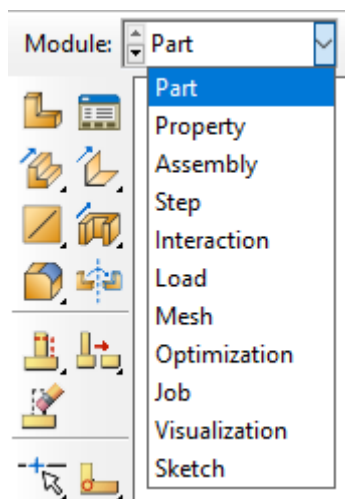


Рисунок 2.2 – Список для вибору модуля

У програмі існують наступні модулі:

1. Part – модуль, що призначений для створення деталей, завдання їх геометрії, опорних точок та систем координат.
2. Property – модуль, що призначений для завдання властивостей матеріалу, перерізів, що використовуються у моделі.
3. Assembly – модуль, що призначений для завдання взаємного розташування деталей збірки у єдину модель.
4. Step – модуль, що призначений для створення кроків розрахунку та визначення вихідних даних за результатами.
5. Interaction – модуль, що призначений для визначення взаємодії між деталями, контактних ділянок та їх властивостей.
6. Load – модуль, що призначений для створення навантажень, що прикладаються до моделі, а також початкових та граничних умов для неї.

7. Mesh – модуль, що призначений, для побудови кінцево-елементної сітки.
8. Job – модуль, що призначений для створення файлу вихідних даних, перевірки побудованої моделі, запуску обчислювального процесу та контролю над ним.
9. Visualization – модуль, що призначений, для перегляду результатів розрахунку та обробки отриманих даних
10. Sketch – модуль, що призначений для збереження ескізів та креслень моделі.

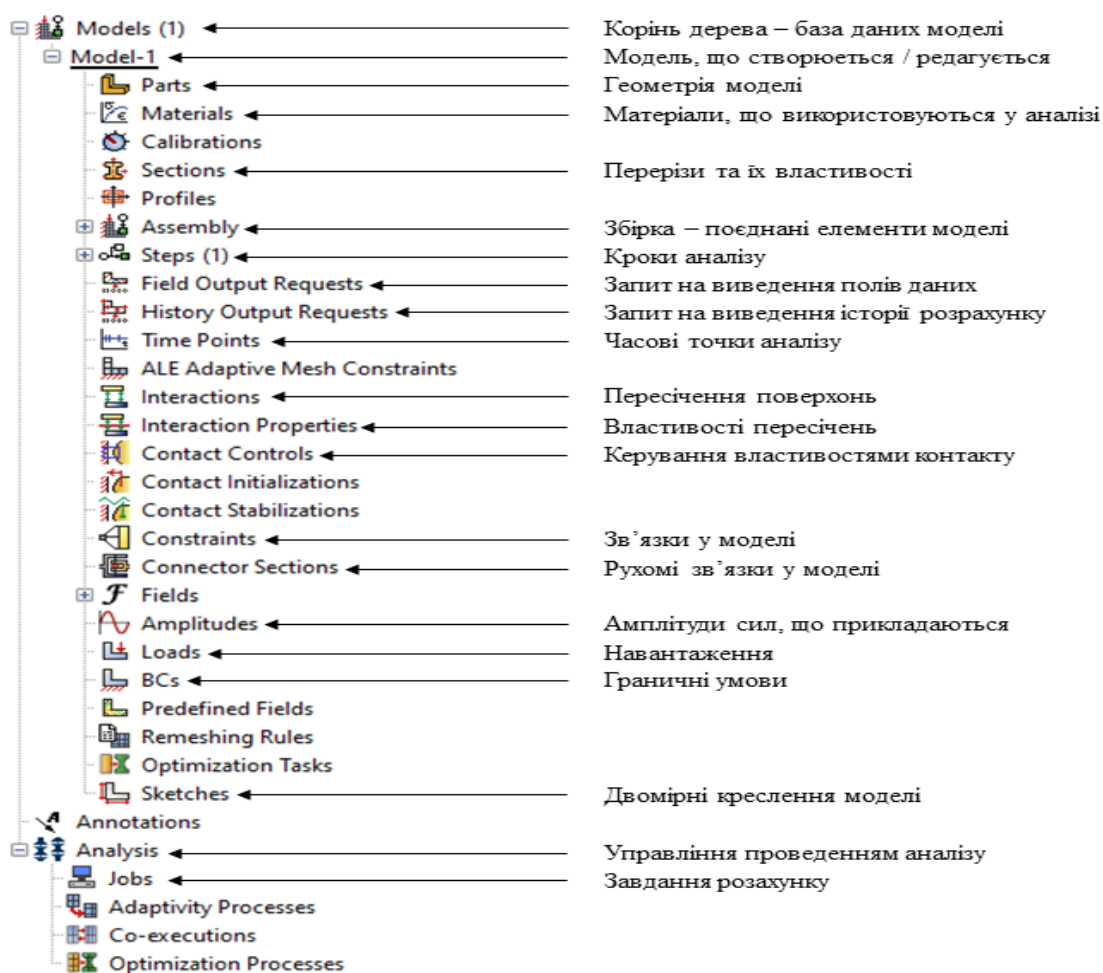


Рисунок 2.3 – Елементи дерева моделі

Так само для прискорення і зручності роботи з основними функціями та наочного представлення елементів моделі в ABAQUS використовується дерево

моделі. Кожен елемент в дереві моделі відповідає за роботу з конкретним модулем і створення елемента моделі. На рисунку 2.3 позначено найбільш часто використовувані елементи.

Почнемо створення базової моделі з побудови двовірних моделей частки та підкладки з можливістю деформування (рисунок 2.4). Для цього переходимо у модуль «Part» та натискаємо кнопку «Create part» та задаємо певні параметри для подальшої побудови (рис. 2.5 та 2.6).

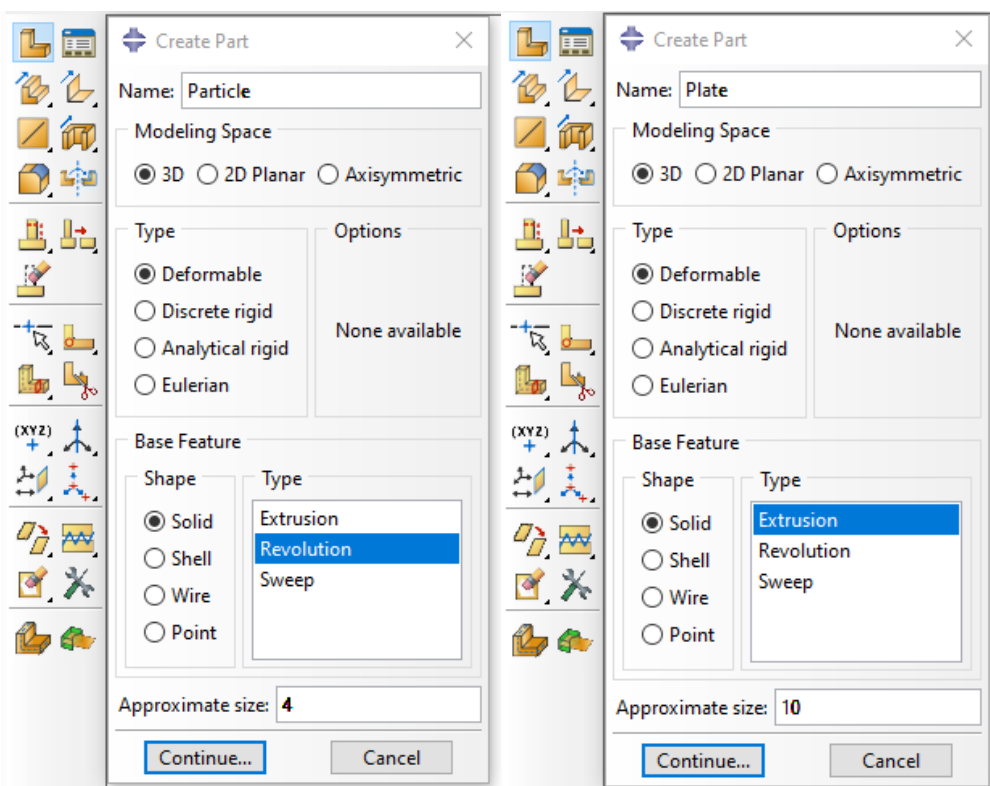


Рисунок 2.4 – Параметри вікна «Create part» для частки (particle) та підкладки (plate)

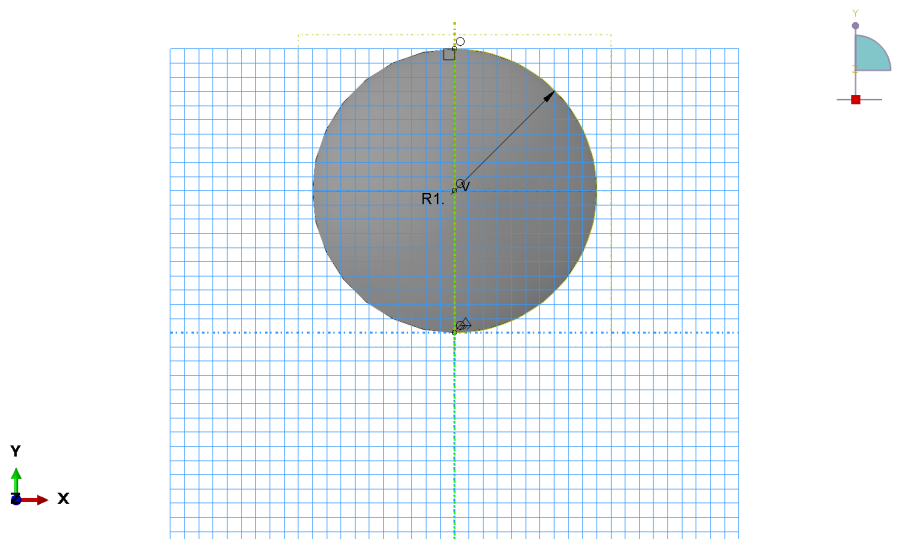


Рисунок 2.5 – Двомірна модель частки

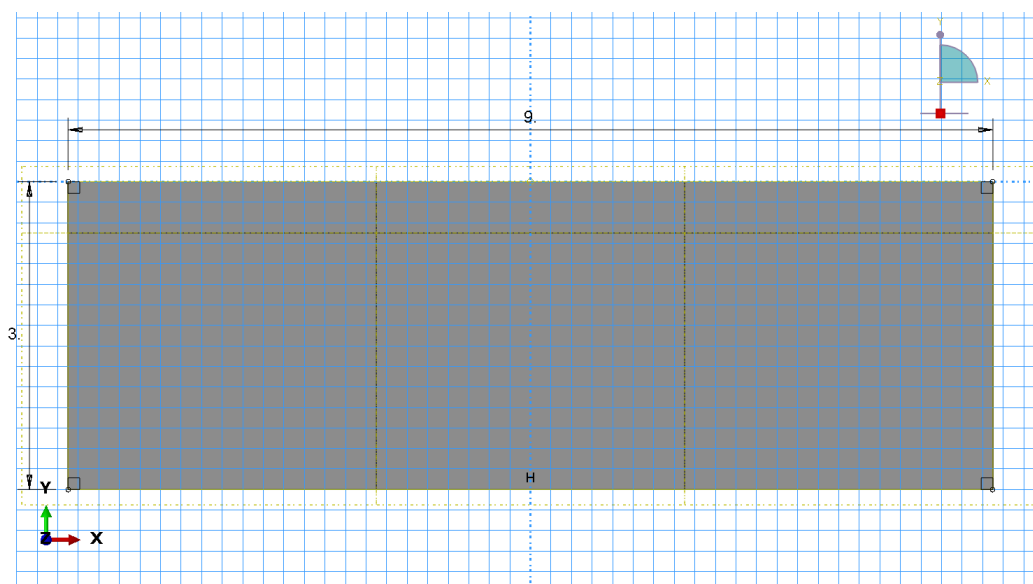


Рисунок 2.6 – Двомірна модель підкладки

Після створення двомірних моделей отримуємо 3D-зображення частки та підкладки (рисунок 2.7)

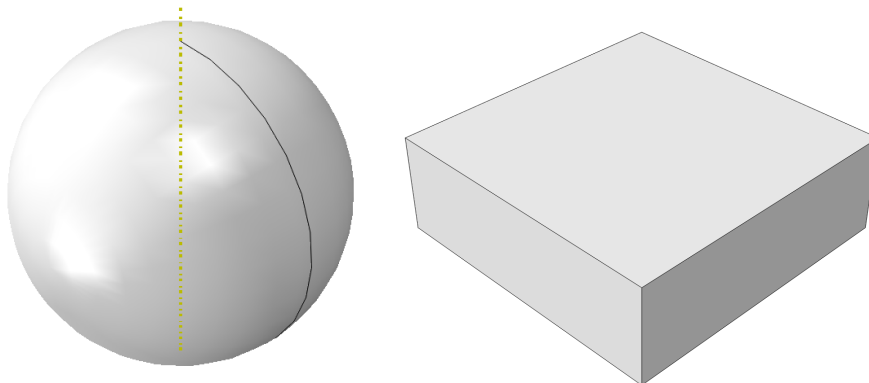


Рисунок 2.7 – 3D-зображення частки та підкладки відповідно

Далі за допомогою функцій «Create datum plane»  та «Partition cell»  поділяємо частку та підкладку на умовні частини. Це потрібно для більш якісної побудови кінцево-елементної сітки. Отримані поділені 3D-моделі зображено на рисунку 2.8.

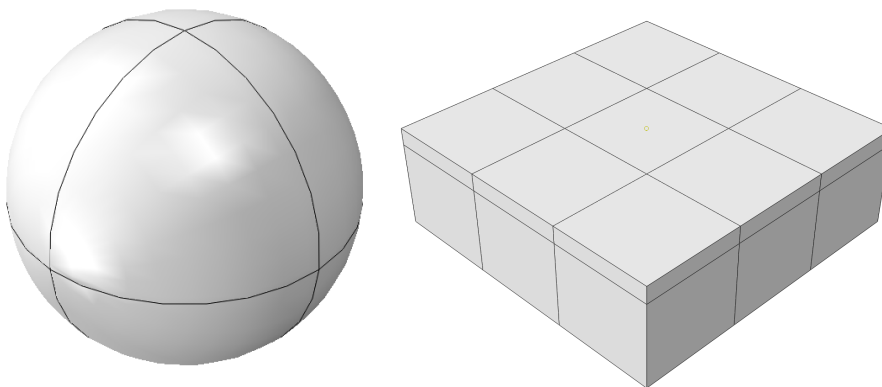


Рисунок 2.8 – Поділені 3D-моделі частки та підкладки відповідно

Для подальшої зручності моделювання варто за допомогою функції «Sets» у дереві моделі створити «сети» для частки та підкладки окремо. «Сетом» може бути як частка або підкладка в цілому, так і певна їх частина. Для роботи з часткою немає необхідності використання окремих частин, тому створюємо «сет» з типом «Geometry» та «Nodes» (такий тип буде доступний після створення кінцево-

елементної сітки) для частки в цілому (рис. 2.9). Для підкладки робимо теж саме але з додаванням окремого «сету» для центру підкладки (рис. 2.10). Це необхідно для більш детальної кінцево-елементної сітки.

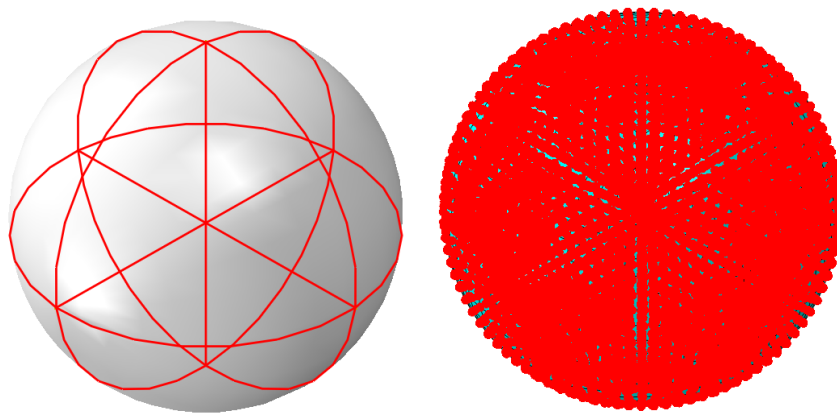


Рисунок 2.9 – «Сети» для частки, типи «Geometry» та «Nodes» відповідно

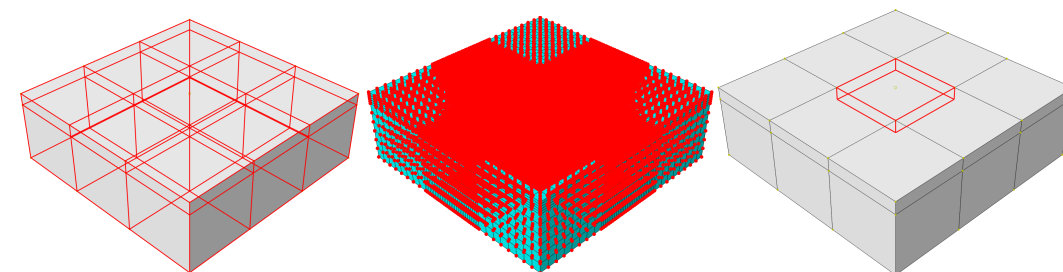


Рисунок 2.10 – «Сети» для підкладки, типи «Geometry», «Nodes» та «Geometry» (для центру) відповідно

Наступним кроком є перехід до функції «Mesh» для створення кінцево-елементної сітки. За допомогою функцій «Seed Part»  та «Seed Edges» , обираємо бажаний розмір майбутнього елемента та переходимо до функції «Mesh part» , і створюємо сітку та частки та підкладки окремо (рис. 2.11).

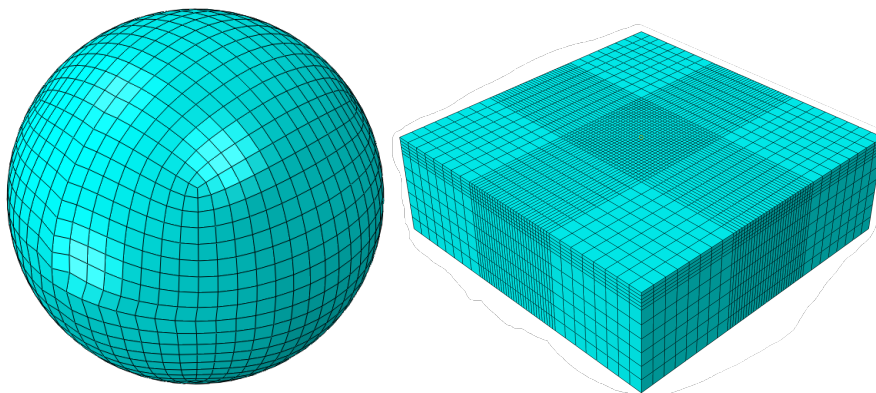


Рисунок 2.11 – Кінцево-елементна сітка для частки та підкладки відповідно

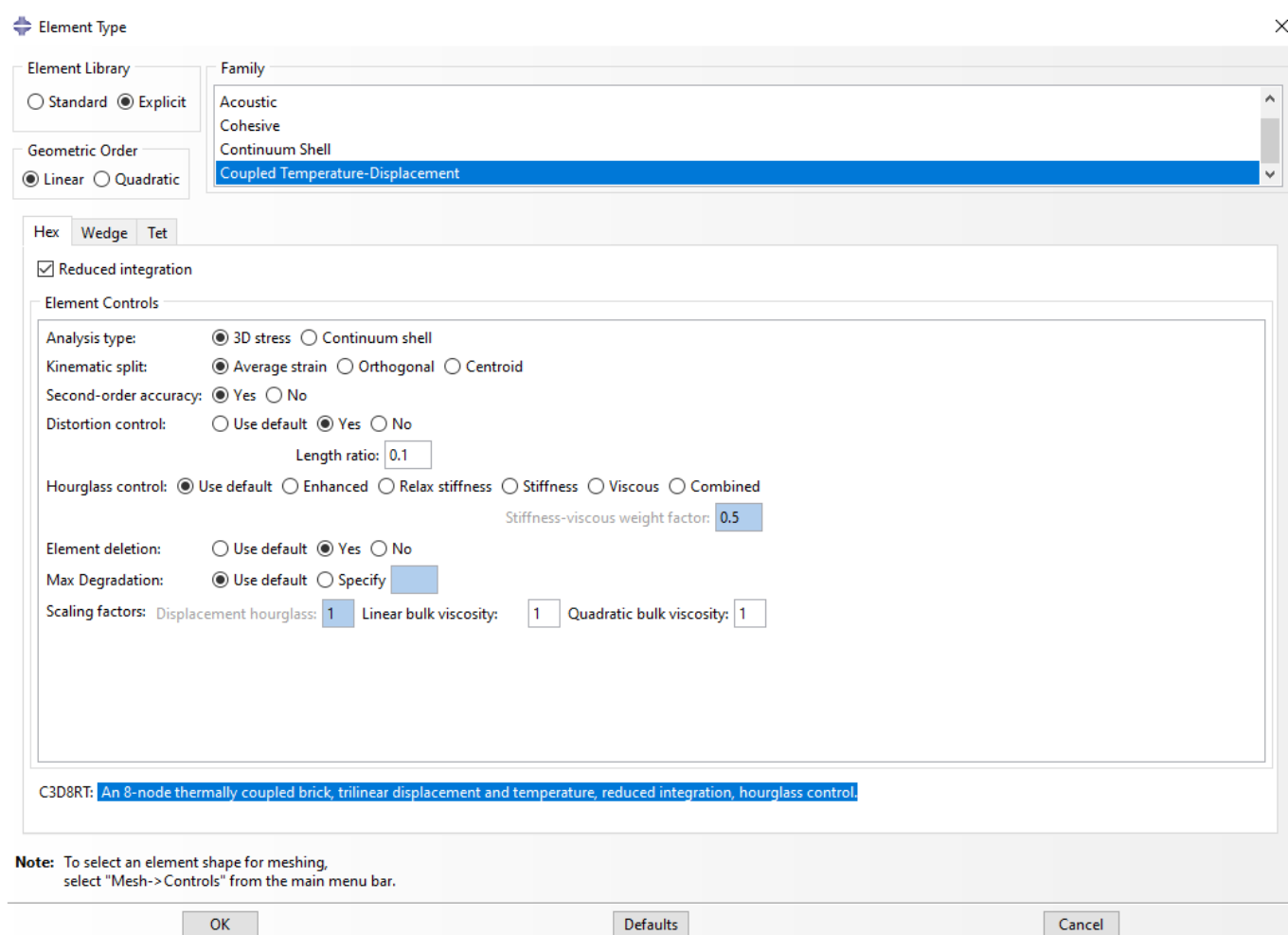


Рисунок 2.12 – Вікно вибору типу елемента кінцево-елементної сітки
(однаково для підкладки та частки)

Далі необхідно задати тип елементів кінцево-елементної сітки. Для цього скористаємося функцією «Assign Element Type» , вікно якої зображено на рисунку 2.12. Для кожного елементу частки та підкладки задається однаковий тип елементу – «C3D8RT» – 8-ми вузловий термічно з'єднаний брусок, з можливістю свободи переміщення та ступенями температури.

Далі переходимо до модуля «Property» та за допомогою функції «Edit material»  створюємо п'ять різновидів матеріалів згідно до [таблиці 2.1](#) та [таблиці 2.2](#). Потім за допомогою функції «Create section»  створюємо п'ять «секцій» для п'яти створених різновидів матеріалів. Після створення необхідно повернутися до модулю «Part» та за допомогою функції «Section Assignments» призначаємо частці та підкладці «секцію», яку буде обрано для симуляції. Під час призначення «секції» з'являється необхідність обрати ту частину частки (підкладки), якій саме призначається певний матеріал. Для подальших симуляцій не буде необхідності аналізу поведінки частки та підкладки за умов використання різних матеріалів для різних частин частки або підкладки, а також для частки та підкладки в цілому. Тому призначаємо одну і ту саму «секцію» для частки та підкладки шляхом виділення їх повністю (або за допомогою вибору «сету» з типом «Geometry»).

Наступним кроком буде розташування частки відносно підкладки. Для цього переходимо до модуля «Assembly» та за допомогою функції «Create Instance» додаємо до робочого вікна перегляду частку та підкладку для створення збірки, залучаючись за необхідністю допомогою функцій переміщення  , повороту , вирізання/злиття  тощо. Отриману збірку зображено на рисунку 2.13.

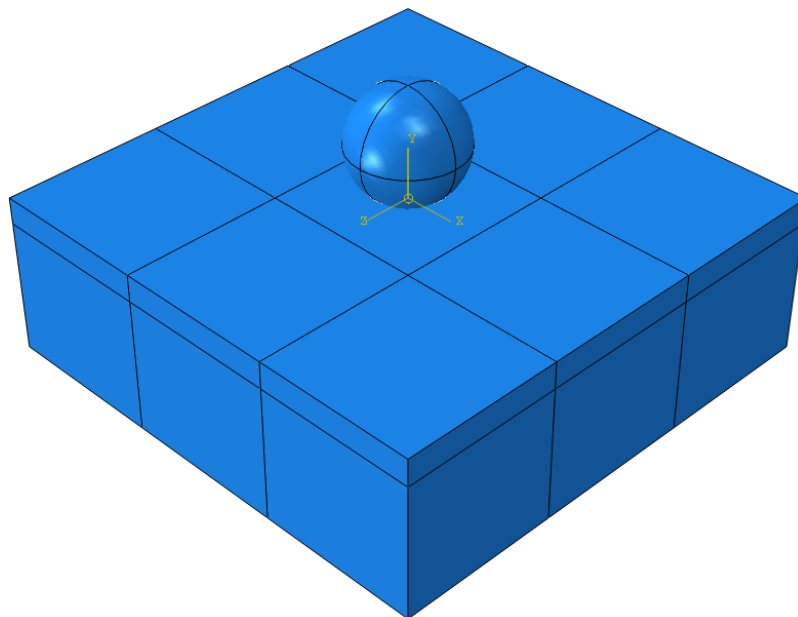


Рисунок 2.13 – Збірка частки та підкладки

У модулі «Assembly» також існує функція «Sets», до якої додано усі створені раніше «сети». На поточному етапі потрібно додати ще один «сет», який знадобиться для встановлення граничних умов (рис. 2.14).

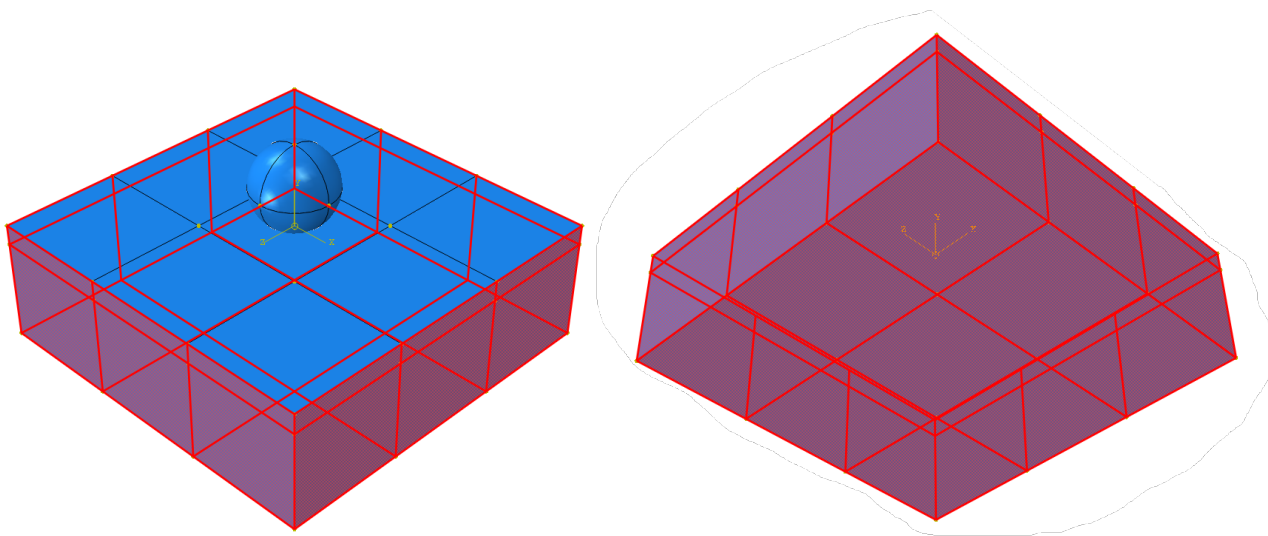


Рисунок 2.14 – «Сет» для створення граничних умов (вид зверху та знизу відповідно)

Далі переходимо до функції «Surfaces» для створення певної поверхні підкладки, з якою буде взаємодіяти частка (рис. 2.15).

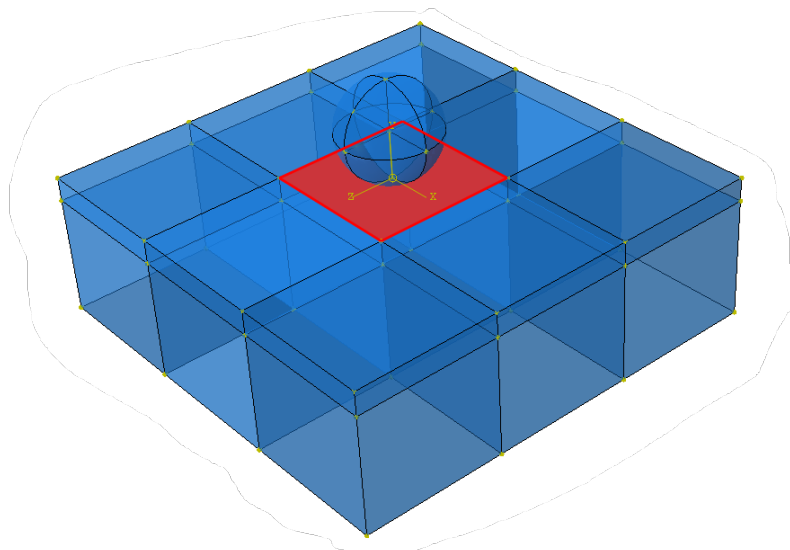


Рис. 2.15 – Поверхня підкладки, з якою буде взаємодіяти частка

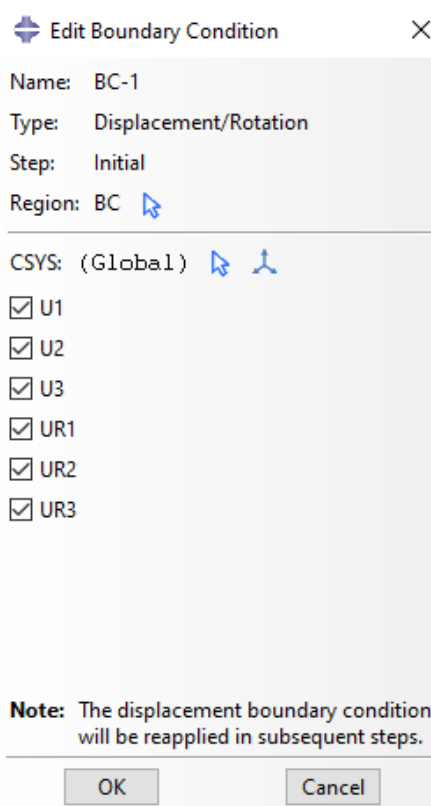


Рисунок 2.16 – Граничні умови, тип: переміщення / обертання

Наступним кроком переходимо до модуля «Steps» для створення кроків симуляції. За замовчуванням завжди існує крок «Initial», який містить початкові параметри симуляції. У цьому кроці за допомогою функції «BCs» задаємо граничні умови з використанням «сету», який зображено на рисунку 2.14. Загальний вигляд отриманих параметрів граничних умов зображено на рис. 2.16. Ці параметри дозволятимуть в процесі симуляції не виходити за межі, які визначено обраним вище «сетом». Далі у кроці «Initial» переходимо до функції «Predefined fields» для створення попередньо визначених полів. Для частки задається певна швидкість та температура (за необхідністю). Для підкладки задається температура (за необхідністю).

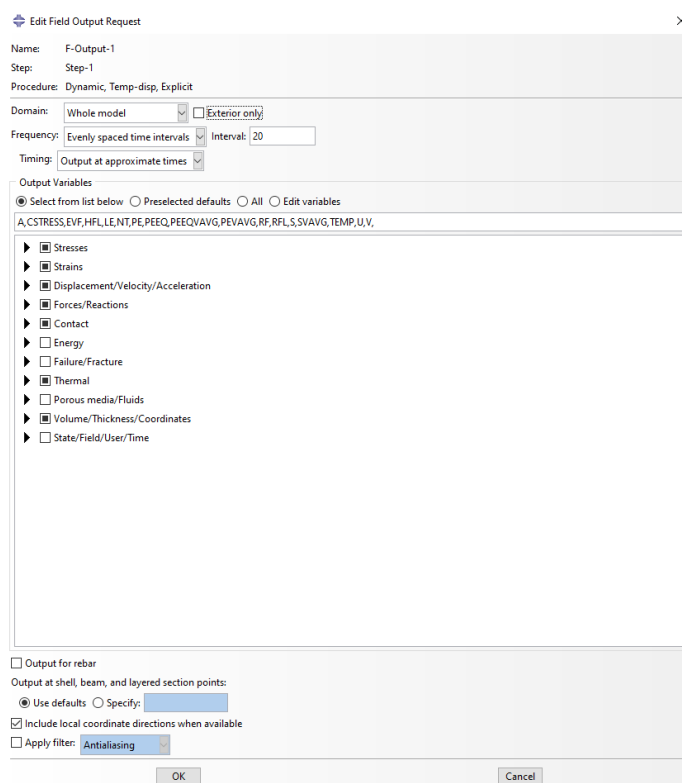


Рисунок 2.17 – Змінні, які
необхідні для запиту на виведення полів
даних

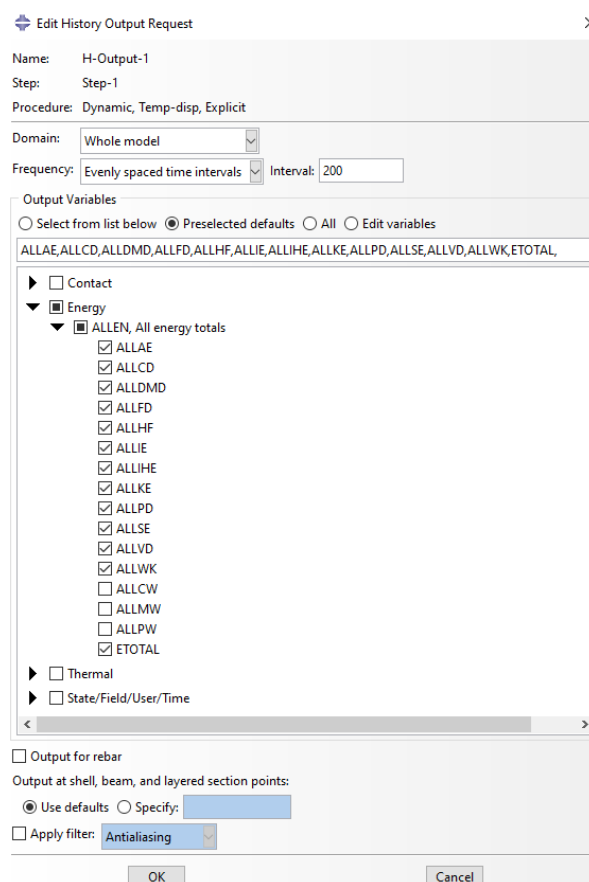


Рисунок 2.18 – Змінні, що
необхідні для запиту на виведення історії
розрахунків

Далі переходимо до створення наступного кроку «Step-1». Під час створення кроку задається бажаний час симуляції та обирається тип «Dynamic, Temp-disp, Explicit». У цьому кроці переходимо до першої функції «Field Output Requests» (рис. 2.17) для вибору змінних, які необхідні для запиту на виведення полів даних.

Далі переходимо до схожої функції «History Output Requests» (рис. 2.18) для вибору змінних, що необхідні для запиту на виведення історії розрахунків.

Наступною є функція «Interactions», завдяки якій ми обираємо вид взаємодії між часткою та підкладкою. Отже, створюємо перший вид взаємодії з типом «General contact (Explicit)» (рис. 2.19). Це потрібно для взаємодії між усіма гранями, кромками сегментами тощо. Такий вид взаємодії також використовується для роботи наступного виду взаємодії.

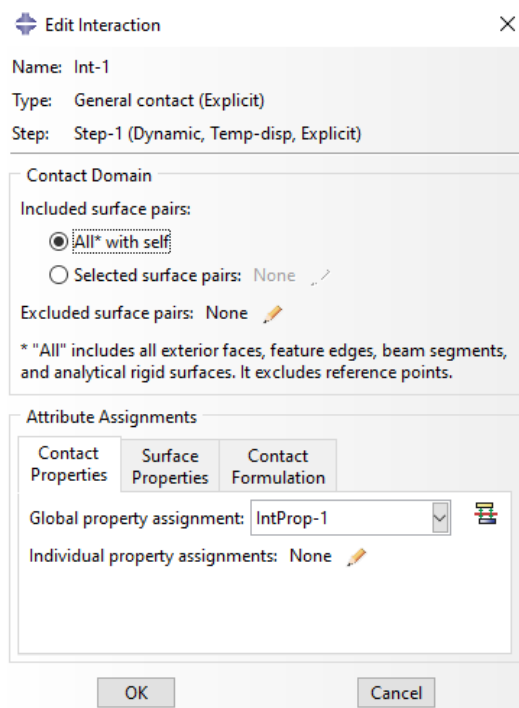


Рисунок 2.19 – Параметри для першого виду взаємодії між часткою та підкладкою

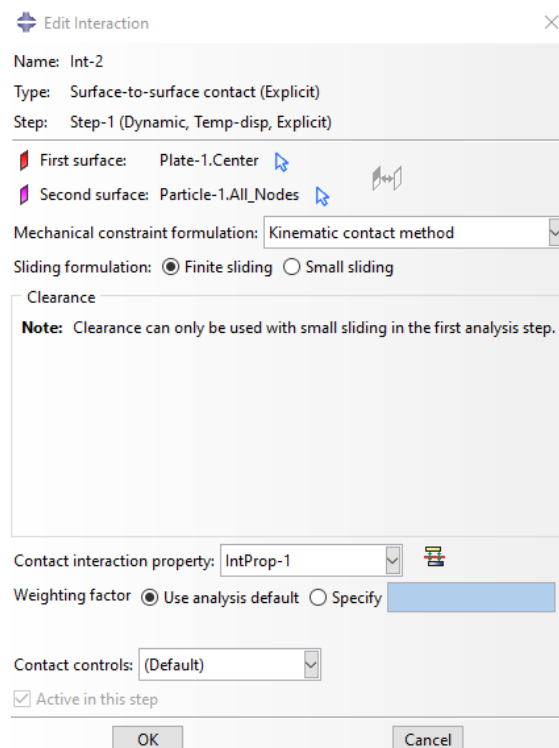


Рисунок 2.20 – Параметри для другого виду взаємодії між часткою та підкладкою

Наступним буде другий вид взаємодії з типом «Surface-to-surface contact (Explicit)». Цей вид взаємодії потрібен для вже більш конкретної взаємодії між часткою та підкладкою. Для цього у якості «першої поверхні» обирається «сет» з центром підкладки (тип «Geometry»), а у якості «другої поверхні» обирається «сет» з усією поверхнею частки (тип «Nodes») (рис. 2.20).

Функції «BCs» та «Predefined Fields» створюються автоматично для цього кроку на базі попереднього.

На цьому створення моделі для подальших симуляцій закінчено. Тепер є можливість проводити симуляції за допомогою переходу до модуля «Job» та створення завдань для подальшого переходу до модуля «Visualization» для обробки та аналізу отриманих результатів проведених симуляцій.

Таким чином у другому розділі було проведено моделювання роботи установки для холодного газодинамічного наплення. За результатами моделювання зроблено певні висновки, які описано далі по тексту.

Було створено чисельну модель для розрахунку продуктивності сопла по масі для оцінки шляхів підвищення продуктивності. Ця модель враховувала не тільки параметри сопла, а також дозатора часток та нагрівача газу. За результатами аналізу отриманої формули для підрахунку продуктивності було зроблено певне припущення про те, що продуктивність сопла по масі можна підвищувати лише за рахунок збільшення площі критичного перерізу сопла S_{cr} . У третьому розділі перевірено можливість збільшення цього розміру.

Також у другому розділі було проведено створення чисельної моделі багатоканального нагрівача газу для розрахунку параметрів нагрівача з попередньо заданими припущеннями. За результатами створення моделі отримано чотири критерії, які відповідають наступним припущенням:

- максимальна температура підігріву газу – 250 °C;
- поверхня трубок нагрівача не повинна нагріватися вище температури 700 °C;

- число Рейнольдса течії газу всередині трубки – $Re_h \geq 10^4$;
- малий гідравлічний опір нагрівача – $\Delta p_h \leq 0,1 \text{ МПа}$;
- сумарний прохідний переріз нагрівальних елементів мінімум в два рази більше критичного перерізу сопла S_{cr} (9 мм).

У третьому розділі проведено аналіз сумісності отриманих критеріїв.

Було проведено створення чисельної моделі ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів з використанням ABAQUS. Створення чисельної моделі проводилося у два етапи:

1. Розробка методології, на якій у подальшому буде базуватися модель та яка описує параметри для проведення симуляцій взаємодії частки та підкладки.
2. Створення базової моделі з використанням ABAQUS.

3 АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

Аналіз результатів моделювання роботи установки для холодного газодинамічного напilenня полягає у виконанні наступних задач:

1. Аналіз розробленої моделі надзвукового сопла, а саме перевірка висновку щодо можливості підвищення продуктивності сопла по масі лише за рахунок збільшення площі критичного перерізу сопла. Мета аналізу – за результатами перевірки запропонувати способи підвищення продуктивності сопла.

2. Аналіз сумісності критеріїв чисельної моделі багатоканального нагрівача газу. Мета аналізу – визначити при яких комбінаціях кількості нагрівальних елементів та їх внутрішніх діаметрів нагрівач буде задовольняти усім отриманим раніше критеріям.

3. Аналіз результатів моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів. Мета аналізу – за допомогою використання створеної раніше базової моделі у ABAQUS та проведення симуляцій з використанням різних параметрів (швидкості, температури, матеріалів тощо) для частки та підкладки зробити певні висновки про взаємодію частки та підкладки за різних умов.

3.1 Аналіз розробленої моделі надзвукового сопла

На основі чисельного розрахунку моделі надзвукового сопла було зроблено висновок про те що продуктивність сопла можна підвищувати лише за рахунок збільшення розміру критичного перерізу сопла (див. розділ 2.1, формула 2.6).

Для того, щоб перевірити правильність такого висновку, оцінімо максимально можливу швидкість переміщення поверхні, що напilenється, відносно сопла при

напилення покриття певної товщини за один прохід. Із формули (2.6) (розділ 2.1) з урахуванням даних в таблиці 3.1 виходить формула (3.1).

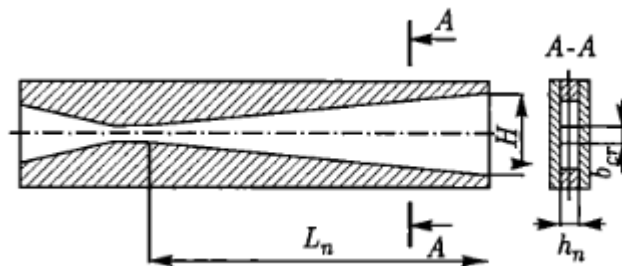
Таблиця 3.1 – Вихідні дані для оцінювання максимально можливої швидкості переміщення поверхні

Позначення	Визначення	Вихідні дані
S_{cr}	Площина критичного перерізу сопла	$b_{cr} \cdot h_n = 9 \text{ мм}$
h_n	Менший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла	3 мм
b_{cr}	Розмір критичного перерізу прямокутного сопла	3 мм
k_d	Коефіцієнт напилення	0,8
p_0	Тиск гальмування газу	1,5 МПа
h_{cl}	Товщина напилювального за один прохід покриття	50 мкм
T_0	Температура гальмування газу	200 °C (473,15 K)
ρ_c	Щільність покриття	2700 кг/м ³ (для Al)
H_n	Більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла	9 мм

$$u_{s \max} = k_d \frac{0,02 p_0 h_n S_{cr}}{h_{cl} \rho_c \sqrt{T_0}} \frac{b_{cr}}{H_n} \approx 8 \text{ м/с} \quad (3.1)$$

На рис. 3.1 зображено розміри, що приведено у таблиці 3.1 та довжину надзвукової частини сопла L_n .

Особливість плоского надзвукового сопла полягає у тому, що один з розмірів його внутрішнього пневмоканалу h_n обирається постійним по всій довжині сопла від критичного перетину до зрізу. Зі збільшенням ширини пневмоканалу сопла буде збільшуватися товщина шару стисненого газу перед поверхнею, що напиляється, і, отже, зменшується швидкість удару частинок об підкладку.



L_n – довжину надзвукової частини сопла, м; h_n – менший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, м; H – більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла, м; b_{cr} – розмір критичного перерізу прямокутного сопла, м

Рисунок 3.1 – Місцезнаходження розмірів сопла

Величина h_n , знайдена експериментально [10], для дрібнодисперсних порошків, використовуваних при ХГН, не повинна перевищувати 3 мм. Це означає, що необхідно збільшити розмір критичного перерізу прямокутного сопла b_{cr} , і, відповідно, пропорційно йому більший розмір вихідного перерізу прямокутного сопла H_n .

Однак значне збільшення розмірів b_{cr} і H_n недоцільно, так як в цьому випадку буде зростати кут розширення пневмоканалу α_n , що при постійній довжині надзвукової частини сопла визначається як:

$$\alpha_n = 2 \arctg \frac{H_n - b_{cr}}{2L_n}, \quad (3.2)$$

Починаючи з деякого критичного кута α_{cr} стає помітним ефект нерівномірного заповнення частинками вихідного перетину сопла. Експериментально доказано [10], що ефект нерівномірного заповнення частинками вихідного перетину сопла стає помітним при $\alpha_n = 10 - 15^\circ$.

З вищесказаного очевидно, що площа критичного перетину сопла S_{cr} обмежена і, отже, обмежена продуктивність обладнання. Оцінимо з виразу (2.6) (розділ 2.1) максимально можливу продуктивність по площині односоплової установки. Критичний кут пов'язаний з геометричними розмірами сопла наступним чином:

$$\frac{H_{n \max} - b_{cr \max}}{2L_n} = \operatorname{tg} \frac{\alpha_{cr}}{2}, \quad (3.3)$$

Із формули (3.3) з урахуванням $H_n \approx 3 \cdot b_{cr}$, $L_n \approx 0,1$ м (довжина надзвукової частини сопла), $\alpha_{cr} = 15^\circ$ знайдено $b_{cr \max} \approx 13,2$ мм. Підставляючи в формулу (2.6): $b_{cr \max} \approx 13,2$ мм та значення з таблиці 2.1 отримаємо $P_s = 0,07$ м²/с = 250 м²/год.

Для подальшого збільшення продуктивності необхідно застосовувати багатосоплові блоки з можливістю установки сопел там, де необхідно наносити покриття. Наприклад, в разі нанесення покриття на кутовий прокат як мінімум необхідно розмістити чотири сопла для напилення чотирьох сторін куточка. Якщо ширина куточка виходить за межі ширини покриття що наноситься одним соплом, то необхідно передбачити розміщення двох, трьох і більше сопел з деяким перекриттям для отримання широкої рівномірної смуги покриття. При високих швидкостях переміщення куточка допустимо встановлювати слідом за першим напилювальним боксом другий, третій тощо для отримання в результаті покриття необхідної товщини.

Може бути використано також сопло у вигляді декількох пневмоканалів з індивідуальними підводами газопорошкової суміші і загальною форкамерою так, щоб виходи надзвукових частин пневмоканалів утворювали загальний для соплового вузла плоский вихідний пневмоканал з кутом розкриття не більше α_{cr} (рис. 3.2) і шириною вихідного перетину рівній ширині кожного з каналів. Кут розкриття надзвукової частини індивідуальних пневмоканалів не повинен перевищувати критичного кута α_{cr} , що визначається виразом $\alpha_{cr} = (M_{ex} - 1)26,5^\circ$ де M_{ex} – число Маха на зрізі сопла.

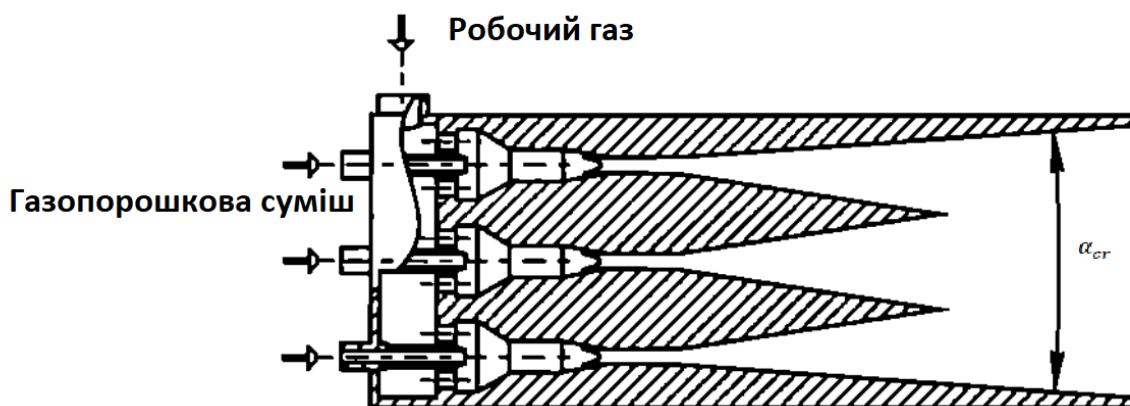


Рисунок 3.2 – Схематичне зображення багатоканального сопла

Кількість індивідуальних пневмоканалів задається продуктивністю пристрою і шириною покриття, що напиляється за один прохід.

Також можна використовувати сопла іншої форми, наприклад, ті, переріз яких має круглу форму. У четвертому розділі даної роботи проведено параметризацію такого сопла

3.2 Аналіз сумісності критеріїв чисельної моделі багатоканального нагрівача газу

Для розрахованої у другому розділі витрати повітря $G_h = 0,0245 \text{ кг/с}$ критерії з формул (2.17), (2.19), (2.23), (2.25) (розділ 2.2) перепишуться у вигляді:

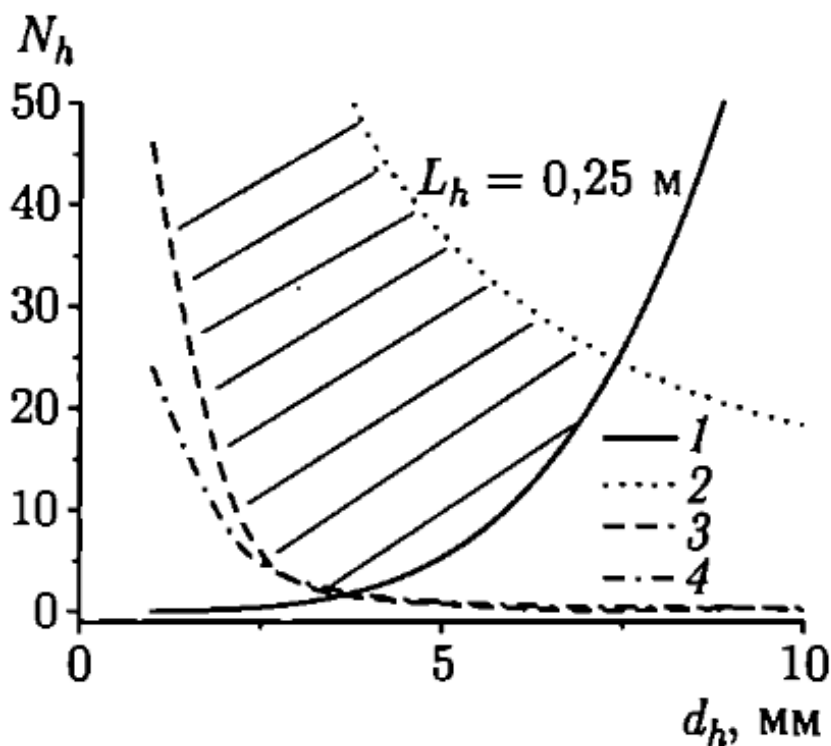
$$N_h \geq \frac{7,66 \cdot 10^6 d_h^4}{L_h^5}. \quad (3.4)$$

$$N_h \leq \frac{0,183}{d_h}. \quad (3.5)$$

$$N_h \geq \frac{9,97 \cdot 10^{-7} G_h L_h^{5/9}}{d_h^{8/3}}. \quad (3.6)$$

$$N_h \geq \frac{2,29 \cdot 10^{-5}}{d_h^2}. \quad (3.7)$$

На рис. 3.3 штриховою лінією показана (для випадку $L_h = 0,25$ м) область значень N_h та d_h , при яких проектований нагрівач одночасно задовольняє умовам з формул (3.4)-(3.7).



N_h – кількість нагрівальних елементів; d_h – внутрішній діаметр нагрівального елемента; G_h – витрата газу всередині трубки; L_h – довжина нагрівального елемента;

1, 2, 3, 4 – умови з формул (3.4), (3.5), (3.6), (3.7)

Рисунок 3.3 – Область допустимих значень N_h та d_h нагрівачу газу, $G_h = 0,0245$ кг/с, $L_h = 0,25$ м

Із графіку видно, що криві умов 1, 3, та 4 пересікаються в одній точці. Зліва від точки пересічення умова 3, а справа 1, вони є сильнішими, ніж умова 4. Аналіз формул (2.17), (2.23), (2.25) (розділ 2.2) показує, що ця ситуація зберігається для любых довжин нагрівальних елементів. Тому умову 4 у подальшому можна не враховувати.

Подібним чином можна розрахувати нагрівач будь-якої продуктивності. На рис. 3.4, у якості прикладу, зображено області припустимих значень N_h та d_h нагрівача газу, розрахованого на підігрів $1,0 \text{ кг/с}$ повітря до температури 200°C для довжини нагрівальних елементів $L_h = 1,0 \text{ м}$ та $1,5 \text{ м}$.

Потужність, що необхідна для підігріву повітря до температури $T_{hex} = 250^\circ \text{C}$ визначається виразом:

$$P_h = G_h c_p (T_{hex} - T_{hin}). \quad (3.8)$$

З іншої сторони, потужність, що виділяється у нагрівальних елементах, визначається омичним опором нагрівача R та робочою напругою U джерела:

$$P_h = \frac{U_{sr}^2}{R_h}. \quad (3.9)$$

Опір послідовно поєднаних нагрівальних елементів R_h дорівнює:

$$R_h = \rho_h \frac{4N_h L_h}{\pi(D_h^2 - d_h^2)} = \rho_h \frac{N_h L_h}{\pi \delta_h (d_h + \delta_h)}. \quad (3.10)$$

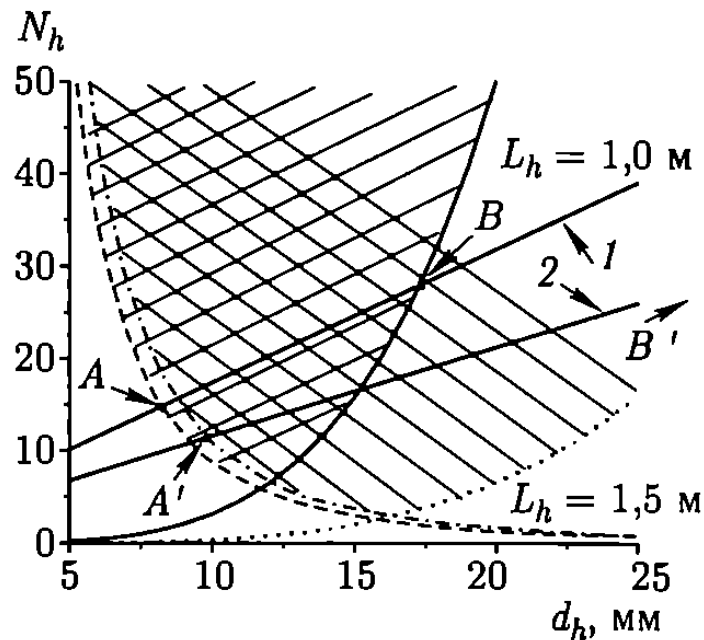
де ρ_h – питомий омичний опір матеріалу нагрівальних елементів, $\text{Ом}\cdot\text{м}$;

δ_h – товщина стінки нагрівального елемента, м ;

З рівнянь (3.8) та (3.9) отримуємо співвідношення між N_h та d_h

$$N_h = \frac{\pi \delta_h (d_h + \delta_h) U^2}{\rho_h L_h G_h c_p (T_{hex} - T_{hin})}. \quad (2.34)$$

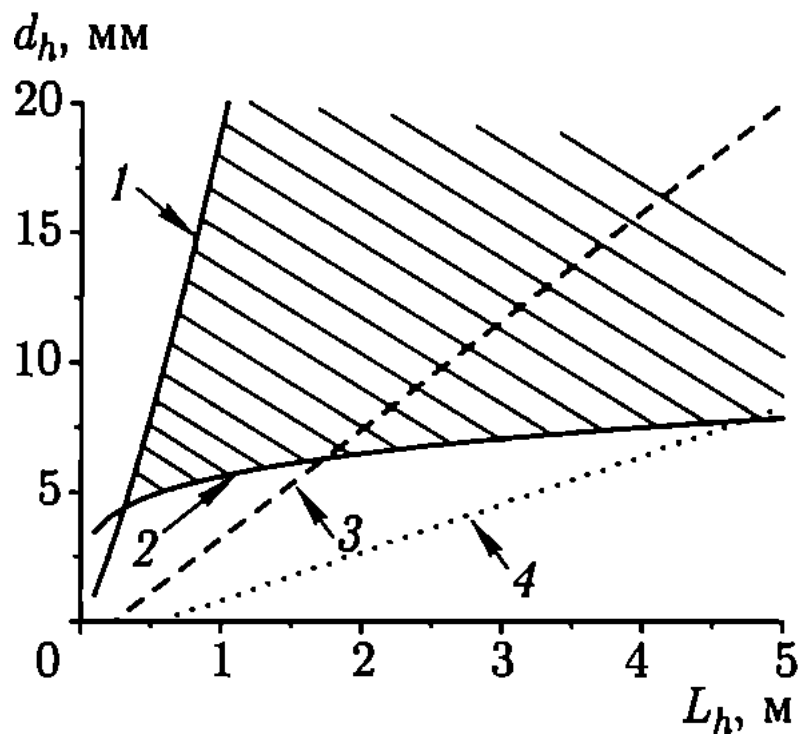
На рис. 3.4 прямими лініями 1 ($L_h = 1,0 \text{ м}$) та 2 ($L_h = 1,5 \text{ м}$) зображено залежності N_h та d_h при наступних значеннях параметрів: $U_{sr} = 220 \text{ В}$, $\rho_h = 10^{-6} \text{ Ом}\cdot\text{м}$, $G_h = 1,0 \text{ кг/с}$; $c_p = 1,05 \cdot 10^3 \text{ Дж/кг}\cdot\text{град}$; $\delta_h = 2 \cdot 10^{-3} \text{ м}$; $T_{hex} - T_{hin} = 200^\circ\text{С}$. Таким чином, для даних значень параметрів відношення між кількістю нагрівальних елементів та їх внутрішнім діаметром визначається за графіком 2.2 – для $L_h = 1,0 \text{ м}$ відношення між N_h та d_h лежать на відрізку AB , для $L_h = 1,5 \text{ м}$ відношення між N_h та d_h лежать на відрізку $A'B'$ (точка B' розташована достатньо далеко, тому не зображена на графіку)



N_h – кількість нагрівальних елементів; d_h – внутрішній діаметр нагрівального елемента, м; G_h – витрата газу всередині трубки, $\text{м}^3/\text{год}$; L_h – довжина нагрівального елемента, м; 1, 2, 3, 4 – умови з формул (3.4), (3.5), (3.6), (3.7)

Рисунок 3.4 – Область допустимих значень N_h та d_h нагрівачу газу, $G_h = 0,0245 \text{ кг/с}$, $L_h = 1,0 \text{ м}$ та $L_h = 1,5 \text{ м}$

Для нагрівача з одним нагрівальним елементом, виконуючи співвідношення (2.18), (2.20), (2.24) можна отримати область припустимих значень довжини та внутрішнього діаметру нагрівального елементу. На рис. 3.5 зображено приклад подібного розрахунку для температури підігріву $200\text{ }^{\circ}\text{C}$ та витрати газу $0,0245\text{ кг/с}$.

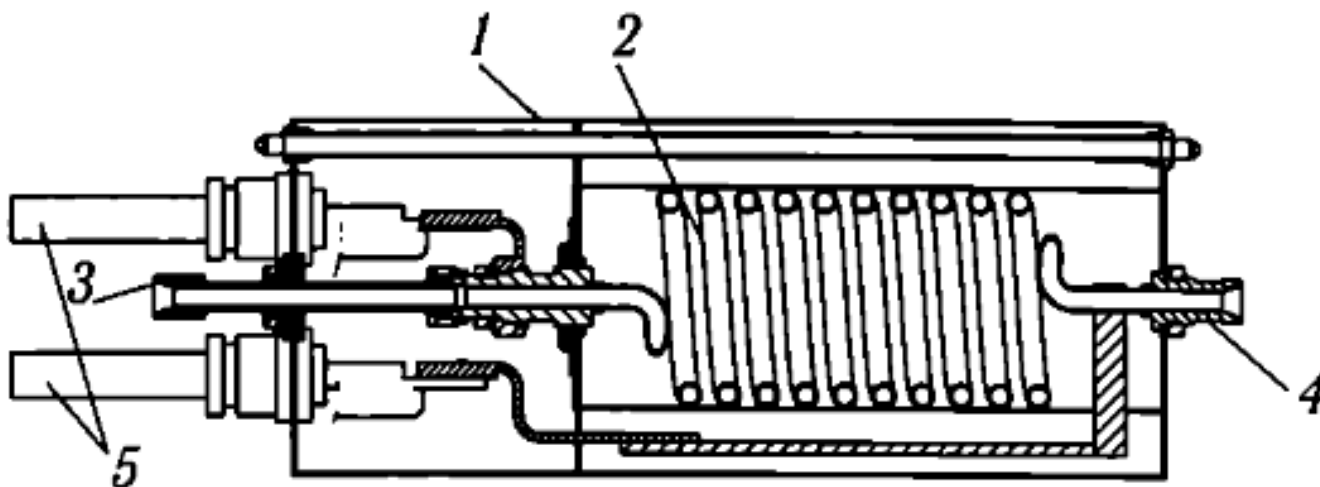


1, 2, 3, 4 – умови з формул (2.18), (2.24) та (2.31) (розділ 2.2); d_h – внутрішній діаметр нагрівального елемента, мм ; L_h – довжина нагрівального елемента, м

Рисунок 3.5 – Область припустимих значень L_h та d_h нагрівачу газу з одним нагрівальним елементом. $G_h = 0,0245\text{ кг/с}$, при $U = 20$ та 30 В відповідно

Можна побачити, що припустимий діаметр трубки для обраних умов завжди більший за діаметр, який отримано з умови (2.26) ($d_h = 4,8\text{ мм}$). Це ще раз демонструє, що умова (2.25) при розрахунку нагрівача можна не враховувати.

Одну з найбільш простих та надійних систем нагрівача, у якому повітря проходить через трубку, що нагрівається електричним струмом, представлено на рис. 3.6.



1 – корпус, 2 – ніхромова труба, 3 – штуцер введення газу, 4 – вихідний штуцер, 5 – підведення електроживлення

Рисунок 3.6 – Схематичне зображення трубчатого омичного нагрівачу робочого газу

Використовуючи створену вище чисельну модель, можна спроектувати та побудувати різноманітні трубчасті нагрівачі. Важливою особливістю використання таких нагрівачів є отримання хімічно чистих покриттів, тому що омичний нагрів не вносить домішок у робочий газ та, відповідно, у покриття.

Таким чином було проведено розрахунок багатоканального нагрівача газу, на основі заданих умов та припущень, завдяки якому можна проводити подальшу оптимізацію нагрівача для підвищення вихідних властивостей установки ХГН.

3.3 Результати моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою при різних температурах частки

Перша частина дослідження полягала у порівнянні часу максимальної глибини проникнення частки у підкладку та часу максимального напруження.

Для проведення симуляцій були використані наступні комбінації параметрів, що зображено у таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Комбінації параметрів, які було обрано для проведення симуляцій

Швидкість частки, м/с	Матеріальні константи AISI 316L для моделі матеріалу Джонсона-Кука*					Температура частки, K **						
	M1	M2	M3	M4	M5	25	100	200	300	400	500	600
100	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
200	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
300	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
400	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
500	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
600	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
610	.	.	.	.	.							
620	.	.	.	.	.							
630	.	.	.	.	.							
640	.	.	.	.	.							
650	.	.	.	.	.							
660	.	.	.	.	.							
670	.	.	.	.	.							
680	.	.	.	.	.							
690	.	.	.	.	.							
700	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
800	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
900	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1000	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
1200	.	.	.	.	.							
1400	.	.	.	.	.							
1600	.	.	.	.	.							
1800	.	.	.	.	.							
2000	.	.	.	.	.							

* – див. [табл. 2.1](#), однакові параметри для частки та підкладки;

** – для усіх матеріальних констант (M1-M5) окремо.

У кожній з симуляцій було знайдено час, за який частка досягає максимальної глибини проникнення у підкладку, далі цей час було зафіксовано разом із отриманим зображенням та значенням стресу за Мізесом. Ті ж самі дії було виконано і для часу з найбільшим значенням стресу. Приклад отриманих даних зображено у табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Результати проведеної симуляції для частки зі швидкістю 1000 м/с; параметри Джонсона Кука для частки та підкладки – М1.

Симуляція												Параметри Джонсона Кука	Швидкість частки, м/с
З максимальною глибиною проникнення (0-4800)						З максимальним стресом за Мізесом (0-4900)							
Стрес за Мізесом, МПа						Стрес за Мізесом, МПа							
0 960 1920 2880 3840 4800						0 980 1960 2940 3920 4900							
												M1	1000
Час максимальної глибини, нс	Час з максимальним стресом за Мізесом, нс	Максимальне напруження за Мізесом											
		Для часу з максимальною глибиною, Па					Для часу з максимальним напруженням, Па						
2,9756	1,5753	4,729e3					4,883e3						

Слід відмітити, що максимальне значення стресу за Мізесом для шкал в обох випадках (максимальна глибина та максимальне значення стресу) визначалося наступним чином: обирався блок симуляцій (наприклад зі швидкістю частки від 100 м/с до 1000 м/с), на максимальній швидкості знаходився час з максимальним проникненням і значення стресу на цьому моменті приймалося за максимальне значення для шкали, яка потім використовувалася і для інших швидкостей. Аналогічні дії проводилися і для часу з максимальним стресом. Використання такої шкали обумовлено тим, що, у більшості випадків, зі зниженням швидкості значення стресу також зменшується, а також важливим є те, що наявність однієї шкали для блоку симуляцій (для максимального проникнення та максимального значення стресу – окремо) дає можливість більш якісного візуального порівняння.

Наступним кроком була компоновка усіх результатів. Для зручності було створено блоки результатів (наприклад, для швидкостей від 100 до 1000 м/с). Приклад одного з таких блоків (для швидкостей від 100 до 1000 м/с) приведено на рис. 3.7.

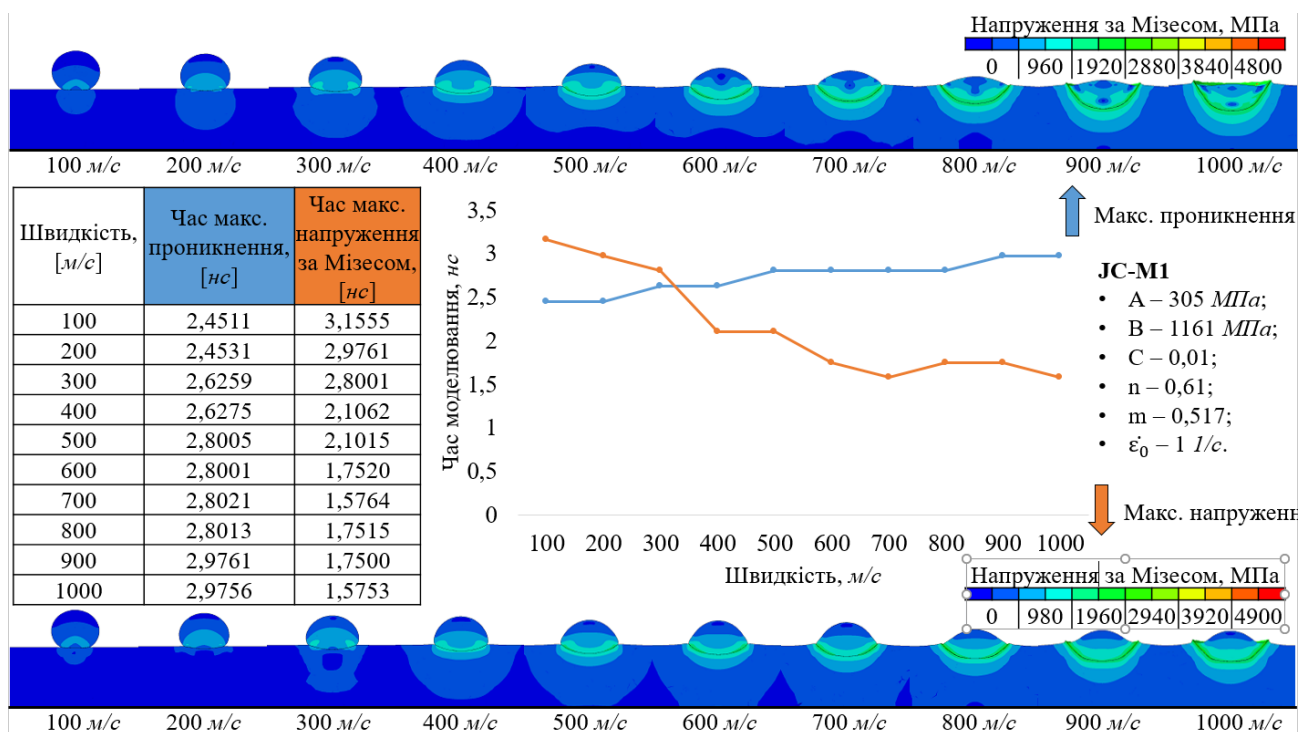


Рисунок 3.7 – Блок результатів для першої частини дослідження

Завдяки такому блоку результатів, як зображено вище, було проведено порівняльний аналіз, встановлено певні закономірності і зроблено висновки, які описано далі по тексту.

Різниця поведінки частки при використанні певних параметрів Джонсона Кука більш за все простежується дивлячись на максимальне значення напруження за Мізесом – найбільше значення в основному спостерігається для JC-M3, найменше для JC-M2. Дивлячись на це можна зробити висновок про те, що матеріал з параметрами JC-M2 є найбільш пластичним, завдяки чому частка більше проникає у підкладку.

У залежності від швидкості частки час максимального проникнення змінюється наступним чином – чим більша швидкість частки тим раніше вона максимально проникає у підкладку. Але слід також зауважити, що велика швидкість може призводити до деформації підкладки, саме тому для методу ХГН не використовуються швидкості часток більше ніж 1200 м/с. У якості доказів на рисунку 3.8 відображено результати симуляції для швидкості частки від 1000 м/с до 2000 м/с та параметрів Джонсона Кука для матеріалів – М1.

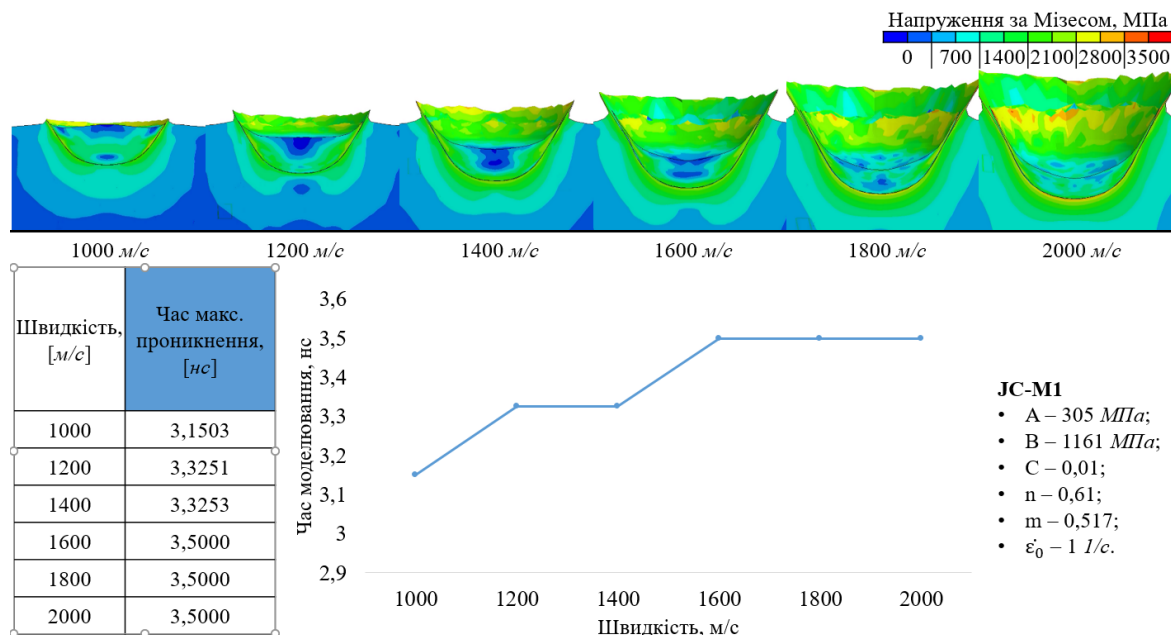


Рисунок 3.8 – результати симуляції для швидкості частки від 1000 м/с до 2000 м/с та параметрів Джонсона Кука для матеріалів – М1

Дивлячись на зображення вище можна побачити, що починаючи із швидкості 1400 м/с частки проникає вже занадто глибоко до підкладки, а враховуючи те, що час максимального проникнення для швидкостей 1600-2000 м/с – 3,5 нс, можна стверджувати, що за умов більшого часу для симуляції частка проникала б ще глибше.

Для моментів симуляцій з максимальним значенням стресу не вдалося виявити ніякої залежності, момент з максимальним напруженням може бути як на початку на і наприкінці часу симуляції.

Майже у всіх випадках максимальне значення стресу не співпадає з максимальним проникненням. У більшості випадків момент симуляції у якому простежується найбільше значення стресу настає раніше ніж момент максимального проникнення частки у підкладку.

Доречним буде також прослідкувати відмінність між результатами, які отримано для симуляцій без додавання температури для частки та навпаки з додаванням. Для цього було порівняно результати симуляції (для максимального проникнення частки) з температурою частки 0 K, 200 K, 400 K, 600 K, з параметрами Джонсона Кука – M1, із швидкістю частки від 100 м/с до 1000 м/с (рис. 3.9).

Дивлячись на результати такого порівняння можна зробити наступні висновки:

1. З підвищенням температури пластичність матеріалу збільшується і, так як для підкладки температурний режим не задавався, глибина проникнення частки збільшується пропорційно до збільшення швидкості частки, а також ступінь деформації частки збільшується.

2. Максимальне значення напруги (стресу) за Мізесом змінюється для кожної величини температури для частки, але майже без будь-якої залежності.

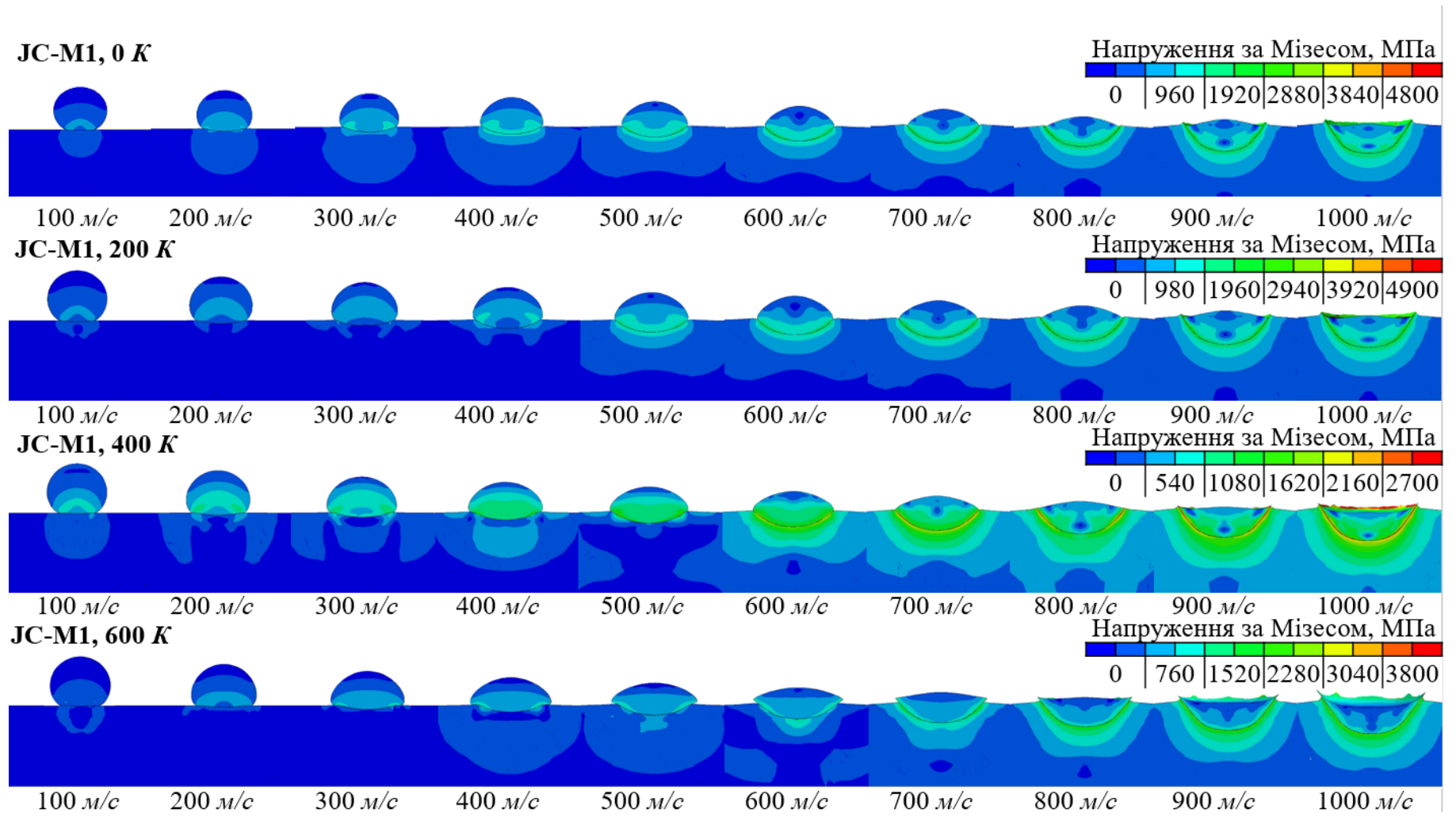


Рисунок 3.9 – Порівняння результатів для максимального проникнення

За результатами першої частини досліджень отримано 50 блоків результатів (470 симуляцій).

3.4 Результати моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою при різних температурах частки та підкладки

Так як у першій частині дослідження з використанням температури для частки проводилися у Кельвінах, було вирішено зробити подальші симуляції у Цельсіях. На цей раз аналізувалась та порівнювалась тільки глибина проникнення частки зі швидкістю 700 м/с за умов різних температур для самої частки та підкладки, а також за умов різних параметрів Джонсона Кука. Для зручності було створено п'ять блоків результатів (рис. 3.10-3.14). Цього разу швидкість частки була фіксованою в рамках одного блоку (700 м/с), температура для частки та підкладки варіювалася (у діапазоні від $25 \text{ }^{\circ}\text{C}$ до $600 \text{ }^{\circ}\text{C}$). Максимальне значення шкали в межах одного блоку результатів визначалось шляхом пошуку максимального значення на всіх симуляціях блоку.

Базову модель для проведення другої частини дослідження було змінено. При виборі типу елемента для кінцево-елементної сітки було додано ще один параметр – «Distortion control», який потрібен для захисту сітки від інвертування та надмірного деформування. Таке рішення було прийнято, тому що при проведенні деякої кількості симуляцій у першому дослідженні процес моделювання завершувався раніше, ніж походив час, відведений на симуляцію ($3,5 \text{ нс}$).

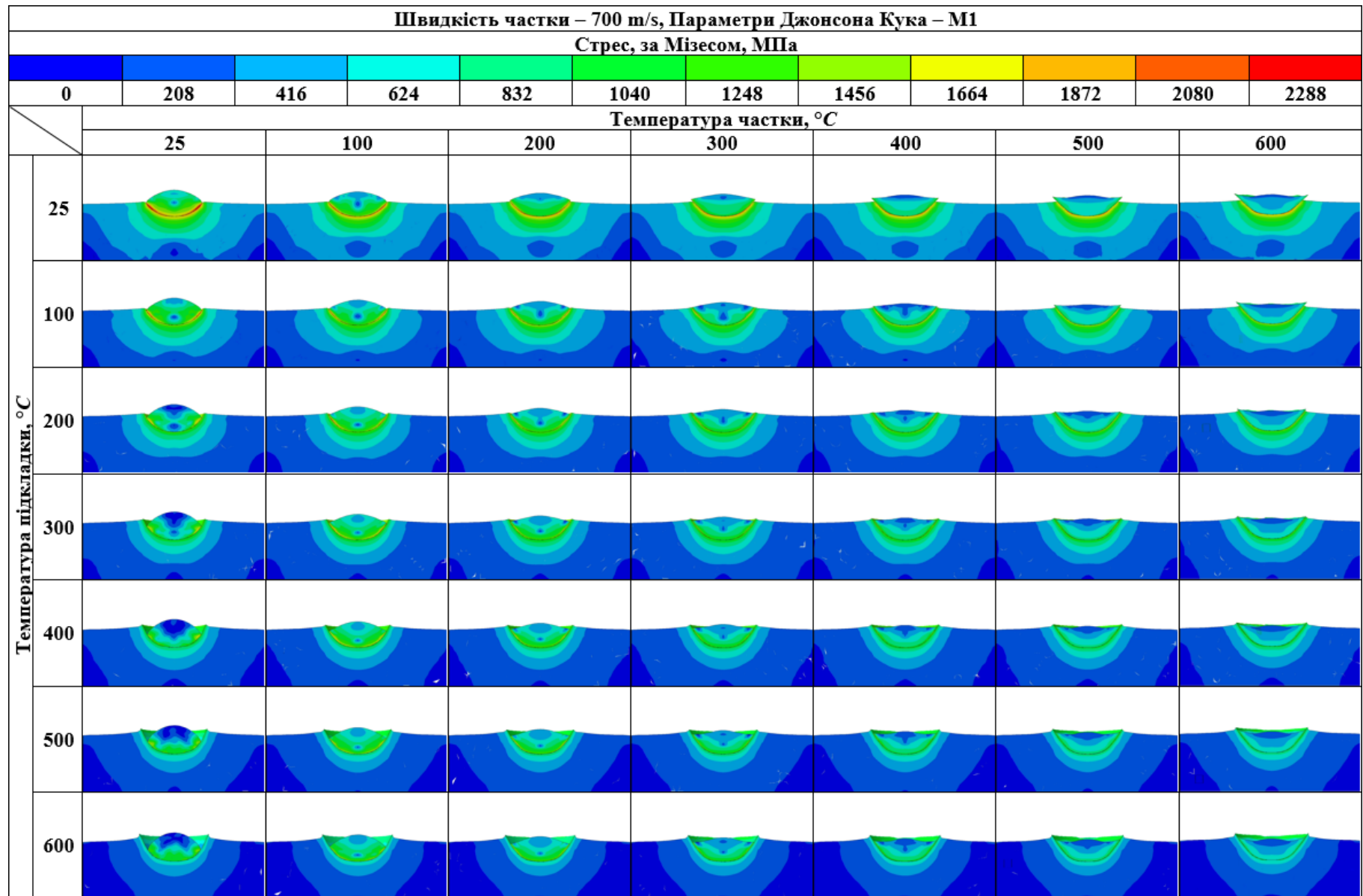


Рисунок 3.10 – Блок результатів для параметрів Джонсона Кука M1

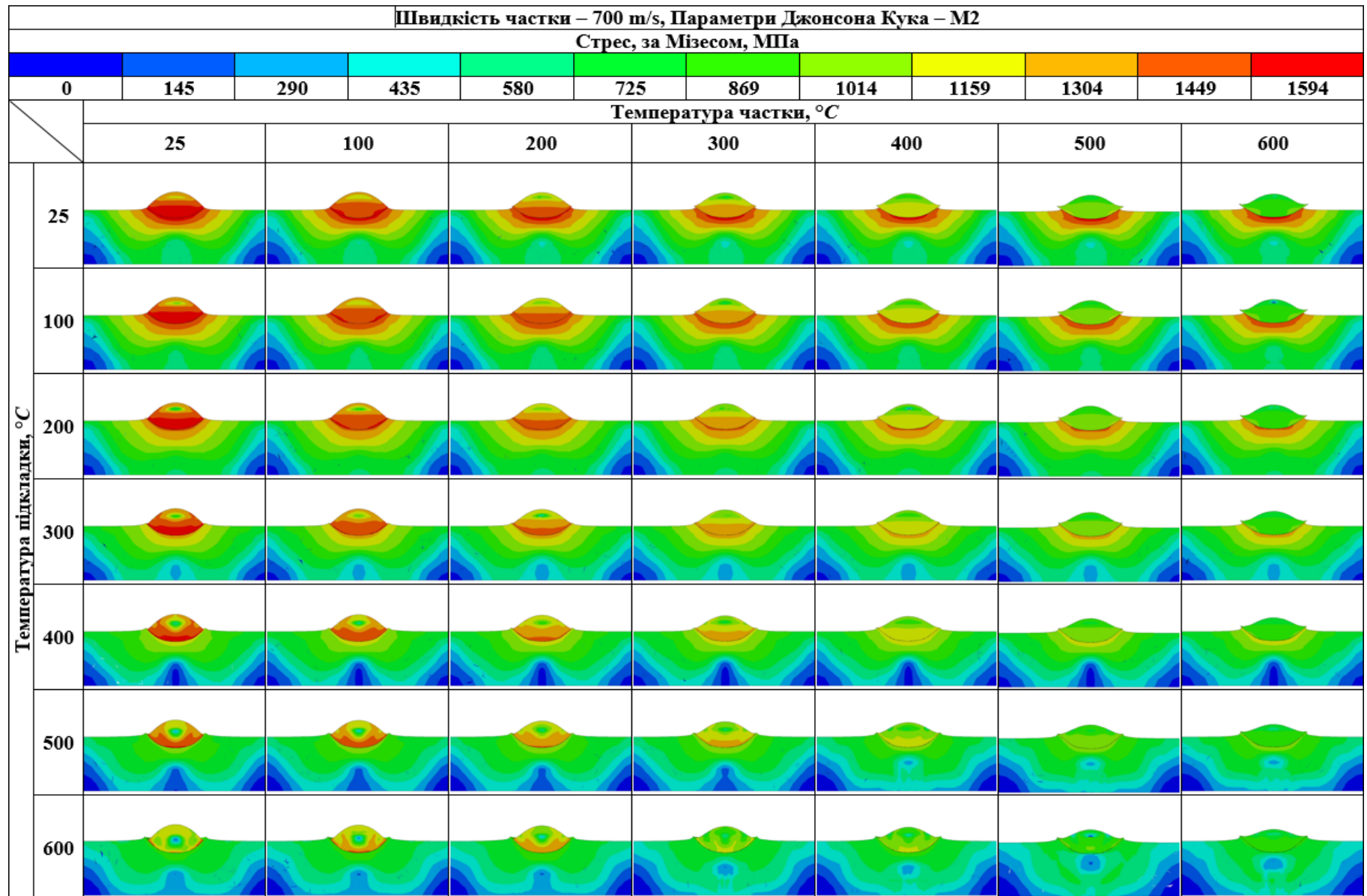


Рисунок 3.11 – Блок результатів для параметрів Джонсона Кука M2

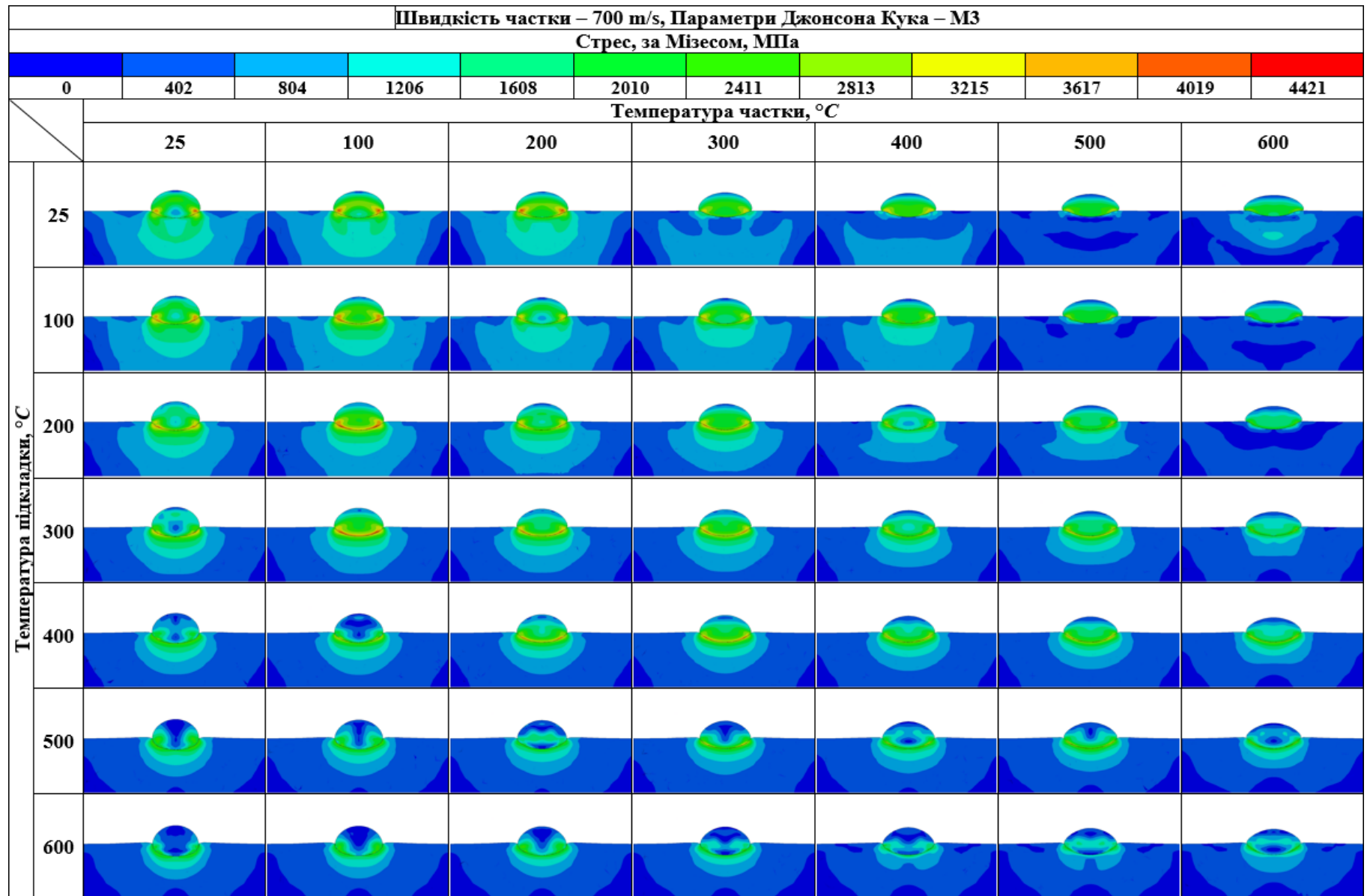


Рисунок 3.12 – Блок результатів для параметрів Джонсона Кука М3

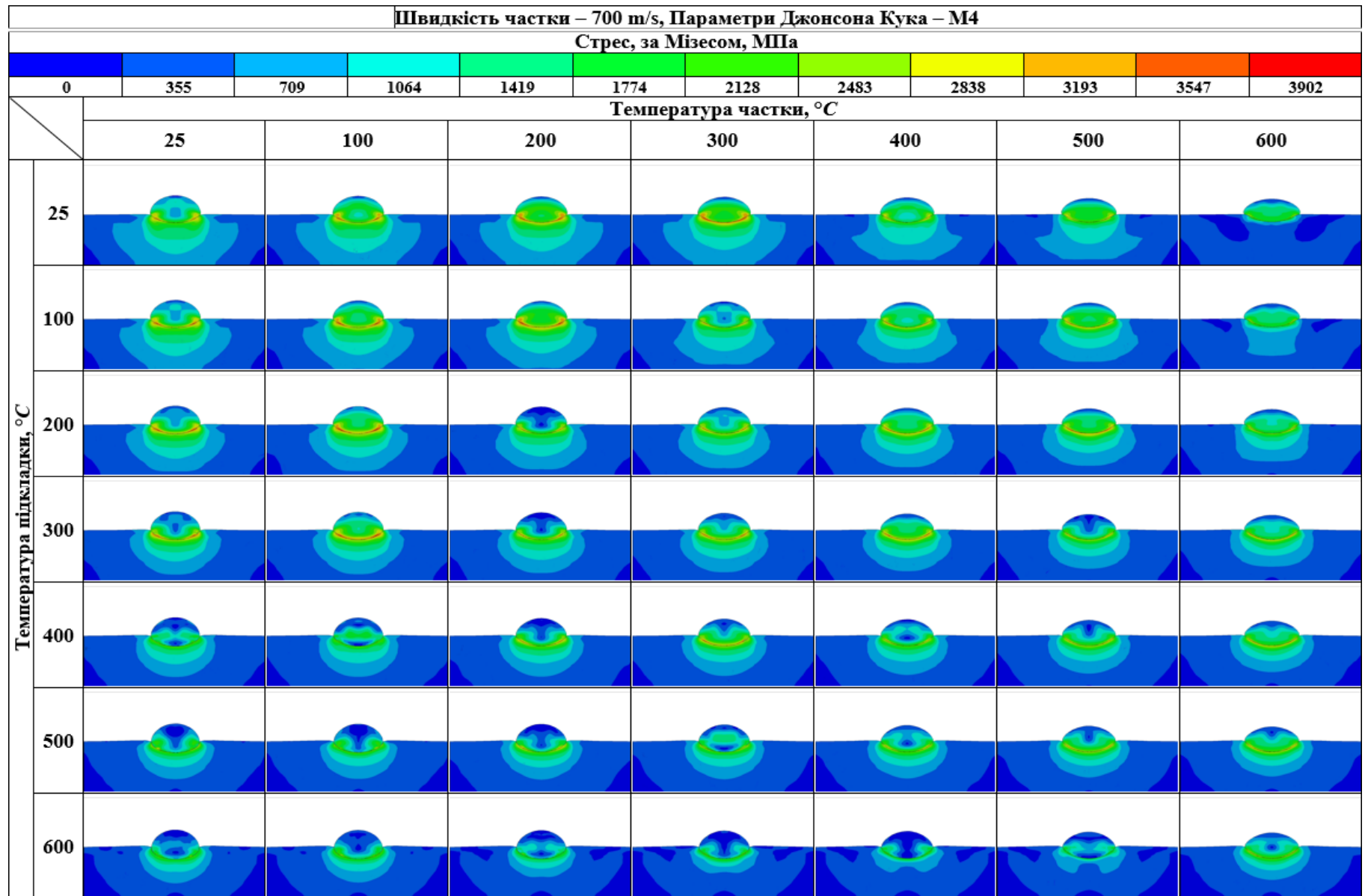


Рисунок 3.13 – Блок результатів для параметрів Джонсона Кука М4

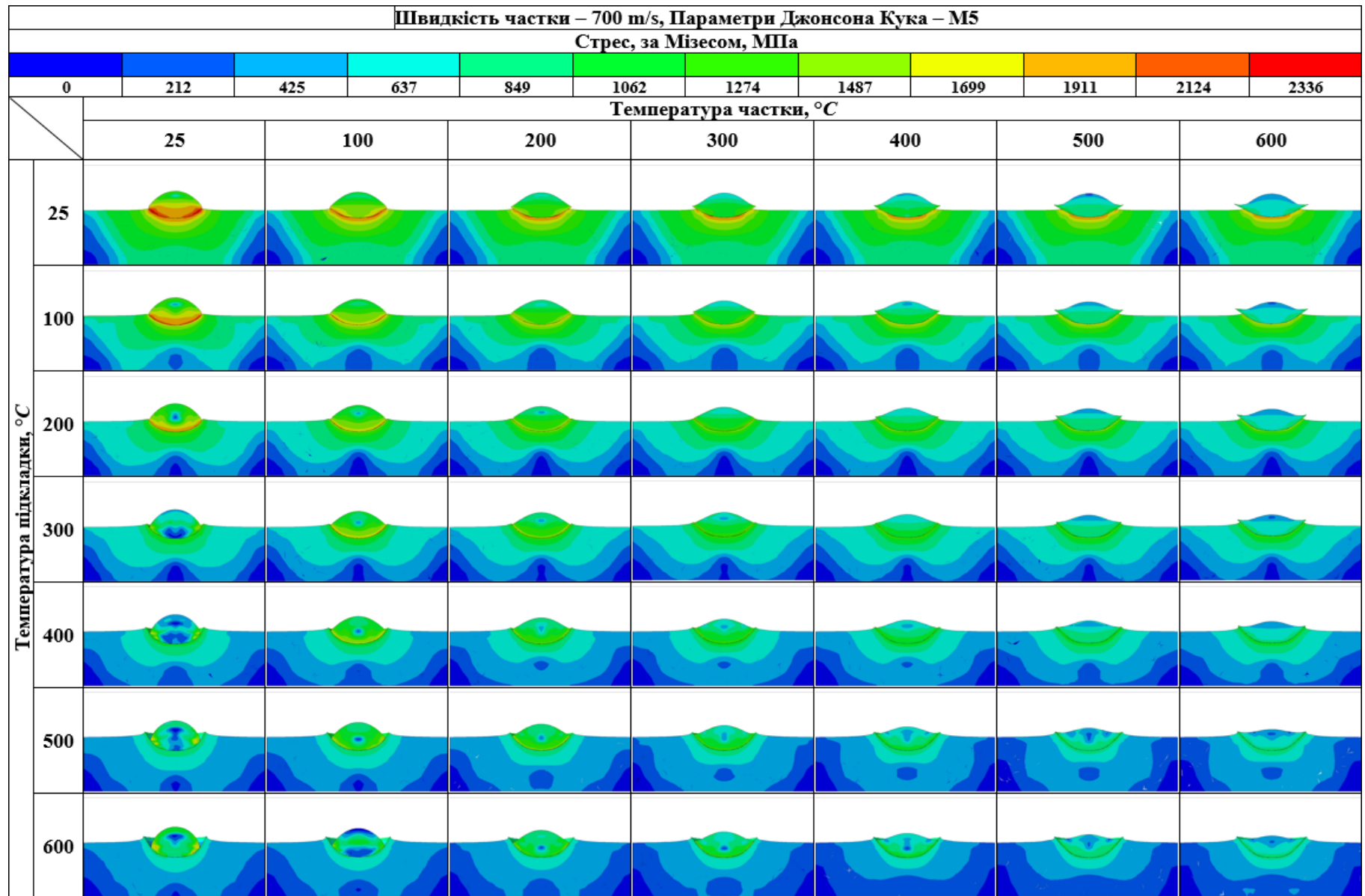


Рисунок 3.14 – Блок результатів для параметрів Джонсона Кука M5

Таким чином за результатами другої частини дослідження отримано 5 блоків результатів (245 симуляцій).

Завдяки таким блокам результатів, як зображено вище з'являється можливість порівняння та аналізу наступних даних (табл. 3.4):

Таблиця 6.6 – Аналіз даних на основі кожного блоку результатів

1. Максимальне проникнення частки у залежності від температури частки і підкладки.	За результатами зроблено наступний висновок – чим більша температура частки та підкладки, – тим більше частка проникає у підкладку, зі збільшенням швидкості цей ефект буде збільшуватися. Чим більша температура матеріалу – тим він більш пластичний та більше піддається деформації.
2. Зміна величини стресу у залежності від температурного режиму частки та підкладки.	Найбільше значення стресу спостерігається у симуляціях з використанням невисоких температур, тому що у цих випадках матеріал менш пластичний та менше піддається деформації – тому значення стресу більше.
3. Різниця між ступнем деформації частки для всіх симуляцій блоку.	Висновки з приводу цього теж пов'язані з пластичністю матеріалу, частка та підкладка більше деформується за умов високої температури матеріалу, що використовується.

Таким чином у третьому розділі було проведено аналіз результатів моделювання роботи установки для холодного газодинамічного наплення та зроблено певні висновки, які описано далі по тексту.

Було проаналізовано модель надзвукового сопла, а саме перевірено висновок щодо можливості підвищення продуктивності сопла по масі лише за рахунок збільшення критичного перерізу сопла. Було зроблено висновок про те, що площину критичного перерізу обмежено, а отже і обмежено продуктивність сопла, для якого було створено чисельне моделювання. Максимальна продуктивність сопла по масі, яку було отримано – $250 \text{ м}^2/\text{год}$. Для подальшого збільшення продуктивності запропоновано:

1. Використання багатосоплових блоків з можливістю установки сопел там, де необхідно наносити покриття.

2. Використання сопел у вигляді декількох пневмоканалів з індивідуальними підводами газопорошкової суміші і загальною форкамерою.

Також у третьому розділі було проаналізовано сумісність критеріїв чисельної моделі багатоканального нагрівача газу. За допомогою побудови графіків залежності кількості нагрівальних елементів від їх внутрішнього діаметру було отримано область допустимих значень, при яких проєктований нагрівач одночасно задовольняє усім критеріям. Один з критеріїв не мав істотного впливу на область значень, яка задовольняє всім критеріям, тому було вирішено у подальшому його не враховувати. Також було отримано ще один критерій, формула якого враховує потужність, та зіставлено його з попередніми критеріями. Для нагрівача з одним нагрівальним елементом було побудовано графік області припустимих значень довжини та внутрішнього діаметру нагрівального елементу. Використовуючи створену чисельну модель нагрівача газу, можна спроектувати та побудувати різноманітні трубчасті нагрівачі. Важливою особливістю використання таких нагрівачів є отримання хімічно чистих покриттів, тому що омичний нагрів не вносить домішок у робочий газ та, відповідно, у покриття.

Також проведено аналіз результатів моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів. Для проведення симуляцій було використано певні комбінації параметрів для частки та підкладки (параметри Джонсона Кука для матеріалу, швидкість частки, температура частки та підкладки). У якості результатів отримано певні блоки інформації, які дозволили провести порівняльний аналіз результатів дослідження та зробити висновки у вигляді певних залежностей, які описано далі по тексту.

Різниця поведінки частки при використанні певних параметрів Джонсона Кука більш за все простежується дивлячись на максимальне значення напруження за

Мізесом – найбільше значення в основному спостерігається для JC-M3, найменше для JC-M2. Дивлячись на це можна зробити висновок про те, що матеріал з параметрами JC-M2 є найбільш пластичним, завдяки чому частка більше проникає у підкладку.

У залежності від швидкості частки час максимального проникнення змінюється наступним чином – чим більша швидкість частки тим раніше вона максимально проникає у підкладку. Але слід також зауважити, що велика швидкість може призводити до деформації підкладки, саме тому для методу ХГН не використовуються швидкості часток більше ніж 1200 м/с. Для моментів симуляцій з максимальним значенням стресу не вдалося виявити ніякої залежності, момент з максимальним напруженням може бути як на початку на і наприкінці часу симуляції.

Майже у всіх випадках максимальне значення стресу не співпадає з максимальним проникненням. У більшості випадків момент симуляції у якому простежується найбільше значення стресу настає раніше ніж момент максимального проникнення частки у підкладку.

Чим більша температура частки та підкладки, – тим більше частка проникає у підкладку, зі збільшенням швидкості цей ефект тільки збільшується. Чим більша температура матеріалу – тим він більш пластичний та більше піддається деформації.

Найбільше значення стресу спостерігається у симуляціях з використанням невисоких температур для частки та підкладки, тому що у цих випадках матеріал менш пластичний та менше піддається деформації – тому значення стресу більше.

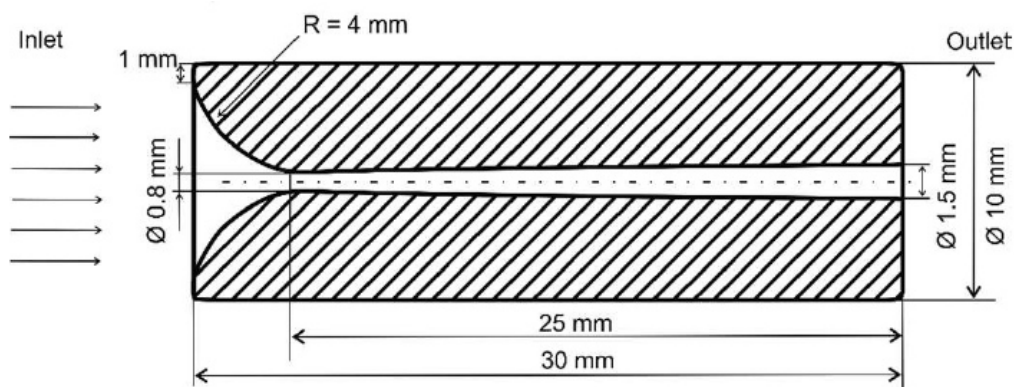
4 РОЗРОБКА ПАРАМЕТРИЧНОЇ 3D-МОДЕЛІ ТА КРЕСЛЕННЯ СОПЛА ЛАВАЛЯ

У якості моделі для параметризації та розробки параметричного креслення було обрано сопло Лавалю, яке оптимізовано німецькими вченими з Технічного університету міста Кайзерслаутерн [47]. Параметризація проводиться для того, щоб під час проектування сопел з різними конструктивними та технологічними параметрами не доводилося витратити велику кількість часу на створення креслень.

4.1 Постановка задачі

Необхідно розробити параметричне креслення надзвукового сопла, детально описати процес створення креслення, призначення зовнішніх змінних, підтвердити правильність програмування параметрів шляхом підстановки значень зі стандартного ряду.

Параметричне креслення будується відповідно до рис. 4.1 [47] із залежністю розмірних значень та з можливістю вибору типорозміру і довідковими даними.



Inlet – вхід; Outlet – вихід

Рисунок 4.1 – Зображення креслення надзвукового сопла

4.2 Геометричні зв'язки і обмеження

Розробка параметричного креслення зазвичай більш трудомісткий і тривалий процес в порівнянні з розробкою звичайного плоского креслення. Проте, в результаті можна отримати комплекс креслень для цілого ряду типорозмірів однотипних деталей. Ця особливість поставила параметричне проектування на чолі завдань проектування в наш час. На даний момент більшість САПР має широкий спектр можливостей для параметризації, і виробники продовжують їх розширювати.

В даній роботі для створення параметричного креслення використовується САПР Компас 3D.

Першим кроком при створенні параметричного креслення є створення плоского креслення типової деталі за заданими розмірами. У процесі використовується стандартний інструментарій САПР. В результаті проектування отримано зображення деталі (рис. 4.2).

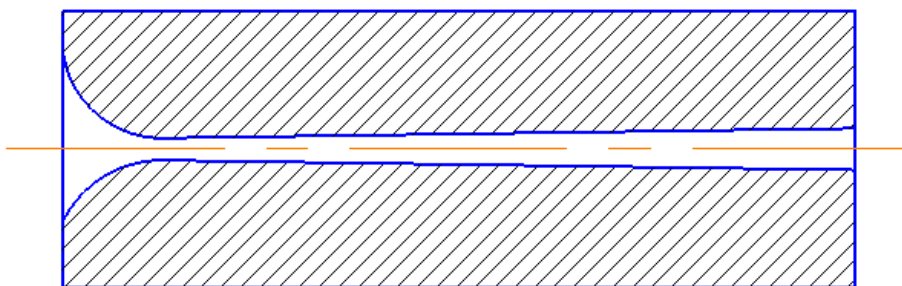


Рисунок 4.2 – Зображення сопла

Наступним кроком є включення можливості параметризації наявного креслення. Для цього необхідно:

1. Виділити всі елементи креслення, які необхідно параметризувати.

2. На панелі інструментів в розділі «параметризація» клікнути на кнопку «Параметризувати об'єкти» (рис. 4.3).

3. У діалоговому вікні «Встановіть типи обмежень» вибрати необхідні параметри і підтвердити операцію (рис. 4.4).

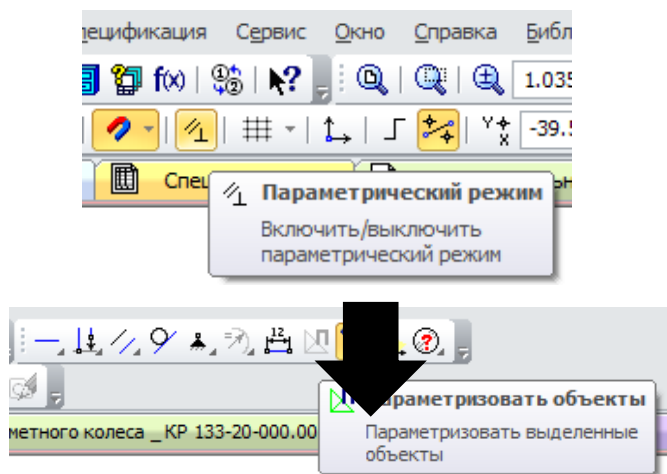


Рисунок 4.3 – Порядок включення параметризації

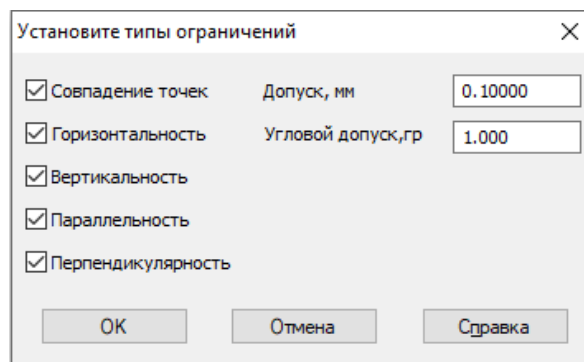


Рисунок 4.4 – Діалогове вікно параметрів параметризації

Для відображення залежностей, змінних, обмежень та ін. на панелі інструментів "Параметризація" необхідно активувати режим перегляду обмежень об'єктів шляхом кліка на кнопці «Відображати обмеження». В результаті даних дій на кресленні з'являються деякі значки обмежень, які означають, що елементи креслення вже мають деякі умови розташування в полі креслення (рис. 4.5).

Крім обмежень, створюваних автоматично при створенні нових об'єктів, присутня можливість встановлення обмежень за вказівкою користувача. Для цього використовується панель «Параметризація», на якій знаходяться інструменти для встановлення обмежень об'єктів креслення (рис. 4.6).

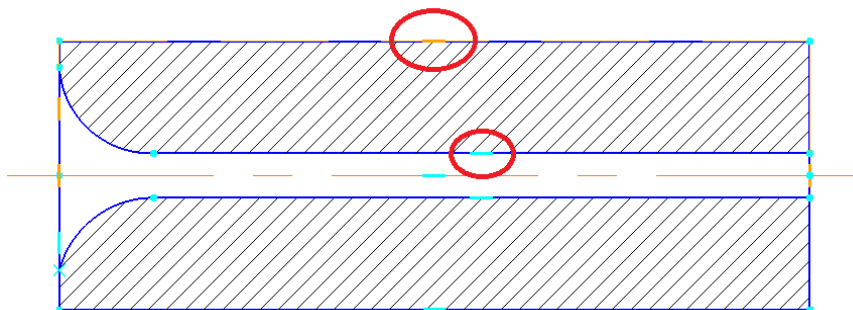


Рисунок 4.5 – Відображення обмежень елементів креслення сопла: а – обмеження неповне (блакитний маркер); б – повне обмеження, тобто параметри елемента повністю визначені параметрами моделі (помаранчевий маркер)

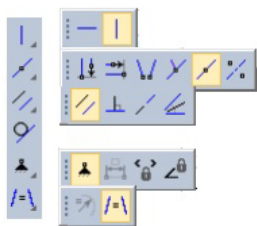


Рисунок 4.6 – Інструменти для встановлення обмежень об'єктів креслення сопла

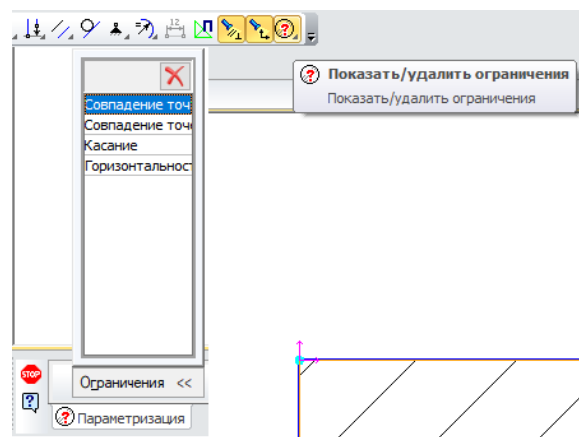


Рисунок 4.7 – Використання інструменту для редагування обмежень об'єктів

Крім встановлення обмежень і візуального їх спостереження за допомогою значків-маркерів можливо переглянути обмеження кожного окремо взятого об'єкта. Для цього необхідно скористатися інструментом «Показати / видалити обмеження», який знаходиться на панелі інструментів «Параметризація» (рис. 4.7).

При активації інструменту необхідно вказати об'єкт креслення сопла, обмеження якого необхідно переглянути чи редагувати. При вказівці об'єкта на нижній панелі з'являється відповідне меню, що містить список обмежень обраного об'єкта. За допомогою кнопки у верхній правій частині меню можливо видаляти окремі обмеження обраного об'єкта.

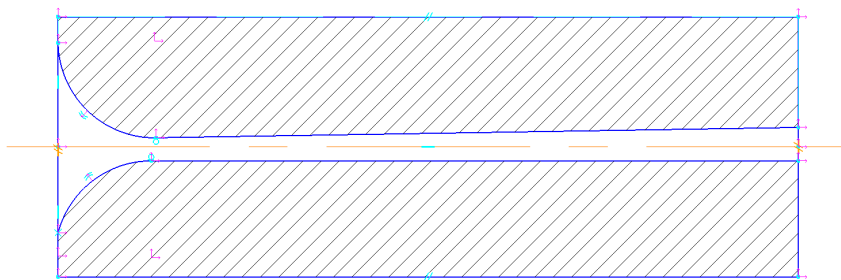


Рисунок 4.8 – Зображення сопла після встановлення обмежень

В результаті роботи з обмеженнями кожного об'єкта креслення можна отримати плоске креслення деталі (рис. 4.8), що володіє геометричними залежностями, які визначають його положення на аркуші креслення. Тепер креслення готове до подальшої параметризації і присвоєння змінних.

Створення параметричної моделі в просторі практично нічим не відрізняється від параметризації на площині.

У режимі створення деталі параметричний режим включений за замовчуванням.

Потрібно створити новий документ «КОМПАС-Деталь» і відразу зберегти його під ім'ям «Параметризація.m3d». Необхідно переконатися у вікні «Параметри», що в системі включена повна параметризація ескізів, після чого можна приступати до побудови.

Оскільки у даному випадку сопло знаходиться у трубі, потрібно враховувати це.

Запустити створення ескизу, в якості базової площини якого необхідно вибрати ZY. Натиснути кнопку «Окружність» на панелі інструментів «Геометрія» та

побудувати креслення корпусу (рис. 4.9). Якщо була включена параметризація, то система повинна автоматично накласти на створене зображення наступні обмеження:

- збіг точок відрізків;
- горизонтальність;
- вертикальність.

Щоб переконатися в цьому, необхідно виділити будь-який відрізок і виконати команду «Показати/видалити обмеження контекстного меню».

Далі необхідно задати змінні для зображення ескізу так, щоб при зміні однієї з них креслення перебудовувалося, зберігаючи положення свого центру і рівність довжин сторін. Для цього необхідно перейти на панель інструментів «Розміри» і натиснути кнопку «Лінійний розмір». На панелі властивостей у групі кнопок «Тип» натисніть кнопку вертикальний, щоб увімкнути створення вертикального розміру.

Оскільки на геометричні об'єкти накладені обмеження, після фіксації розміру система відразу запропонує встановити його значення і присвоїти йому змінну (рис. 4.10).

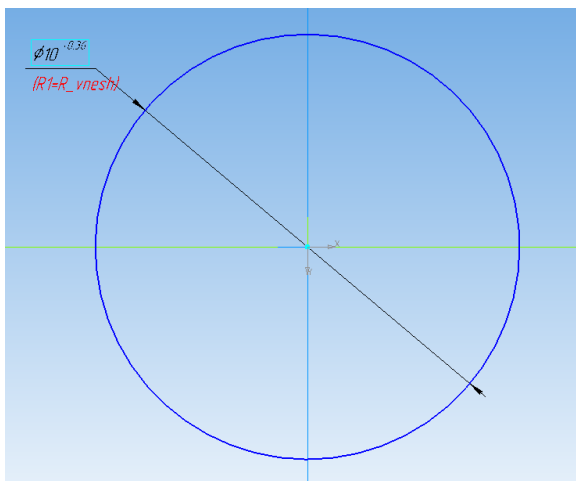


Рисунок 4.9 – Постановка параметричних розмірів. Вид справа

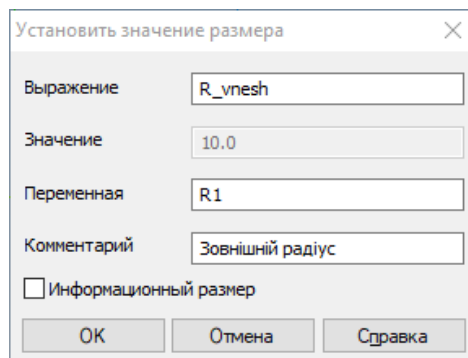


Рисунок 4.10 - Присвоєння значення та імені змінної параметризованого розміру

Після чого, потрібно натиснути кнопку на панелі інструментів «Редагування деталі», потім «Операція видавлювання». Далі необхідно вказати величину, на яку потрібно «розширити» деталь.

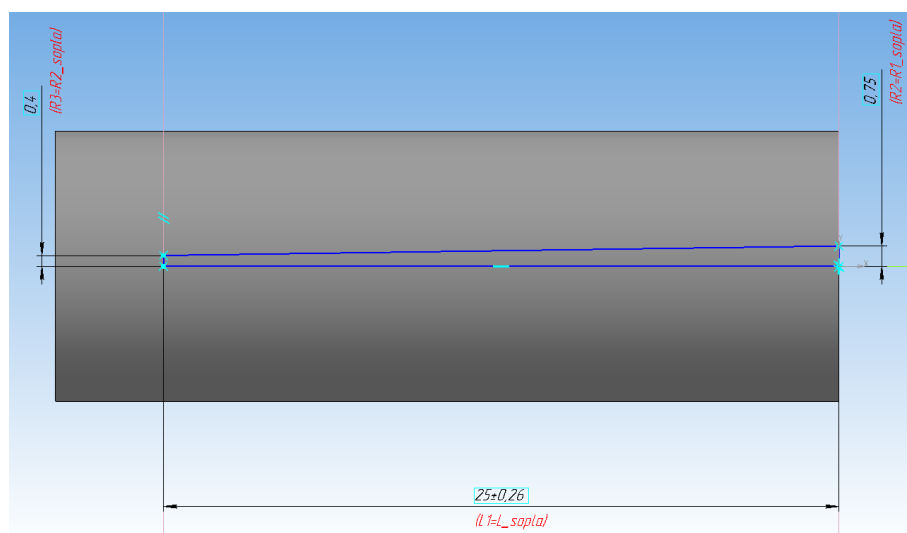


Рисунок 4.11 – Зображення креслення. Вид спереду

Тепер необхідно вибрати «Вид спереду», натиснути на відповідну, далі – «Ескіз». Оскільки раніше коло було описане від центра, тому зараз робимо так. Користуючись допоміжними лініями відмічаємо спочатку довжину, потім висоту з лівого та правого боків. Слід зазначити, що потрібно креслити лише верхню (як на

рис. 4.11) або нижню половину, так як потім буде використовуватись операція «Вирізати крученням». Після того, коли вказали необхідні розміри, обираємо «Редагування деталі» на панелі інструментів та тиснемо на «Вирізати крученням».

Знову вибираємо на ту ж саму ось – «Ескіз». Тепер потрібно зробити останню (праву) частину сопла. Алгоритм цієї частини повністю співпадає з попереднім кроком. Креслимо верхню (або нижню) частину за необхідними розмірами (рис. 4.12) та обираємо операцію вирізання.

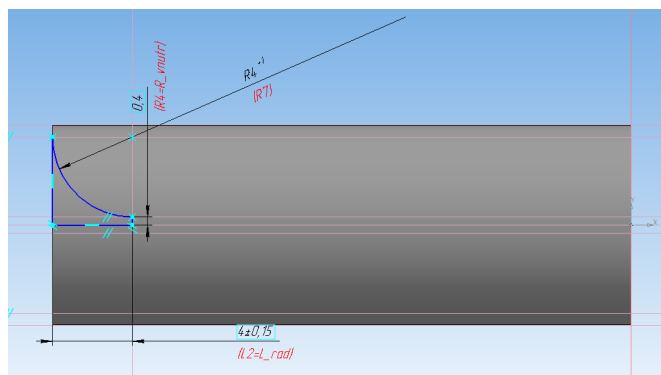


Рисунок 4.12 – Креслення
частини сопла

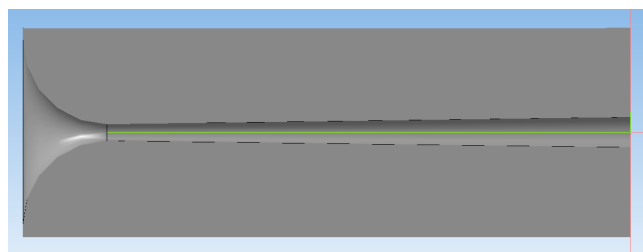


Рисунок 4.13 – Зображення
готового сопла

Вид готової деталі зображено на рис. 4.13. Такий вид був отриманий завдяки вбудованому «Перетину моделі».

Для визначення параметричних залежностей між змінними як креслення, так і моделі, в КОМПАС-3D існує спеціальне вікно «Редактор формул». Воно викликається за допомогою кнопки «Змінні».

Панелі інструментів «Стандартна» або команди меню «Вид» → «Панелі інструментів» → «Змінні». У цьому вікні відображаються всі змінні, які були присвоєні параметризованим розмірам графічного документа, ескизу або моделі. У ньому також задаються значення цих змінних і вводяться формули, за якими вони будуть розраховуватися. Вікно редактора формул може бути зафіксовано у однієї із

сторін головного вікна програми, відображатися в плаваючому стані (тобто ховатися за межами вікна, коли неактивно), вільно розміщуватися в межах головного вікна або взагалі не відображатися на екрані. За замовчуванням вікно змінних закрито.

Не виходячи з режиму редагування ескізу, необхідно викликати вікно «Змінні» і переконатися, що в ньому автоматично з'явилася додана в ескізі змінна (рис. 4.14).

Переменные					
Имя	Выражение	Значение			
[-] Деталь (Тел-1)			[-] (+) Эскиз:6		
..... R_vnesh	10.0	10.0	 v197		0.0
..... R1_sopla	0.750	0.750	 L1	L_sopla	25.0
..... R2_sopla	0.40	0.40	 R2	R1_sopla	0.750
..... L_sopla	25.0	25.0	 R3	R2_sopla	0.40
..... R_vnutr	0.40	0.40	[-] Вырезать элемент вращения:2		
..... L_rad	4.0	4.0	 v198		0.0
..... H1	29.0	29.0	 v201	Vr	360.0
..... Vr	360.0	360.0	[-] Вырезать элемент выдавливания:2		
..... H2	25.0	25.0	 v208		0.0
..... Vrз	360.0	360.0	 v214	H2	25.0
[+] (т)Начало координат			[-] (-) Эскиз:5		
[-] (+) Эскиз:2			 v72		0.0
..... v24		0.0	 L2	L_rad	4.0
..... R1	R_vnesh	10.0	 R4	R_vnutr	0.40
[-] Операция выдавливания:1			 R7		4.0
..... v25		0.0	[-] Вырезать элемент вращения:3		
..... v28	H1	29.0	 v226		0.0
..... v30		0.0	 v229	Vrз	360.0

Рисунок 4.14 - Вікно «Змінні»

В результаті виконаних дій можна отримати повністю параметризовану модель корпусу.

4.3 Таблиці зовнішніх змінних

Для створення таблиці зовнішніх даних використовується табличний процесор MS Excel (рис. 4.15). Враховуючи, що таблиця буде використовуватися в якості

джерела зовнішніх змінних при створенні параметричного креслення в Компас 3D необхідно виконані наступні вимоги:

1. Імена змінних розташовуються в рядок.
2. Значення змінних розташовуються по рядках. Діапазон значень кожної змінної необхідно розташувати по стовпцю з відповідним ім'ям.
3. Для забезпечення оптимальної сумісності файл таблиці виконати у форматі «.xls».

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1	R_vnesh	R1_sopla	R2_sopla	L_sopla	R_vnutr	L_rad	H1	Vr	H2	Vrz
2	5	0,35	0,15	25	0,15	4	29	360	25	360
3	7	0,5	0,25	25	0,25	4	29	360	25	360
4	10	0,75	0,4	25	0,4	4	29	360	25	360
5	13	1	0,51	25	0,51	4	29	360	25	360
6	15	1,35	0,65	25	0,65	4	29	360	25	360
7	20	1,5	0,7	25	0,7	4	29	360	25	360
8	25	1,75	0,9	25	0,9	4	29	360	25	360
9	30	2	1,01	25	1,01	4	29	360	25	360
10	35	2,35	1,15	25	1,15	4	29	360	25	360
11	40	2,5	1,31	25	1,31	4	29	360	25	360
12	45	2,75	1,4	25	1,4	4	29	360	25	360
13	50	3	1,52	25	1,52	4	29	360	25	360
14	55	3,35	1,65	25	1,65	4	29	360	25	360
15	60	3,5	1,7	25	1,7	4	29	360	25	360

Рисунок 4.15 – Таблиця зовнішніх змінних, виконана в MS Excel

Прив'язка таблиці зовнішніх змінних до параметричного креслення дозволяє автоматизувати підстановку значень змінних для кожного конкретного виконання деталі шляхом вибору відповідного рядка значень.

Перед прив'язкою зовнішньої таблиці значень необхідно задати таблицю змінних у файлі креслення. Для цього необхідно активувати панель «Змінні»: в рядку головного меню вибрати «Вид → Панелі інструментів → Змінні». В результаті зліва з'являється панель змінних для даного документа. Далі необхідно задати в осередках панелі імена і значення змінних для креслення деталі. В результаті отримуємо наступне (рис. 4.16).

Имя	Выражение	Значение
Деталь (Тел-1)		
R_vnesh	10.0	10.0
R1_sopla	0.750	0.750
R2_sopla	0.40	0.40
L_sopla	25.0	25.0
R_vnutr	0.40	0.40
L_rad	4.0	4.0
H1	29.0	29.0
Vr	360.0	360.0
H2	25.0	25.0
Vrз	360.0	360.0

Рисунок 4.16 – Панель змінних для креслення плоского приварного фланця

Щоб уникнути помилок програми необхідно для всіх змінних параметричного креслення задати параметр «Зовнішня».

Для прив'язки таблиці значень зовнішніх змінних необхідно клікнути на кнопку «Таблиця змінних» на панелі «Змінні» (рис. 4.17).

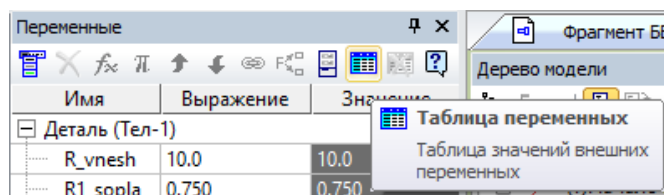


Рисунок 4.17 – Вид кнопки
«Таблиця змінних»

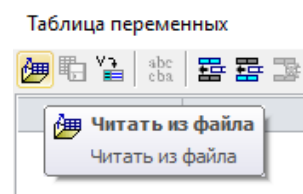
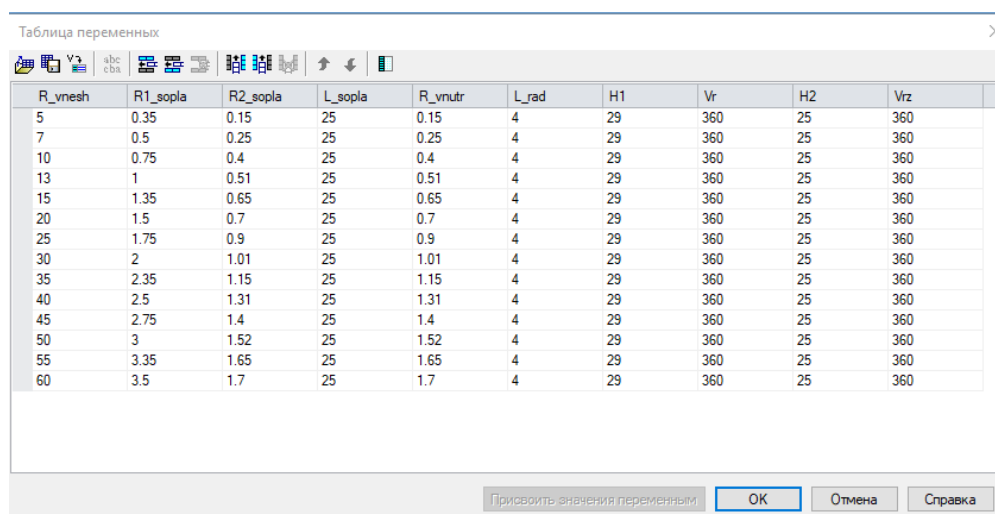


Рисунок 4.18 – Вид кнопки
«Читати з файлу»

Для пошуку необхідного файлу з даними на жорсткому диску необхідно клікнути на кнопку «Читати з файлу» (рис. 4.18).

Далі в вікні «Провідника» необхідно вибрати необхідний файл таблиці зі змінними. Після вибору заздалегідь створеного файлу, при повторному кліці на кнопку «Таблиця змінних» (4.19) відкривається діалогове вікно таблиці змінних.

Вибір значень змінних здійснюють шляхом вибору необхідного рядка в діалоговому вікні. Для підтвердження вибору необхідно клікнути на кнопки «присвоїти значення змінним» і система автоматично присвоїть значення змінним з відповідними іменами. Варто звернути увагу, що імена змінних в таблиці змінних і на панелі «Параметризація» повинні збігатися з урахуванням регістра.



R_vnesh	R1_sopla	R2_sopla	L_sopla	R_vnutr	L_rad	H1	Vr	H2	Vr2
5	0.35	0.15	25	0.15	4	29	360	25	360
7	0.5	0.25	25	0.25	4	29	360	25	360
10	0.75	0.4	25	0.4	4	29	360	25	360
13	1	0.51	25	0.51	4	29	360	25	360
15	1.35	0.65	25	0.65	4	29	360	25	360
20	1.5	0.7	25	0.7	4	29	360	25	360
25	1.75	0.9	25	0.9	4	29	360	25	360
30	2	1.01	25	1.01	4	29	360	25	360
35	2.35	1.15	25	1.15	4	29	360	25	360
40	2.5	1.31	25	1.31	4	29	360	25	360
45	2.75	1.4	25	1.4	4	29	360	25	360
50	3	1.52	25	1.52	4	29	360	25	360
55	3.35	1.65	25	1.65	4	29	360	25	360
60	3.5	1.7	25	1.7	4	29	360	25	360

Рисунок 4.19 – Діалогове вікно таблиці змінних

Можливість зв'язування таблиці з зовнішніми змінними дозволяє значно прискорити процес проектування, а також підвищує якість одержуваного креслення і зменшує ймовірність людської помилки при введенні даних.

4.4 Розробка параметричного креслення

Завершальним і найбільш відповідальним кроком при створенні параметричного креслення деталі є встановлення залежностей між розмірами і змінними. В САПР Компас 3D цей процес автоматизований і відбувається при виставленні розмірних ліній на кресленні. При включеній параметризації після

проставлення лінійного розміру з'являється діалогове вікно, в якому користувач може встановити значення величини розміру і його позначення (рис 4.20).

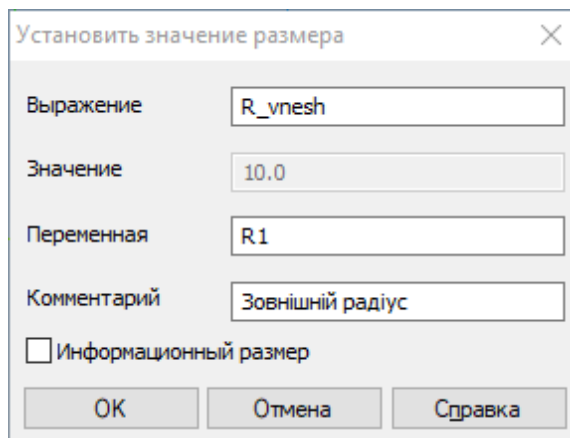


Рисунок 4.20 – Діалогове вікно встановлення розміру елемента креслення

Вивчивши діалогове вікно варто відзначити, що в якості розміру елемента можна встановити вираз із застосуванням змінних, заданих раніше. Крім того, для спрощення сприйняття можливо кожному розміру задати своє ім'я змінної, відмінне від глобальних змінних.

Для зручності користувача присутня можливість залишати коментарі до змінної, щоб надалі спростити її ідентифікацію. Всі значення, записані в даному діалоговому вікні, будуть відображені у відповідних комірках панелі «Параметризація». Проставлення маркера «Інформаційний розмір» призведе до того, що цей розмір буде виводиться лише для довідки і не буде сприйматися системою як змінна. Відповідно вплив цього розміру на параметри моделі виключається.

Після проставлення розміру і завдання йому необхідних параметрів, при включеній опції «Показувати обмеження» під значенням розміру з'явиться червоний напис із змінною, що присвоєна йому і виразом, за яким ця змінна розрахована, якщо таке було задано раніше (рис. 4.21)

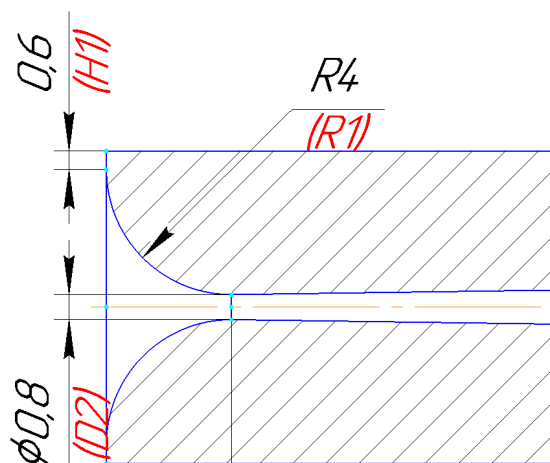


Рисунок 4.21 – Відображення параметричного розміру

Варто відзначити, що синім кольором відображаються зовнішні змінні, а жовтим кольором – інформаційні розміри (рис 4.22). Як видно, у інформаційних розмірів комірка «вираз» заблокована для редагування.

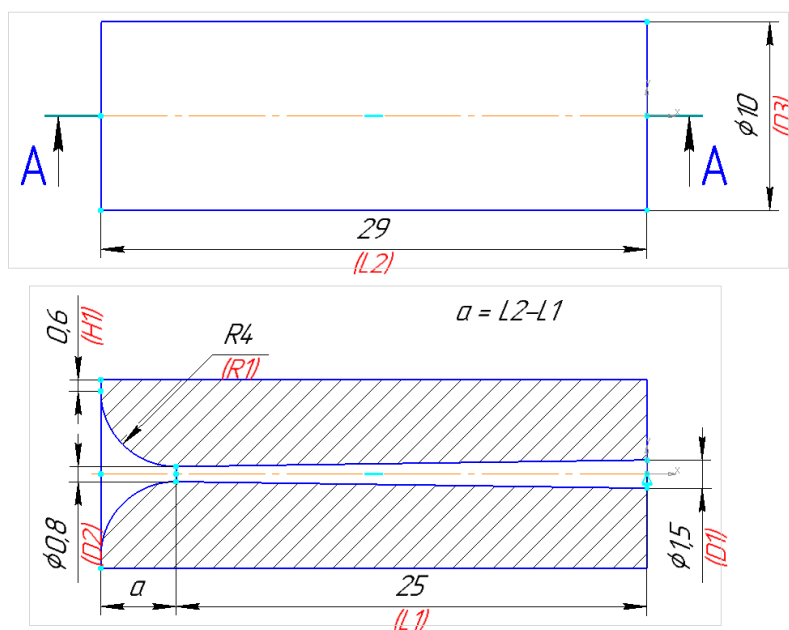


Рисунок 4.22 – Розміри і зазначені вирази

В результаті можна отримати наступне зображення (рис. 4.23).

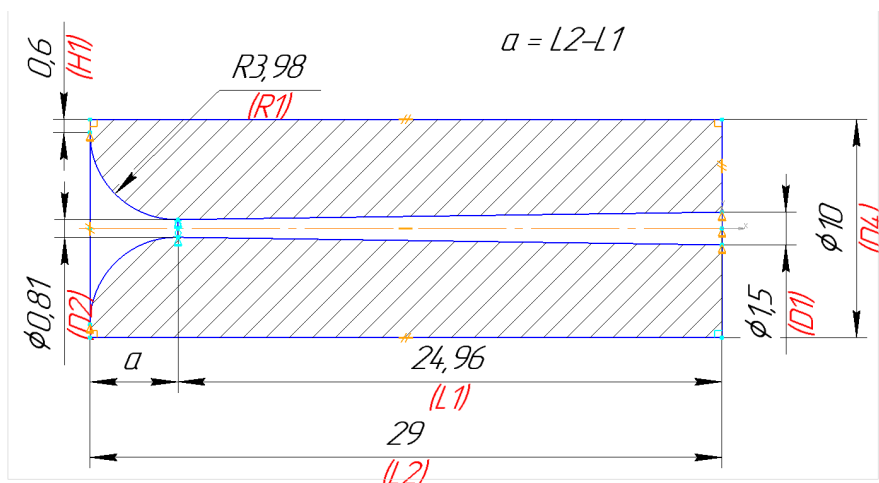


Рисунок 4.23 – Параметричне креслення, виконане відповідно до завдання

В результаті виконаних вище дій отримано параметричне креслення сопла Лаваля. За допомогою проведеної параметризації з'являється можливість швидкого створення креслень сопла для подальшого проектування останніх з різними конструктивними та технологічними параметрами.

5 РОЗРОБКА ЗАХОДІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ УСТАНОВКИ ДЛЯ ХОЛОДНОГО ГАЗОДИНАМІЧНОГО НАПИЛЕННЯ

5.1 Вдосконалення обладнання установки

Як було зазначено раніше, до основних складових обладнання досліджуваної установки входять сопло, дозатор часток та нагрівач газу. Кожна з цих складових має вплив на кінцевий результат користування установкою, а саме – на захисне покриття. А з цього виходить, що вдосконалення цих складових є невід’ємною частиною підвищення ефективності самої установки.

Отже, базуючись на проведених у даній роботі дослідженнях пропонується вдосконалення роботи сопла, яке полягає у:

1. Використанні чисельного моделювання, завдяки якому з’являється можливість підвищувати продуктивність сопла, враховуючи певні розміри та вхідні параметри потоку газу та часток.

2. Використанні багатосоплових блоків з можливістю установки сопел там, де необхідно наносити покриття.

3. Підвищенні продуктивності сопла за рахунок використання пневмоканалів з індивідуальними підводами газопорошкової суміші і загальною форкамерою. Це також дозволить наносити покриття з більшою швидкістю напилення і ділянкою нанесення.

4. Прискоренні процесу створення 3D-моделей та креслень конструкції сопла з різними розмірами та параметрами (продуктивність, швидкість часток на виході тощо) за допомогою запропонованого параметричного креслення.

Також пропонується чисельне моделювання роботи нагрівача газу, за допомогою використання якого можна варіювати вихідні параметри, такі, як максимальна температура підігріву газу, температура внутрішньої поверхні

нагрівального елементу, гідравлічний опір нагрівача. Використовуючи створену чисельну модель нагрівача газу, можна спроектувати та побудувати різноманітні трубчасті нагрівачі. Важливою особливістю використання таких нагрівачів є отримання хімічно чистих покриттів, тому що омичний нагрів не вносить домішок у робочий газ та, відповідно, у покриття.

Саме за допомогою використання запропонованих вище пропозицій може бути створено установку для холодного газодинамічного напилення, яка буде відповідати вимогам для створення якісного захисного покриття.

5.2 Моделювання ударної взаємодії частки та підкладки, як спосіб створення захисного покриття

На рівні з обладнанням досліджуваної установки великий вплив на якість захисного матеріалу має дослідження самого процесу нанесення покриття у розрізі окремої частки та поверхні, що напиляється. Це обумовлено тим, що при виборі матеріалу для майбутнього покриття треба враховувати властивості такого матеріалу (температура плавлення, щільність, пружність тощо), розмір часток матеріалу, швидкість нанесення і ще безліч параметрів, які будуть впливати на ступінь захисту поверхні, що напиляється. Саме тому дослідження процесу напилення частки на підкладку, яке проведено у цій роботі, є дуже важливим.

Використання приведеної у даній роботі базової моделі ударної поведінки частки при ударі о поверхню підкладки дозволяє:

- зрозуміти принципи взаємодії частки та підкладки;
- за допомогою комбінування різних параметрів, таких як температурний режим для частки і підкладки, швидкість частки, матеріали тощо спостерігати певні зміни ударної взаємодії;

– шляхом задання різних умов встановити певні параметри для часток матеріалу так, щоб можна було створити захисне покриття з таких часток, яке буде підходити підкладці з певними параметрами.

На основі проведених досліджень ударної поведінки запропоновано певні рекомендації для вибору параметрів для частки та підкладки. З п'яти випробуваних моделей пошкодження матеріалу Джонсона Кука найкраще себе поводити модель М1 та М5 (таблиця 2.1, розділ 2.3). Використання цих моделей дало змогу отримати найбільше проникнення частки до підкладки у порівнянні з іншими моделями. Найбільш ефективні комбінації швидкості частки та температурного режиму для частки та підкладки наведено у таблицях 5.1-5.4.

Таблиця 5.1 – Комбінації швидкості частки та температурного режиму для частки для досягнення найбільшого проникнення частки (для параметрів ДК – М1).

Швидкість частки, <i>м/с</i>	Температура частки, <i>K</i>							
	н/з*	25	100	200	300	400	500	600
700								•
800						•	•	•
900	•	•	•	•	•	•	•	•
1000	•	•	•	•	•	•	•	•

* – значення не задано.

Таблиця 5.2 – Комбінації швидкості частки та температурного режиму для частки для досягнення найбільшого проникнення частки (для параметрів ДК – М5).

Швидкість частки, <i>м/с</i>	Температура частки, <i>K</i>							
	н/з*	25	100	200	300	400	500	600
900						•	•	•
1000	•	•	•	•	•	•	•	•
1200	•							

* – значення не задано.

Таблиця 5.3 – Комбінації температурних режимів для частки та підкладки для досягнення найбільшого проникнення частки (для параметрів ДК – М1 та швидкості частки – 700 м/с)

	Температура частки, °C						
Температура підкладки, °C	25	100	200	300	400	500	600
25			•	•	•	•	
100			•	•	•	•	•
200			•	•	•	•	•
300		•	•	•	•	•	•
400			•	•	•	•	•
500				•	•	•	•
600				•	•	•	•

Таблиця 5.4 – Комбінації температурних режимів для частки та підкладки для досягнення найбільшого проникнення частки (для параметрів ДК – М5 та швидкості частки – 700 м/с)

	Температура частки, °C						
Температура підкладки, °C	25	100	200	300	400	500	600
25							
100							
200							
300							
400						•	•
500					•	•	•
600					•	•	•

Комбінації параметрів, які надано вище рекомендовано використовувати для створення захисного покриття, але з умовою того, що матеріал та модель його пошкодження частки та підкладки повинні бути однаковими.

5.3 Створення бази даних установки для холодного газотермічного напилення

Для того щоб створити покриття, яке буде відповідати вимогам якості, потрібно проводити безліч експериментів з варіюванням вхідних параметрів. Для систематизації результатів таких досліджень запропоновано використання бази даних, створення якої описано нижче. У таку базу даних можна занести та систематизувати усі проведені раніше дослідження у різних варіаціях, наприклад, на основі існуючої параметризації для сопла Лавалю можна спроектувати декілька сопел, які будуть складовою частиною декількох установок, які в свою чергу будуть мати різні нагрівачі газу (з різною кількістю нагрівальних елементів), різні дозатори часток тощо. Так само можна прив'язувати матеріали часток, параметри отриманого покриття, вихідні параметри підкладки тощо.

Інформаційне наповнення бази даних частково відповідає дійсності та базується на проведених раніше дослідженнях. Деякі дані наведено для прикладу.

Спочатку необхідно розробити інфологічну та даталогічну схеми установки. Після чого створити базу даних, в яку потрібно занести початкові дані.

База даних повинна:

1. Задовольняти актуальним інформаційним потребам користувачів, забезпечувати можливість зберігання та модифікації великих обсягів багатоаспектної інформації;
2. Забезпечувати заданий рівень достовірності збереженої інформації та її несуперечливість;
3. Забезпечувати доступ до даних тільки користувачів з відповідними повноваженнями;
4. Забезпечити можливість пошуку інформації за довільною групою ознак;
5. Задовольняти заданим вимогам продуктивності при обробці запитів;

6. Мати можливість реорганізації та розширення при зміні меж предметної області;

7. Забезпечувати видачу інформації користувачам в різній формі;

8. Забезпечувати простоту і зручність звернення зовнішніх користувачів за інформацією.

Ефективність роботи характеризується точністю розрахунків і автоматичним формуванням списку.

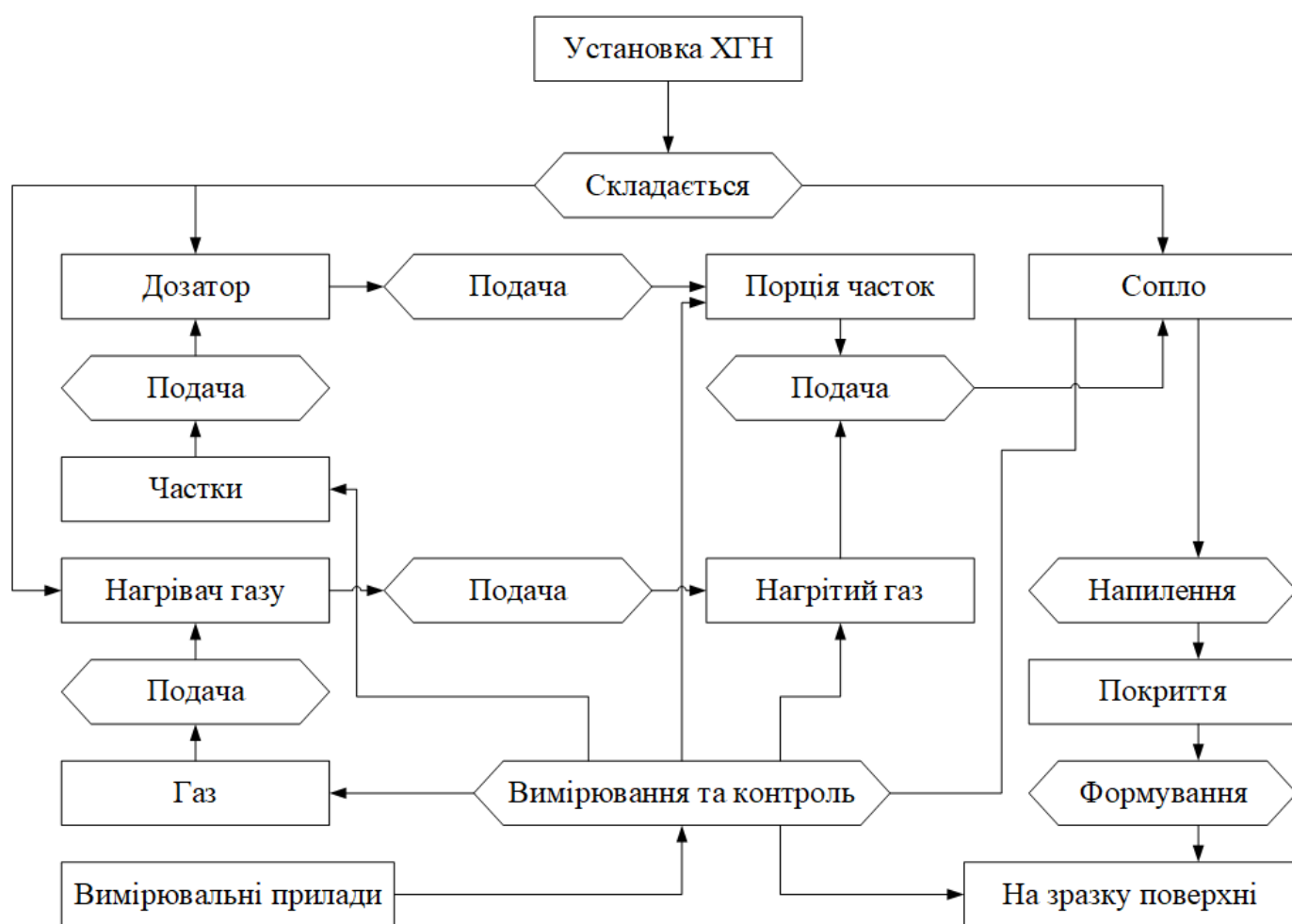


Рисунок 5.1 – Інфологічна схема установки ХГН

Інфологічне моделювання виконується з метою забезпечення найприродніших для людини способів подання та збору інформації, яка буде зберігатися в створюваній

базі даних (далі – БД). Тому інфологічна модель даних будується відповідно до природної мови, яку неможливо використовувати в чистому вигляді з причини складності обробки текстів за допомогою комп'ютера і неоднозначності природної мови.

На рисунку 5.1 зображено інфологічну схему установки ХГН.

Основні конструктивні елементи інфологічної моделі – це сутності, зв'язки між сутностями та їх атрибути (властивості).

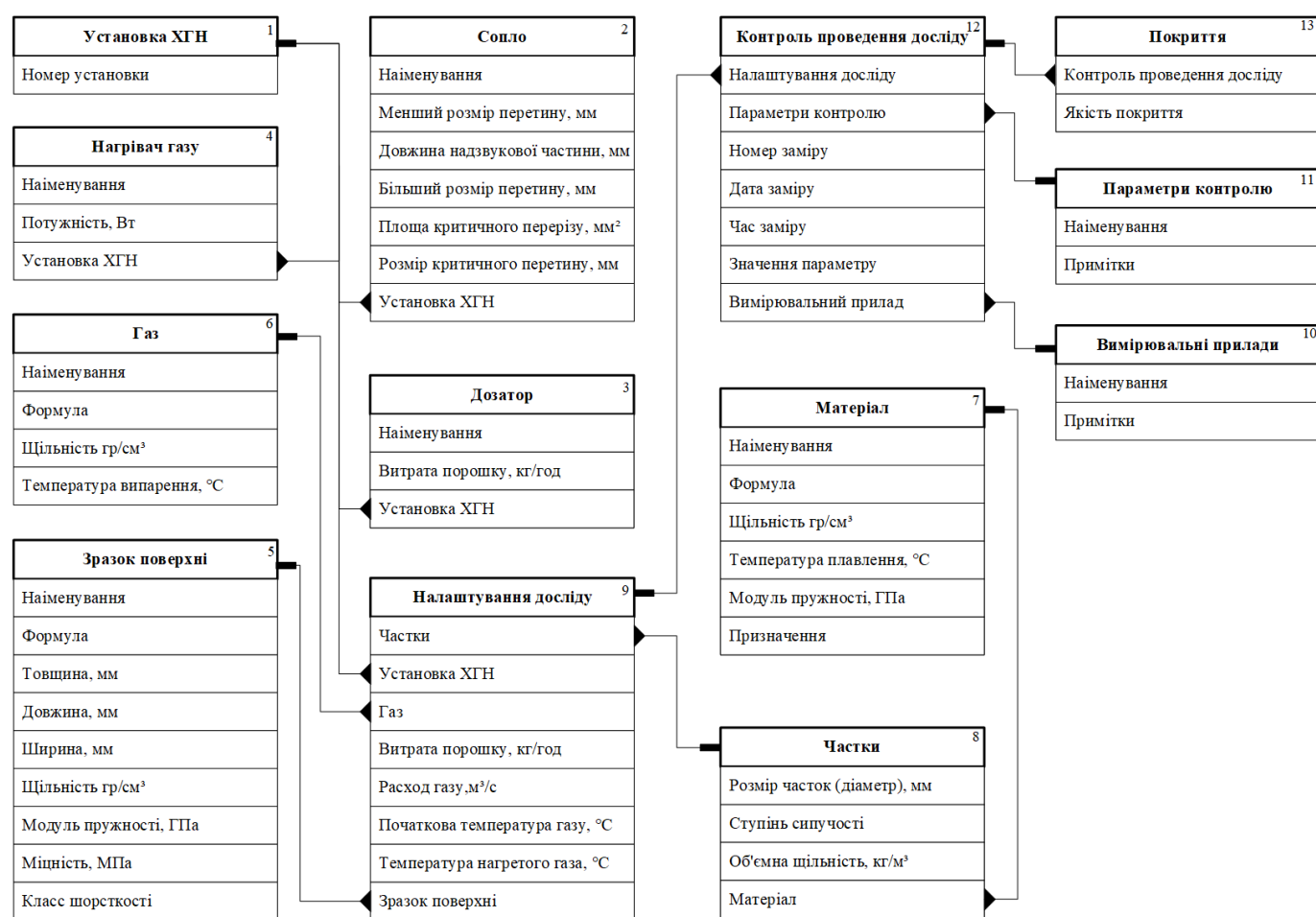


Рисунок 5.2 – Даталогічна схема установки ХГН

Під даталогічною розуміється модель, що відображає логічні взаємозв'язки між елементами даних безвідносно їх змісту і фізичної організації. При цьому даталогічна

модель розробляється з урахуванням конкретної реалізації СУБД, також з урахуванням специфіки конкретної предметної області на основі її інфологічної моделі.

На рисунку 5.2 зображено даталогічну модель установки ХГН.

Модель даних – фіксована система понять і правил для представлення структури даних, стану і динаміки проблемної області в базах даних. Як правило, задається мовою визначення даних і мовою маніпулювання даними.

Модель даних складається з трьох компонент:

1. Структура даних для представлення точки зору користувача на базу даних.
2. Допустимі операції, що виконуються на структурі даних. Вони складають основу мови даних розглянутої моделі даних. Однією хорошої структури даних недостатньо. Необхідно мати можливість працювати з цією структурою за допомогою різних операцій мови визначення даних і мови маніпулювання даними. Багата структура даних нічого не варта, якщо немає можливості оперувати її вмістом.
3. Обмеження для контролю цілісності. Модель даних повинна бути забезпечена засобами, що дозволяють зберігати її цілісність і захищати її.

Схема – це засіб, за допомогою якого визначається модель даних програми. Насправді схема містить не тільки модель даних: в ній присутня також деяка семантична інформація, що відноситься до конкретного додатка. У моделі даних можна визначити, наприклад, що база даних буде зберігати інформацію про організації і службовців. Однак, той факт, що даний службовець не може працювати більш ніж в одній організації, відображає семантику додатка. Це семантичне обмеження повинно виконуватися для кожного окремого примірника запису бази даних про цього службовця. Підтримка обмежень заданої моделі даних в базі даних також є частиною функцій СУБД щодо забезпечення захисту і цілісності.

На сьогоднішній день відомо більше двох десятків форматів даних настільних СУБД, найбільш популярними слід визнати dBase, Paradox, FoxPro і Access. В даній роботі для створення бази даних був використаний Microsoft Access.

База даних (БД) – іменована сукупність даних, що відображають стан об'єктів і їх відносин в розглянутій предметній області. Організовується так, що дані збираються один раз і централізовано зберігаються (і модифікуються) у вигляді, доступному всім фахівцям або системам програмування, які можуть їх використовувати.

Створену базу даних зображено на рисунку 5.3.

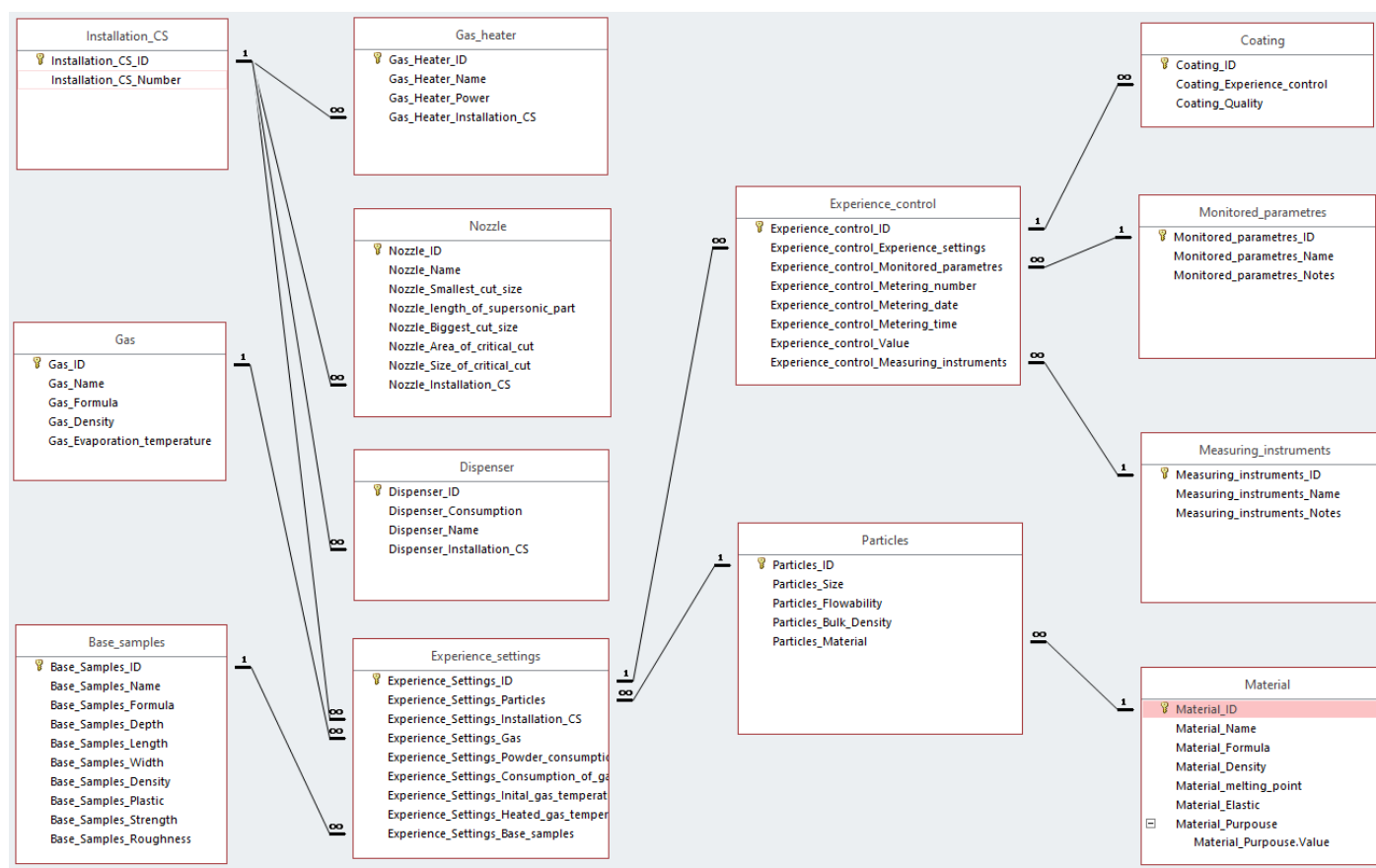


Рисунок 5.3 – База даних, створена у СУБД Access

Створення цієї бази даних починається з таблиці «Установка ХГН» (рис. 5.4).

ID Установк	Номер установки ХГН
1	1
2	2
3	3
4	4
5	5
6	6
7	7
8	8
9	9
10	10
11	11
12	12
13	13
14	14
15	15
16	16
17	17
18	18
19	19
20	20

Рисунок 5.4 – Скріншот таблиці «Установка ХГН»

Установка включає в себе сопло (рис 5.5, 5.6), дозатор (рис. 5.7) та нагрівач газу (рис. 5.8), тому наступним кроком – є створення таблиць для цих частин.

ID Сопла	Наіменування	Менший розмір перетину, мм	Довжина надзвукової частини, мм
1	C-1	1	50
2	C-2	2,9	75
3	C-3	2,4	100
4	C-4	3	110
5	C-5	3	110
6	C-6	2,9	120
7	C-7	3	130
8	C-8	4,5	150
9	C-9	5	200
10	C-10	1	50
11	C-11	2,9	75
12	C-12	2,4	100
13	C-13	3	110
14	C-14	3	110
15	C-15	2,9	120
16	C-16	3	130
17	C-17	4,5	150
18	C-18	5	200
19	C-19	1	50
20	C-20	2,9	75

Рисунок 5.5 – Скріншот таблиці «Сопло» (1 частина)

Більший розмір перетину, мм ▾	Площа критичного перерізу, мм ² ▾	Розмір критичного перетину, мм ▾	ID Установки ХГН ▾
8	4	4	1
9,4	8,7	3	2
30	18	7,5	3
10	16,8	5,6	4
9,5	9,6	3,2	5
10	8,7	3	6
8	9	3	7
12	11,25	2,5	8
8,4	10	2	9
8	4	4	10
9,4	8,7	3	11
30	18	7,5	12
10	16,8	5,6	13
9,5	9,6	3,2	14
10	8,7	3	15
8	9	3	16
12	11,25	2,5	17
8,4	10	2	18
8	4	4	19
9,4	8,7	3	20

Рисунок 5.6 – Скріншот таблиці «Сопло» (2 частина)

ID Дозатору ▾	Витрата порошку, кг/год ▾	Найменування ▾	ID Установки ХГН ▾
1	2	Д-1	1
3	5,5	Д-2	2
4	4,5	Д-3	3
5	3,2	Д-4	4
6	3	Д-5	5
7	3,1	Д-6	6
8	4,5	Д-7	7
9	5,4	Д-8	8
10	2,3	Д-9	9
11	2	Д-10	10
12	2	Д-11	11
13	2,1	Д-12	12
14	5,1	Д-13	13
15	5,1	Д-14	14
16	5,5	Д-15	15
17	4,8	Д-16	16
18	4,9	Д-17	17
19	4,7	Д-18	18
20	3	Д-19	19

Рисунок 5.7 – Скріншот таблиці «Дозатор»

ID нагрівача газу ▾	Наіменування ▾	Потужність, Вт ▾	ID Установки ХГН ▾
1	Н-1	150	1
2	Н-2	160	2
3	Н-3	170	3
11	Н-1	150	4
12	Н-2	160	5
13	Н-3	170	6
14	Н-1	150	7
15	Н-2	160	8
16	Н-3	170	9
17	Н-1	150	10
18	Н-2	160	11
19	Н-3	170	12
20	Н-1	150	13
21	Н-2	160	14
22	Н-3	170	15
23	Н-1	150	16
24	Н-2	160	17
25	Н-3	170	18
26	Н-1	150	19

Рисунок 5.8 – Скріншот таблиці «Нагрівач газу»

Далі потрібно створити всі таблиці, які необхідні для створення таблиці «Налаштування дослідів». Тому наступними створюються таблиці «Зразок поверхні» (рис. 5.9, 5.10), «Газ» (рис. 5.11), «Матеріал» (рис. 5.12), «Частки» (рис. 5.13).

	ID зразків підкладки	Довжина, мм	Найменування	Формула	Товщина, мм
+	1	100	Алюміній	Al	20
+	2	100	Вольфрам	W	20
+	3	100	Кобальт	Co	20
+	4	100	Мідь	Cu	20
+	5	100	Молибден	Mo	20
+	6	100	Нікель	Ni	20
+	7	100	Титан	Ti	20
+	8	100	Хром	Cr	20
+	9	100	Алюмінієва бронза	CuAl5	20
+	10	100	Залізо	Fe	20
+	11	100	Ірідій	Ir	20
+	12	100	Кадмій	Cd	20
+	13	100	Кремній	Si	20
+	14	100	Магній	Mg	20
+	15	100	Ніобій	Nb	20
+	16	100	Олово	Sn	20
+	17	100	Свинець	Pb	20
+	18	100	Срібло	Ag	20
+	19	100	Цинк	Zn	20

Рисунок 5.9 – Скріншот таблиці «Зразок поверхні» (1 частина)

Ширина, мм	Щільність, гр/см ³	Модуль пружності	Міцність, МПа	Клас шорсткості
100	2,7	70	300	4
100	19,25	350	1078	5
100	8,9	210	250	6
100	8,92	110	284	1
100	10,22	300	915	11
100	8,902	210	7500	7
100	4,54	112	240	14
100	7,19	300	1400	7
100	7,5	115	1300	9
100	7,8714	180	56000	13
100	22,65	520	1800	7
100	8,65	50	700	7
100	2,33	109	360	4
100	1,738	45	180	1
100	8,57	155	1256	2
100	7,31	35	456	1
100	11,3415	18	15	12
100	10,5	80	1150	11
100	7,133	120	450	6

Рисунок 5.10 – Скріншот таблиці «Зразок поверхні» (2 частина)

ID газу	Найменування	Формула	Щільність, г/см ³	Температура випарення, °C
1	Аргон	Ar	0,001784	-185,8
2	Гелій	He	0,001784	-268,94
3	Азот	N	0,001251	-195,75
4	Водород	H	0,000089	-252,87
5	Повітря	-	1,2041	-182,96

Рисунок 5.11 – Скріншот таблиці «Газ»

ID Матеріал	Найменування	Формула	Щільність, гр/см ³	Температура плавлення, °C	Модуль пружності, ГПа	Призначення матеріала
1	Алюміній	Al	2,7	660	70	(2)Захист від коррозії; (5)Відновлення
2	Вольфрам	W	19,25	3422	350	(3)Жаростійкість; (6)Додатковий шар
3	Кобальт	Co	8,9	1495	210	(5)Відновлення
4	Мідь	Cu	8,92	1083	110	(6)Додатковий шар; (7)Спеціальні властивості
5	Молібден	Mo	10,22	2623	300	(1)Захист від зносу; (3)Жаростійкість; (6)Додатковий шар
6	Нікель	Ni	8,902	1453	210	(2)Захист від коррозії; (5)Відновлення; (6)Додатковий шар
7	Титан	Ti	4,54	1670	112	(5)Відновлення
8	Хром	Cr	7,19	1857	300	(1)Захист від зносу; (2)Захист від коррозії
9	Алюмінієва бронза	CuAl5	7,5	1040	115	(1)Захист від зносу; (5)Відновлення
11	Залізо	Fe	7,8714	1539	180	(1)Захист від зносу
12	Ірідій	Ir	22,65	2466	520	(1)Захист від зносу
13	Кадмій	Cd	8,65	321	50	(2)Захист від коррозії
14	Кремній	Si	2,33	1415	109	(6)Додатковий шар; (7)Спеціальні властивості
15	Магній	Mg	1,738	650	45	(3)Жаростійкість
16	Ніобій	Nb	8,57	2468	155	(3)Жаростійкість
17	Олово	Sn	7,31	232	35	(2)Захист від коррозії
18	Свинець	Pb	11,3415	327	18	(1)Захист від зносу; (2)Захист від коррозії
19	Срібло	Ag	10,5	962	80	(2)Захист від коррозії
20	Цинк	Zn	7,133	420	120	(2)Захист від коррозії

Рисунок 5.12 – Скріншот таблиці «Матеріал»

ID часток	Розмір часток (діаметр), мм	Ступінь сипучості	Об'ємна щільність, кг/м ³	ID матеріалу
1	1	Дуже висока - 23-30	2,1	Алюміній
2	1	Задовільна - 36-45	1,78	Вольфрам
3	0,001	Висока - 31-35	2,3	Кобальт
4	0,05	Погана - 56-65	1,45	Мідь
5	0,02	Висока - 31-35	1,3	Молібден
6	1	Незадовільна - 46-55	1,92	Нікель
7	2	Незадовільна - 46-55	1,4	Титан
8	0,03	Дуже висока - 23-30	1,2	Хром
9	0,003	Дуже висока - 23-30	2,77	Алюмінієва бронза
10	0,002	Задовільна - 36-45	2,4	Залізо
11	0,9	Погана - 56-65	2,6	Ірідій
12	1	Дуже висока - 23-30	2,72	Кадмій
13	0,02	Дуже висока - 23-30	2	Кремній
14	0,001	Висока - 31-35	1,6	Магній
15	0,9	Дуже висока - 23-30	1,64	Ніобій
16	0,001	Задовільна - 36-45	1,54	Олово
17	1	Незадовільна - 46-55	1,7	Свинець
18	1	Задовільна - 36-45	1,56	Срібло
19	0,02	Висока - 31-35	1,47	Цинк

Рисунок 5.13 – Скріншот таблиці «Частки»

Далі будується таблиця «Налаштування дослідів» (рис. 5.13, 5.14)

ID налаштувань дос	ID часток	ID Установки ХГН	ID газу	Витрата порошку, кг/год	Расход газу, м³/с
1	1	1	Азот	2	0,0005
2	1	2	Аргон	5,5	0,0004
3	0,001	3	Водород	4,5	0,0003
4	0,05	4	Гелій	3,2	0,0005
5	0,02	5	Повітря	3	0,0005
6	1	6	Аргон	3,1	0,0003
7	2	7	Гелій	4,5	0,0004
8	0,03	8	Повітря	5,4	0,0003
9	0,003	9	Повітря	2,3	0,0005
10	0,002	10	Повітря	2	0,0003
11	0,9	11	Водород	2	0,0003
12	1	12	Водород	2,1	0,0005
13	0,02	13	Гелій	5,1	0,0004
14	0,001	14	Аргон	5,1	0,0004
15	0,9	15	Азот	5,5	0,0003
16	0,001	16	Азот	4,8	0,0005
17	1	17	Водород	4,9	0,0003
18	1	18	Водород	4,7	0,0004
19	0,001	19	Гелій	3	0,0005

Рисунок 5.13 – Скріншот таблиці «Налаштування дослідів» (1 частина)

Початкова температура газу, °C	Температура нагрітого газу, °C	ID образца основания
20	123	Алюмінієва бронза
20	215	Алюміній
20	197	Вольфрам
20	132	Залізо
20	115	Ірідій
20	157	Кадмій
20	150	Кобальт
20	201	Кремній
20	200	Магній
20	146	Мідь
20	112	Молібден
20	159	Нікель
20	126	Ніобій
20	189	Олово
20	114	Свинець
20	102	Срібло
20	200	Титан
20	198	Хром
20	192	Цинк

Рисунок 5.14 – Скріншот таблиці «Налаштування дослідів» (2 частина)

Наступними є таблиці, які потрібні для творення таблиці «Контроль проведення досліджу», а саме «Параметри контролю» (рис. 5.15) та «Вимірювальні прилади» (рис. 5.16).

	ID параметр	Найменування	Примітки
+	1	Товщина	6-30 мкм
+	2	Твердість	6000-10000 Мпа
+	3	Адгезія	15-40 Мпа
+	4	Шорсткість	2-15 %
+	5	Міцність	10-50 Мпа
+	6	Блиск	50,7 - 101,7

Рисунок 5.15 – Скріншот таблиці «Параметри контролю»

	ID Вимірювального приладу	Найменування	Примітки
+	1	Товщиномір	Вимірювання товщини покриття
+	3	Твердомір	Вимірювання твердості покриття
+	4	Адгезіметр	Вимірювання адгезії покриття
+	5	Вимірювач шорсткості	Вимірювання шорсткості покриття
+	6	Вимірювач міцності	Вимірювання міцності покриття
+	7	Вимірювач блиску	Вимірювання блиску покриття

Рисунок 5.16 – Скріншот таблиці «Вимірювальні прилади»

Останнім кроком створюється таблиця «Покриття» (рис. 5.17) – кінцева таблиця, в якій оцінюється якість отриманого покриття.

ID покриття ▾	ID Контроля проведення дослідю ▾	Якість покриття ▾
1	1	Дуже висока
2	2	Дуже висока
3	3	Висока
4	4	Задовільна
5	5	Дуже погана
6	6	Висока
7	7	Висока
8	8	Погана
9	9	Висока
10	10	Дуже висока
11	11	Дуже погана
12	12	Висока
13	13	Дуже висока
14	14	Задовільна
15	15	Задовільна
16	16	Задовільна
17	17	Висока
18	18	Дуже висока
19	19	Погана

Рисунок 5.17 – Скріншот таблиці «Покриття»

На цьому етапі створення структури бази даних завершується. Наступним кроком потрібно створити декілька типів запитів. Дані, що було застосовано для заповнення таблиць обрано для прикладу та вони не відповідають дійсності.

5.4 Створення запитів для бази даних

Основним видом запиту є запит на вибірку. Результатом виконання цього запиту є нова таблиця, яка існує до закриття запиту. Записи формуються шляхом об'єднання записів таблиць, на яких побудований запит. Спосіб об'єднання записів таблиць вказується при визначенні їх зв'язку в схемі даних або при створенні запиту. Умови відбору, сформульовані в запиті, дозволяють фільтрувати записи, що становлять результат об'єднання таблиць.

В Access може бути створено кілька видів запиту:

– запит на вибірку – вибирає дані з однієї таблиці або запиту або декількох взаємопов'язаних таблиць та інших запитів. Результатом є таблиця, яка існує до

закриття запиту. Формування записів таблиці результату проводиться відповідно до заданих умов відбору і при використанні декількох таблиць шляхом об'єднання їх записів;

– запит на створення таблиці – вибирає дані з взаємопов'язаних таблиць та інших запитів, але, на відміну від запиту на вибірку, результат зберігає в новій постійній таблиці;

– запити на оновлення, додавання, видалення – є запитами дії, в результаті виконання яких змінюються дані в таблицях.

Для даної роботи створено два виду запитів.

Перший запит – це вибірка. Вона створена на основі даних таблиць «Покриття», «Контроль проведення дослідів», «Налаштування дослідів», «Частки» (рис. 5.18).

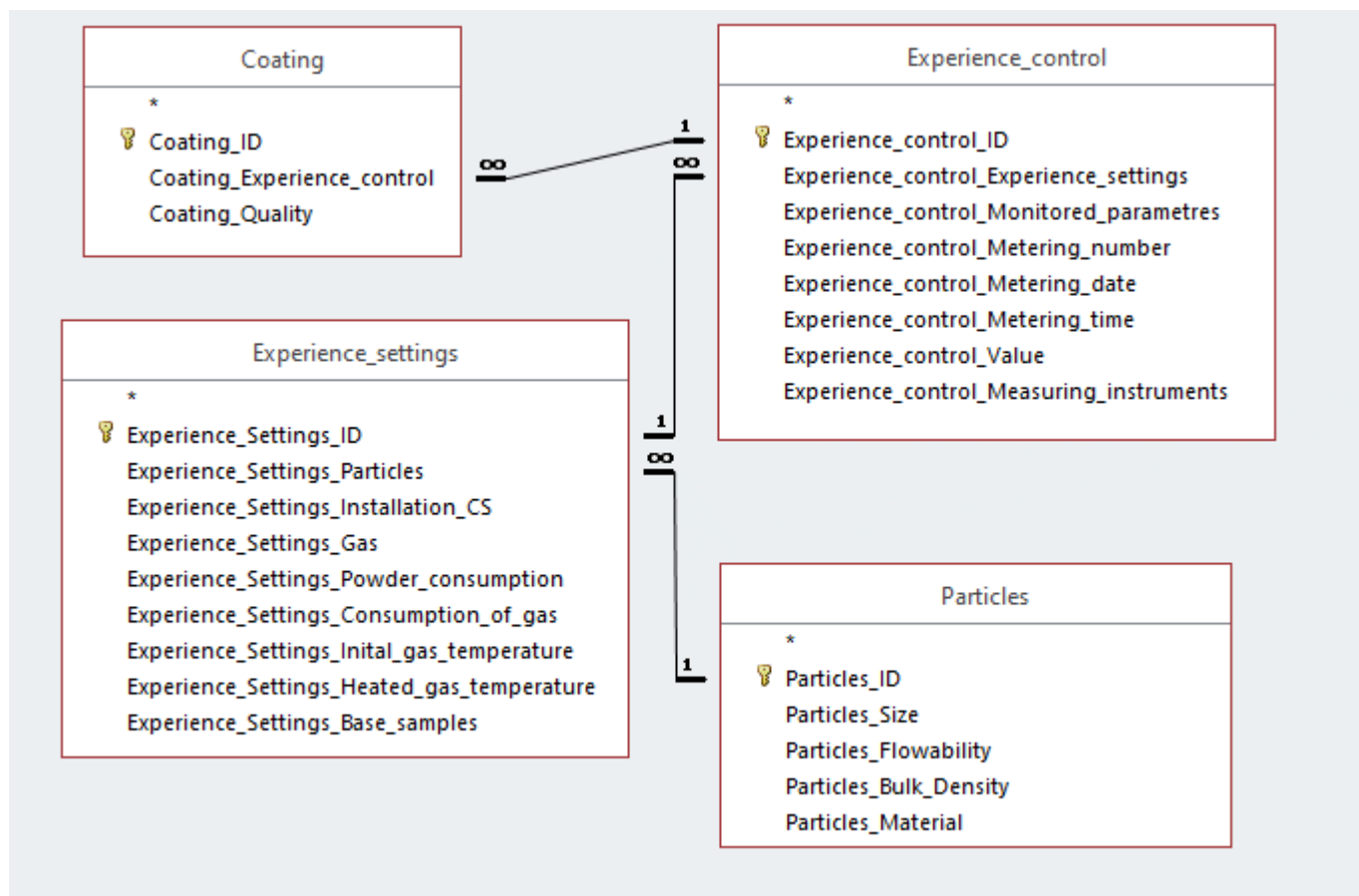


Рисунок 5.18 – Схема БД для запиту-вибірки

Завдяки цьому запиту можна отримати сукупність параметрів, за умов яких було отримано якісне покриття. У якості потрібних параметрів було обрано: матеріал часток; параметри, що контролювалися; значення контрольованих параметрів; газ, обраний для прискорення часток у соплі; поверхня-зразок, на яку наносилося покриття (рис 5.19). У якості параметра-умови була обрано відповідно якість покриття, умова – «Дуже висока» або «Висока».

Поле:	Coating_Quality	Particles_Material	Experience_control_Monitored_parametres	Experience_control_Value	Experience_Settings_Gas	Experience_Settings_Base_samples
Имя таблицы:	Coating	Particles	Experience_control	Experience_control	Experience_settings	Experience_settings
Сортировка:						
Вывод на экран:	☒	☒	☒	☒	☒	☒
Условие отбора: или:	"Висока" Or "Дуже висока"					

Рисунок 5.19 – Структура запиту-вибірки

На рисунку 5.21 зображено результат, який був отриманий за результатом вибірки.

Змінюючи параметри в розділі «Условие отбора» можна регулювати показ необхідних значень.

Якість покриття	ID матеріалу	ID параметрів контролю	Значення параметру	ID газу	ID образца основания
Дуже висока	Алюміній	Товщина	10 мкм	Азот	Алюмінієва бронза
Дуже висока	Вольфрам	Товщина	11,7 мкм	Аргон	Алюміній
Висока	Кобальт	Товщина	9,6 мкм	Водород	Вольфрам
Висока	Нікель	Твердість	7500 МПа	Аргон	Кадмій
Висока	Титан	Твердість	8500 МПа	Гелій	Кобальт
Висока	Алюмінієва бронза	Твердість	6800 МПа	Повітря	Магній
Дуже висока	Ірідій	Твердість	9400 МПа	Повітря	Мідь
Висока	Кремній	Адгезія	39 МПа	Водород	Нікель
Дуже висока	Магній	Адгезія	21 МПа	Гелій	Ніобій
Висока	Срібло	Міцність	20 МПа	Водород	Титан
Дуже висока	Цинк	Міцність	32 МПа	Водород	Хром

Рисунок 5.21 – Отримані дані за результатом вибірки

Другий запит (рис 5.20) – статистична обробка параметрів контролю. Для прикладу було обрано відображення мінімального або максимального значення кожного з вимірюваних параметрів (товщина, твердість, адгезія, шорсткість,

міцність). Для створення цього запиту знадобились таблиці «Параметри контролю» та «Контроль проведення дослідів».

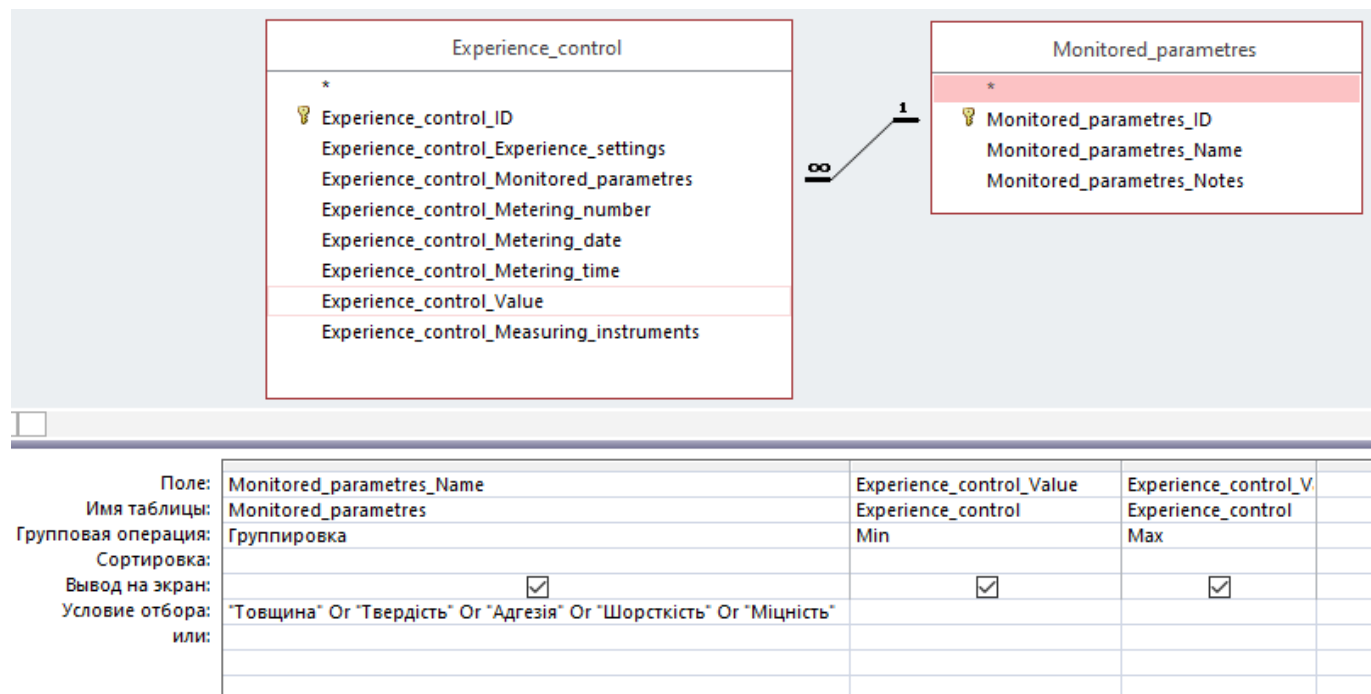


Рисунок 5.20 – Структура статистичного запиту БД

Результаты статистической обработки отображено на рисунку 0.0.

Наіменування	Min-Experience_control_Value	Max-Experience_control_Value
Адгезія	21 МПа	39 МПа
Міцність	20 МПа	32 МПа
Твердість	6600 МПа	9400 МПа
Товщина	10 мкм	9,6 мкм
Шорсткість	10 %	7 %

Рисунок 5.22– Результат статистичної обробки

Таким чином у п'ятому розділі розроблено заходи з підвищення ефективності установки для холодного газодинамічного наплення, ефект від використання яких також описано у розділі.

На основі проведених досліджень, які складались з чисельних моделювань, проведень симуляцій, порівняльних аналізів тощо створено базу даних для установки для створення захисного покриття методом холодного газодинамічного напилення. Така база даних дозволяє отримати систематизовану інформацію щодо корисного використання певних конструктивних та технологічних параметрів обладнання установки у комбінації з різними характеристиками часток покриття, підкладки, газу тощо. За допомогою запитів до такої бази даних можна проводити також статистичну обробку даних, які містяться у базі.

ВИСНОВКИ

Під час виконання роботи було наведено основні положення щодо методу холодного газодинамічного напилення, різновидів супутніх установок та їх складових частин, місця ХГН серед інших видів створення захисного покриття.

Також було створено чисельну модель для розрахунку продуктивності сопла по масі для оцінки шляхів підвищення продуктивності. Ця модель враховувала не тільки параметри сопла, а також дозатора часток та нагрівача газу. За результатами аналізу отриманої формули для розрахунку продуктивності було зроблено певне припущення про те, що продуктивність сопла по масі можна підвищувати лише за рахунок збільшення площі критичного перерізу сопла S_{cr} . У третьому розділі було перевірено такий висновок і визначено, що площину критичного перерізу обмежено, а отже і обмежено продуктивність сопла, для якого було створено чисельне моделювання. Максимальна продуктивність сопла по масі, яку було отримано – $250 \text{ м}^2/\text{год}$. Для подальшого збільшення продуктивності запропоновано:

1. Використання багатосоплових блоків з можливістю установки сопел там, де необхідно наносити покриття.
2. Використання сопел у вигляді декількох пневмоканалів з індивідуальними підводами газопорошкової суміші і загальною форкамерою.

Було проведено створення чисельної моделі багатоканального нагрівача газу для розрахунку параметрів нагрівача з попередньо заданими припущеннями. За результатами створення моделі отримано чотири критерії, які відповідають певним припущенням. Також було проаналізовано сумісність цих критеріїв. За допомогою побудови графіків залежності кількості нагрівальних елементів від їх внутрішнього діаметру було отримано область допустимих значень, при яких проєктований нагрівач одночасно задовольняє усім критеріям. Один з критеріїв не мав істотного впливу на область значень, яка задовольняє всім критеріям, тому було вирішено у подальшому

його не враховувати. Також було отримано ще один критерій, формула якого враховує потужність, та зіставлено його з попередніми критеріями. Для нагрівача з одним нагрівальним елементом було побудовано графік області припустимих значень довжини та внутрішнього діаметру нагрівального елементу. Використовуючи створену чисельну модель нагрівача газу, можна спроектувати та побудувати різноманітні трубчасті нагрівачі. Важливою особливістю використання таких нагрівачів є отримання хімічно чистих покриттів, тому що омичний нагрів не вносить домішок у робочий газ та, відповідно, у покриття.

Було проведено створення чисельної моделі ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів з використанням ABAQUS. Створення чисельної моделі проходило у два етапи:

1. Розробка методології, на якій у подальшому буде базуватися модель та яка описує параметри для проведення симуляцій взаємодії частки та підкладки.
2. Створення базової моделі з використанням ABAQUS.

У третьому розділі проведено аналіз результатів моделювання ударної поведінки частки при взаємодії з підкладкою методом кінцевих елементів. Для проведення симуляцій було використано певні комбінації параметрів для частки та підкладки (параметри Джонсона Кука для матеріалу, швидкість частки, температура частки та підкладки). У якості результатів отримано певні блоки інформації, які дозволили провести порівняльний аналіз результатів дослідження та зробити висновки, які описано далі по тексту.

Різниця поведінки частки при використанні певних параметрів Джонсона Кука більш за все простежується дивлячись на максимальне значення напруження за Мізесом – найбільше значення в основному спостерігається для JC-M3, найменше для JC-M2. Дивлячись на це можна зробити висновок про те, що матеріал з параметрами JC-M2 є найбільш пластичним, завдяки чому частка більше проникає у підкладку.

У залежності від швидкості частки час максимального проникнення змінюється наступним чином – чим більша швидкість частки тим раніше вона максимально проникає у підкладку. Але слід також зауважити, що велика швидкість може призводити до деформації підкладки, саме тому для методу ХГН не використовуються швидкості часток більше ніж 1200 м/с. Для моментів симуляцій з максимальним значенням стресу не вдалося виявити ніякої залежності, момент з максимальним напруженням може бути як на початку так і наприкінці часу симуляції.

Майже у всіх випадках максимальне значення стресу не співпадає з максимальним проникненням. У більшості випадків момент симуляції у якому простежується найбільше значення стресу настає раніше ніж момент максимального проникнення частки у підкладку.

Чим більша температура частки та підкладки, – тим більше частка проникає у підкладку, зі збільшенням швидкості цей ефект тільки збільшується. Чим більша температура матеріалу – тим він більш пластичний та більше піддається деформації.

Найбільше значення стресу спостерігається у симуляціях з використанням невисоких температур для частки та підкладки, тому що у цих випадках матеріал менш пластичний та менше піддається деформації – тому значення стресу більше.

Велика кількість проведених симуляцій, нажаль, не дала змоги отримати бажаний результат у вигляді «склеювання» частки у підкладку. Це обумовлено програмним забезпеченням, яке не передбачає зв'язування об'єктів, що досліджуються. У діапазоні швидкостей частки від 100 до 1000 м/с частка наприкінці часу проведення симуляції (3,5 нс) просто відштовхувалася від поверхні, чого за умов проведення реального експерименту скоріш за все відбулося б. Але це не заважає використовувати базову модель для моделювання, яку запропоновано у роботі, для комбінації різних параметрів для частки та підкладки та спостерігання змін у взаємодії.

На основі проведених досліджень ударної поведінки запропоновано певні рекомендації для вибору параметрів для частки та підкладки. З п'яти випробуваних моделей пошкодження матеріалу Джонсона Кука найкраще себе поводити модель M1 та M5 (таблиця 0.0). Використання цих моделей дало змогу отримати найбільше проникнення частки до підкладки у порівнянні з іншими моделями. Найбільш ефективні комбінації швидкості частки та температурного режиму для частки та підкладки наведено у таблицях 0.0-0.0.

Для сопла Лавалю було створено параметричну 3D-модель та креслення. Проведену параметризацію запропоновано як захід для вдосконалення обладнання установки для холодного газодинамічного напилення, яке полягає у прискоренні процесу створення 3D-моделей та креслень конструкції сопла з різними розмірами та параметрами (продуктивність, швидкість часток на виході тощо) за допомогою запропонованого параметричного креслення.

На основі проведених досліджень створено базу даних для установки для створення захисного покриття методом холодного газодинамічного напилення. Така база даних дозволить отримувати систематизовану інформацію щодо корисного використання певних конструктивних та технологічних параметрів обладнання установки у комбінації з різними характеристиками часток покриття, підкладки, газу тощо.

Були використані наступні методи дослідження: робота у програмах MS Excel, Mathcad, КОМПАС 3D, ABAQUS, Access, опрацьовування нормативної документації, літературних джерел у процесі написання кваліфікаційної роботи, пошук необхідної інформації та її систематизація.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Митин Б. С. Порошковая металлургия и напыленные покрытия/ Б.С. Митин. – М.: Металлургия, 1987. – 791 с
2. Борисов Ю.С. Современные достижения в области нанесения защитных и упрочняющих покрытий/ Ю. С. Борисов. – К.: Институт проблем материаловедения, 1993. – 105 с.
3. Защитные покрытия. Общие сведения о защитных покрытиях [Электронный ресурс]. URL: <https://extxe.com/14890/zashhitnye-pokrytija-2/> (дата звернення 08.04.2019)
4. Земсков В.Г. Многокомпонентное диффузионное насыщение металлов и сплавов/ В.Г. Земсков, Л.Р. Коган. – М.: Металлургия, 1978. – 208 с.
5. Герасименко А.А. Защитные твердые и износоустойчивые электрохимические покрытия/ А.А. Герасименко. – М: ГОСИНТИ, 1980. – 35 с.
6. Ильичев Л.Л. Повышение работоспособности осевого режущего инструмента за счет комплексного ЭИЛ+ФПУ метода нанесения покрытий/ Л.Л. Ильичев. – СПб: Изд-во Политехн. Ун-та, 2011. –150 с.
7. Линник В.А. Современная техника газопламенного нанесения покрытий/ В.А. Линник, П.Ю. Пекшев. – М.: Машиностроение, 1985. – 125 с.
8. Бартенев С.С., Детонационные покрытия в машиностроении/ С.С. Бартенев С.С., Ю.П. Федько, А.И. Григоров Л.: Машиностроение, 1982. – 216 с.
9. Ильющенко А.Ф. Процессы формирования газотермических покрытий и их моделирование/ А.Ф. Ильющенко, А.И. Швецов, В.А. Оковитый. – Минск: Беларуская навука, 2011. – 357 с.
10. Фомин В.М. Холодное газодинамическое напыление. Теория и практика/ А. П. Алхимов, С. В. Клинков, В. Ф. Косарев, В. М. Фомин. – М.: Физико-математическая литература, 2010. — 536 с.

11. Дружинина Л. К. Получение покрытий высокотемпературным распылением/ Л. К. Дружинина, В. В. Кудинов. – М.: Атомиздат, 1987. – 312 с.
12. Кудинов В. В. Нанесение покрытий распылением. Плазменные процессы в металлургии и технологии неорганических материалов/ В. В. Кудинов – М.: Наука, 1973. – 158 с.
13. Полежаев Ю. В. Процесс установления эрозионного разрушения материала преграды при многократном соударении с частицами/ Ю. В. Полежаев. – М.: ИФХС, 1979. – 395 с.
14. Алхимов А. П. Метод «холодного» газодинамического напыления/ А. П. Алхимов, В. Ф. Косарев, А. Н. Папырин. – М.: ДАН, 1990. – 1065 с.
15. Kempton K. Where Thermal Spray Coatings Are Most Effective/ K. Kempton. – London: Welding Journal, 1991. – 50 p.
16. Алхимов А. П. Газодинамическое напыление. Экспериментальное исследование процесса напыления/ В. Ф. Косарев, А. Н. Папырин. – М.: ПМТФ, 1997. – 183 с.
17. Алхимов А.П. Новые материалы и технологии. Теория и практика упрочнения материалов в экстремальных процессах/ В.Ф. Косарев, А.И. Папырин. — Новосибирск: Наука, 1992. – 197 с.
18. Champagne V. K. The cold spray materials deposition process/ V. K. Champagne, A. Papyrin, M. F. Smith. – England: Cambridge, 2007. – 377 p.
19. Gas-dynamic spraying method for applying a coating: pat. 5302414 US: IPC B05D 1/12, PCT/SU90/00126, WO91/19016. № 5302414; date: 02.02.1992; pub. date: 12.04.1994. – 13 p.
20. Apparatus for gas-dynamic coating: pat. 6402050B1 US: IPC B05B 1/24, PCT/RU97/00332, WO98/22639. № 6402050B1; date: 27.10.1999; pub. date: 11.06.2002. – 4 p.
21. Method of maintaining a non-obstructed interior opening in kinetic spray

nozzles: pat. 6896933B2 US: IPC B05D 1/02, 10/116,927. № 6896933B2; date: 05.04.2002; pub. date: 24.05.2005. – 7 p.

22. Moridi A., Cold spray coating: review of material systems and future perspectives/ A. Moridi, S. M. Hassani-Gangaraj. – USA, 2014. – 372 p.

23. Полякова Ю.П. Огляд установок для холодного газодинамічного напилення/ Полякова Ю.П., Герасименко О.Ю. та ін.// ISSN 2308-51312 Наукові праці ДонНТУ. Серія: «Машинобудування і машинознавство» No1(16)'2019: стаття. – с. 53, Покровськ: ДонНТУ, 2019. УДК 621.793.7

24. V. K. Champagne The cold spray materials deposition process: fundamentals and applications/ V. K. Champagne. – England, 2007. – 362 p.

25. Xiong T. Y. Introduction to a new technology – cold gas dynamic spray/ T. Y. Xiong. – Sci. Protect. Technol. Corros., 2001. – 269 p.

26. Gabel H. Kinetic metallization compared with HVOF/ H. Gabel – England: Adv. Mater. Process., 2004. – 48 p.

27. Jodoin B. Pulsed-gas dynamic spraying: process analysis, development and selected coating examples/ B. Jodoin, P. Richer. – England: Surf. Coat. Technol., 2007. – 75 p.

28. Method and apparatus for low pressure cold spraying: pat. 6759085B2 US: IPC B05D 1/02, 10/174,446. № 6759085B2; date: 17.06.2002; pub. date: 06.07.2004. –10 p.

29. Klinkov, S. V., Kosarev, V. F. Measurements of cold spray deposition efficiency. Journal of Thermal Spray Technology, 2006, vol. 15, no. 3, pp. 364-371. DOI: 10.1361/ 105996306X124365

30. Assadi, H., Gärtner, F., Stoltenhoff, T., Kreye, H. Bonding Mechanism in Cold Gas Spraying. Acta Mater, 2003, vol. 51, pp. 4379-4394.

31. Meng, F., Yue, S., Song, J. Quantitative prediction of critical velocity and deposition efficiency in cold-spray: a finite-element study. Scripta Materialia, 2015, vol. 107, pp. 83-87. DOI: 10.1016/j.scriptamat.2015.05.026

32. Cavaliere, P., Silvello, A. Processing parameters affecting cold spray coatings performances. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2014, vol. 71, no. 1-4, pp. 263-277 DOI: 10.1007/s00170-013-5465-0.
33. Yin, S., Liu, Q., Liao, H., Wang, X. Effect of injection pressure on particle acceleration, dispersion and deposition in cold spray. *Computational Materials Science*, 2014, vol. 90, pp. 7-15 DOI: 10.1016/j.commatsci.2014.03.055.
34. Li, W.-Y., Zhang, C., Guo, X. P., Zhang, G., Liao, H. L., Li, C.-J., Coddet, C. Effect of standoff distance on coating deposition characteristics in cold spraying. *Materials & Design*, 2008, vol. 29, no. 2, pp. 297-304. DOI: 10.1016/j.matdes.2007.02.005.
35. Crespo, V., Cano, I. G., Dosta, S., Guilemany, J. M. The influence of feedstock powders on the CGS deposition efficiency of bond coats for TBCs. *Journal of Alloys and Compounds*, 2015, vol. 622, pp. 394-401. DOI: 10.1016/j.jallcom.2014.09.216.
36. Герасимов С. Г. Теплотехнический справочник/ С. Г. Герасимов. – М: Государственное энерготехническое издание, 1957. – 728 с.
37. Jodoin B. Pulsed-cold gas dynamic spraying process: development and capabilities/ B. Jodoin, P. Richer, G. Berube, L. Ajdelsztajn, M. Yandouzi. – Ohio: Materials park, 2007. – 25 p.
38. Jodoin B. Pulsed-gas dynamic spraying: process analysis, development and selected coating examples/ Jodoin B., Richer P. – England: Surf. Coat. Technol., 2007. – 75 p.
39. Element type assignment [Электронный ресурс]. URL: <https://abaqus-docs.mit.edu/2017/English/SIMACAECAERefMap/simacae-c-mgnconcelelemassign.htm>
40. A. Banerjee Determination of Johnson cook material and failure model constants and numerical modelling of Charpy impact test of armour steel/ Banerjee, S. Dhar, S. Acharyya, D. Datta, and N. Nayak. – London: Materials Science & Engineering, 2015. – 209 p.
41. A. Sobolev Use of Johnson cook plasticity model for numerical simulations of

the snf shipping cask drop tests/ A. Sobolev, M. Radchenko. – London: Nuclear Energy and Technology, 2016 – 276 p.

42. H. Chandrasekaran, Modelling of material ow stress in chip formation process from orthogonal milling and split hopkinson bar tests/ H. Chandrasekaran, R. M`Saoubi, and H. Chazal. – London: Machining Science and Technology, 2005. – 145 p.

43. H. M`Saoubi. Aspects Thermiques et Microstructuraux de la coupe. Application a la coupe orthogonale des aciers austenitiques/ H. M`Saoubi. – Paris: ENSAM, 1998. – 84 p.

44. B. Changeux High-speed shear tests for the identification of the johnson cook law/ B. Changeux, M. Touratier, J. Lebrun, T. Thomas, and J. Clisson. – Paris: ESAFORM, 2001. – 606 p.

45. N. Tounsi From the basics of orthogonal metal cutting toward the identification of the constitutive equation/ N. Tounsi, J. Vincenti, A. Otho, and M. Elbestawi. – London: Machine Tools & Manufacture, 2002. – 503 p.

46. D. Umbrello The influence of johnson cook material constants on finite element simulation of machining of aisi 316L steel/ D. Umbrello, R. M`Saoubi, and J. Outeiro. – London: Machine Tools & Manufacture, 2007. – 470 p.

47. Buhl S. Optimization of a laval nozzle for energy-efficient cold spraying of microparticles/ S. Buhl, P. Breuninger, S. Antonyuk. – Kaiserslautern: TU Kaiserslautern, 2018. – 7 p.

ДОДАТОК А

Перелік зауважень нормоконтролера до кваліфікаційної роботи магістра студентки групи ТПМм-19 Полякової Ю. П.

Позначення документа	Документ	Умовна відмітка	Зміст зауваження

Науковий керівник

(підпис, дата)

Трет'яков П. В.

Нормоконтлолер

(підпис, дата)

Костіна О. Д.

Завідувач кафедри

(підпис, дата)

Топоров А. А.