Міністерство освіти і науки України

Запорізький національний університет
(повне найменування вищого навчального закладу)

Інженерний навчально-науковий інститут ім. Ю.М. Потебні
(назва факультету)

Кафедра металургійних технологій, екології та техногенної безпеки
(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота магістра

рівень вищої освіти___другий (магістерський) рівень_____
(другий (магістерський) рівень)

на тему___«Розробка каталітичноактивних інтерметалідних сплавів в умовах термохімічного пресування»_____

Виконав: студент ___2__курсу, групи *8.1364-омт*

__Трубчінін О. Ф._____
(ПІБ) (підпис)

спеціальності

_____*136 Металургія*_____
(шифр і назва)

спеціалізація

_____
(шифр і назва)

освітньо-професійна програма

*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

Керівник _Бєлоконь Ю.О._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Рецензент __Григор'в С. М._____
(прізвище та ініціали) (підпис)

Запоріжжя - 2025 року

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНИЙ НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ
ім. Ю.М. ПОТЕБНІ

Кафедра _____*металургійних технологій, екології та техногенної безпеки*___
Рівень вищої освіти _____*другий (магістерський) рівень*_____
(другий (магістерський) рівень)
Спеціальність ___*136 металургія*_____
(шифр і назва)
Освітньо-професійна програма ___*обробка металів тиском*_____
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри ___*МТЕТБ*_
_____*Ю. О. Бєлоконь*_

"__" _____2025 року

З А В Д А Н Н Я
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТУ

_____*Трубчінін Олександр Федорович*_____
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи (проєкта)____« Розробка каталітичноактивних інтерметалідних сплавів в умовах термохімічного пресування»_____
керівник роботи (проєкту)_____*Бєлоконь Юрій Олександрович*_____*д.т.н, проф.*
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)
затверджені наказом вищого навчального закладу від 27.02.2025 року № 319-с
2. Строк подання студентом роботи (проєкта)____*01.12.2025*_____
3. Вихідні дані до роботи (проєкта)__ Провести моделювання процесу впливу пластичної деформації на величину зерна інтерметалідних сплавів NiAl, Ni_3Al, $NiAl_3$, Ni_2Al_3. Встановити режими термохімічного пресування з метою отримання дрібнозернистої структури. Фактори оптимізації – X_1 – ступінь деформації, X_2 – температура пресування, X_3 – швидкість деформації. Параметр оптимізації Y_2 – величина зерна інтерметалідного сплаву._____
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) *Реферат. Вступ. Літературний огляд. Розрахунково-дослідницька частина, Індивідуальне завдання, Охорона праці та техногенна безпека, Висновки. Перелік джерел посилання.*_____
_____
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)
*Креслення, презентаційний матеріал 14 слайдах (на 14 сторінках)*_____

_____
_____
_____

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата завдання прийняв
Літературний огляд	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Розрахунково-дослідницька частина	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Індивідуальне завдання	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Охорона праці та техногенна безпека	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	
Нормоконтроль	*Бєлоконь Ю.О., д.т.н., проф.*	

7. Дата видачі завдання *01.03.2025*

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	*Вступ*		
2	*Реферат*		
3	*Літературний огляд*		
4	*Розрахунково-дослідницька частина*		
4	*Індивідуальне завдання*		
5	*Охорона праці та техногенна безпека*		
6	*Висновки*		

Студент _____ *О. Ф. Трубчінін*
(підпис) (прізвище та ініціали)

Керівник роботи _____ *Ю. О. Бєлоконь*
(підпис) (прізвище та ініціали

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра: 86 с., 26 рис., 6 табл., 24 джерела.

ПОРИСТА СТРУКТУРА, ІНТЕРМЕТАЛІД, КАТАЛІЗАТОР, ПЛАСТИЧНА ДЕФОРМАЦІЯ, ТЕРМОХІМІЧНЕ ПРЕСУВАННЯ, СИНТЕЗ, ЗЕРНО.

Мета роботи – встановити вплив пластичної деформації на величину зерна в інтерметалідних Ni-Al сплавах та оптимізувати режими їх термохімічного пресування.

Об'єкт розробки – інтерметалідні Ni-Al сплави.

Предмет дослідження – процеси пластичної деформації інтерметалідних сплавів та їх вплив на величину зерна.

Метод дослідження – лабораторні дослідження, аналітичний розрахунок і комп’ютерне моделювання процесу термохімічного пресування у програмі DEFORM.

На основі теоретичних розрахунків, виконаних із використанням моделі Холла-Петча, встановлено, що високотемпературний синтез інтерметалідних сплавів у порошковій суміші чистих елементів за умов термохімічного пресування в режимі теплового вибуху та за мінімального зовнішнього тиску забезпечує формування інтерметалідного продукту синтезу Ni_3Al із середнім розміром зерна близько 30-35 мкм. Отриманий матеріал характеризується граничною міцністю до 620 МПа, що приблизно на 100 МПа перевищує відповідний показник для сплаву $NiAl_3$.

ЗМІСТ

	ВСТУП……	7
1	АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ ……..	9
1.1.	Аналіз методів отримання пористих інтерметалідних каталізаторів для очищення промислових викидів ……	9
1.2.	Особливості термохімічного пресування та його застосування для отримання інтерметалідів ……..	12
1.3.	Печі графітізації для впровадження інтерметалідних каталізаторів……..	16
2	ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА……	29
2.1	Моделювання деформаційних і реологічних параметрів синтезу інтерметалідних сплавів в умовах термохімічного пресування……	29
2.2.	Особливості реакційних перетворень інтерметалідних Ni-Al сплавів. ……	36
2.3.	Комп’ютерне моделювання процесів деформації……	42
2.4.	Висновки до розділу ……	48
3	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР…….	50
3.1.	Устаткування та матеріали для термохімічного пресування ……	50
3.2.	Дослідження фізико-хімічних перетворень при термохімічному пресуванні..…….	56
3.3.	Випробування та контроль інтерметалідів……	58
3.4.	Методики проведення експерименту та статистична обробка отриманих результатів……	60
3.5.	Статистичний аналіз моделі……	62
3.6.	Дослідження природи каталітичної активності інтерметалідів……	65
3.7.	Висновки до розділу ……	67
4	ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА……	69

4.1. Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища при проведенні наукових досліджень….. 69
4.2. Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища лабораторії…… 71
4.3. Електробезпека…… 73
4.4. Пожежна та техногенна безпека…… 75
4.5. Розрахунок захисного заземлення…… 77
4.6. Висновки до розділу …… 80
ВИСНОВКИ…… 82
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ …… 84

ВСТУП

Пориста структура є однією з визначальних характеристик твердих каталізаторів, оскільки саме вона значною мірою визначає їхню активність, селективність і стабільність у каталізаторних процесах. Як правило, тверді каталізатори мають розвинену внутрішню пористу систему, що являє собою складну мережу пор різної форми та розміру. Завдяки цьому формується значна питома внутрішня поверхня, яка може сягати десятків і навіть сотень квадратних метрів на один грам матеріалу, забезпечуючи ефективний контакт активних центрів з реагентами. Поняття пористої структури каталізатора є комплексним і охоплює сукупність взаємопов’язаних параметрів, зокрема радіус і розподіл пор за розмірами, загальний об’єм пор, питому поверхню, форму та взаємне сполучення порових каналів. За характером формування пористої структури більшість каталізаторів умовно поділяють на два основні типи – губчасті та глобулярні. Губчасті структури являють собою суцільні тверді тіла, пронизані системою конусоподібних, циліндричних або пляшкоподібних пор, що утворюються внаслідок виділення летких або розчинних компонентів із матеріалу під час термічної чи хімічної обробки. Натомість глобулярні структури мають дискретний характер і складаються з окремих частинок (глобул), упакованих у певному порядку, з утворенням міжчастинкових пор. Таким чином, задача формування каталізатора із заданими пористими характеристиками зводиться до керування розмірами первинних частинок і характером їх упакування. Водночас створення каталізаторів і конструкційних матеріалів на основі інтерметалідної фази NiAl традиційними деформаційними методами обробки литих злитків із грубозернистою структурою супроводжується значними технічними труднощами. Такі методи потребують використання складного обладнання, дорогих витратних матеріалів і, як правило, не забезпечують формування однорідної мікроструктури по всьому об’єму виробу. Крім того, литі NiAl-сплави характеризуються обмеженою пластичністю та

низькою технологічністю, що ускладнює їх подальшу термомеханічну та механічну обробку. Отримання повністю консолідованого порошкового матеріалу з мінімальним вмістом домішок упровадження, однорідною структурою та оптимізованим хімічним складом дозволило б уникнути низки характерних ливарних проблем, зокрема складної та енергоємної післялитейної обробки. Це дало б можливість одразу формувати напівфабрикати або готові вироби з необхідними експлуатаційними властивостями.

У цьому контексті порошкові технології є значно більш перспективним підходом для подрібнення структури та керування морфологією матеріалів на основі сплавів системи Ni-Al. З огляду на те, що інтерметалід NiAl належить до важкодеформуючих і низькотехнологічних матеріалів, розвиток порошкових технологій його отримання відкриває нові можливості для формування контрольованої пористої структури, підвищення функціональних характеристик і розширення сфер практичного застосування таких матеріалів, зокрема як ефективних каталізаторів і каталізаторних носіїв.

Перспективним напрямом створення каталізаторів із керованою пористою структурою на основі інтерметалідних сполук системи Ni-Al є застосування технології термохімічного пресування. У ході термохімічного пресування відбувається саморозігрів реакційної суміші за рахунок екзотермічних реакцій синтезу інтерметалідних фаз, а прикладений тиск сприяє контрольованій консолідації порошкової заготовки. Це дозволяє цілеспрямовано регулювати співвідношення відкритої та закритої пористості, розміри пор і характер їх сполучення, а також отримувати однорідну мікроструктуру з мінімальним вмістом домішок. Завдяки поєднанню енергоефективності, відносно невисоких температур обробки та можливості формування виробів складної геометрії термохімічне пресування є ефективною технологічною основою для отримання високопористих інтерметалідних каталізаторів і носіїв каталізаторів із заданими структурно-функціональними властивостями.

1 АНАЛІЗ НАУКОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ ТА СТАН ПРОБЛЕМИ

1.1 Аналіз методів отримання пористих інтерметалідних каталізаторів для очищення промислових викидів

Інтерметалідні сплави сьогодні отримують широким спектром технологічних методів, детальні огляди яких наведені в роботах [1-2]. Проблематика синтезу та дослідження інтерметалідів активно розробляється як в українських науково-дослідних інститутах, так і в провідних європейських центрах матеріалознавства. Вчені застосовують різноманітні підходи до отримання таких сполук – від традиційних металургійних технологій до сучасних методів порошкової металургії та високотемпературного синтезу.

До найбільш поширених методів належать виплавка у дугових та індукційних печах, електрошлаковий переплав у середовищі інертних газів під «активними» флюсами, алюмотермічне відновлення оксидів та галогенідів металів, електролітичне осадження кристалів інтерметалідів із розплавів, гідридно-кальцієве відновлення, а також деформаційні методи та процеси порошкової металургії. Кожен із цих способів має свої особливості, технологічні обмеження та сфери застосування.

Найпростішим і водночас одним із найпоширеніших способів одержання інтерметалідів є синтез на основі взаємодії компонентів:

$$mMe + nMe' \rightarrow Me_mMe'_n$$

Цей процес реалізують двома основними шляхами – плавленням або спіканням. У разі синтезу методом спікання вихідні компоненти беруть у вигляді порошків відповідних металів, після чого нагрівають до температур, за яких відбувається твердофазна хімічна реакція. На відміну від звичайного спікання, що забезпечує лише ущільнення матеріалу, у

випадку реакційного спікання відбувається утворення нової хімічної сполуки. Це супроводжується як ущільненням, так і збільшенням об’єму реакційної системи [1], що пов’язано з екзотермічністю процесу синтезу. Значне тепловиділення може викликати локальний перегрів матеріалу та навіть викиди реагуючої маси. Щоб уникнути небажаних ефектів, процес зазвичай проводять у режимі низькотемпературного твердофазного синтезу, який отримав назву реакційного спікання [1]. Швидкість перебігу реакції визначається гетеродифузійними процесами, а кінцевий фазовий склад — співвідношенням компонентів, діаграмою стану системи та наближеністю умов до термодинамічної рівноваги. Досягненню рівноважного стану сприяє подрібнення порошків, ретельне змішування та забезпечення максимально щільного контакту частинок.

Іншим поширеним методом є пряме сплавлення компонентів у дугових або індукційних печах. Дугова плавка дозволяє отримати надзвичайно високі температури, достатні для плавлення практично всіх інтерметалідів. Реакція перебігає швидко, а ризик забруднення продукту мінімізується завдяки використанню охолоджуваних піддонів і інертної атмосфери. Водночас основною проблемою дугової плавки є летючість окремих елементів при високих температурах, що може призводити до зміни складу сплаву. Крім того, різкий температурний градієнт у зливку, спричинений інтенсивним водяним охолодженням піддону, створює нерівноважні умови кристалізації. Тому для формування гомогенного інтерметаліду зливок часто переплавляють кілька разів [12]. Виготовлення масивних зливків ускладнюється у випадку сплавів із низьким вмістом алюмінію або складнолегованих систем, де під час охолодження можуть виникати тріщини через фазові перетворення та об’ємні ефекти затвердіння [12].

Індукційна плавка передбачає нагрів металу струмами, що виникають під дією змінного магнітного поля. Нагрів може здійснюватися як безпосередньо в металевій шихті, так і через проміжний нагрівач — графітову або тугоплавку трубку, розташовану між індуктором і тиглем. Температура плавлення контролюється зміною потужності індуктора, а процес проводять у вакуумі або

інертному газі всередині водоохолоджуваного тигля. Основними недоліками цього методу є значні термічні напруження у зливку та відносно високі енерговитрати, а також можливість утворення хімічної неоднорідності матеріалу.

Останніми роками значної популярності набули методи порошкової металургії, за яких пресовані суміші порошків спікають у відновній або інертній атмосфері при температурах 660–700 °C [18]. Особливо перспективними є технології, що використовують метод термохімічного пресування (ТХП) [14]. Цей метод базується на використанні внутрішньої хімічної енергії реагентів, що забезпечує швидке та енергоефективне протікання реакції. Перевагами ТХП є низькі енерговитрати, короткий час синтезу, простота обладнання та можливість отримання цільових продуктів високої чистоти за одну стадію, оскільки склад кінцевої сполуки визначається чистотою вихідних компонентів.

Саморозповсюджувальний високотемпературний синтез являє собою процес швидкої взаємодії елементів у конденсованій фазі, що самовільно поширюється у вигляді хвилі горіння. Спочатку метод був розроблений для синтезу тугоплавких сполук, однак із часом його застосування значно розширилося, і нині перелік матеріалів, отриманих за допомогою ТХП ї хімічної природи, що приводять до утворення конденсованих продуктів, придатних для практичного використання. Реакційне середовище може бути твердим, рідким, газоподібним або змішаним, проте ключовою умовою є те, що після охолодження продукт горіння повинен бути твердою фазою.

На основі узагальненої схеми процесу ТХП (рис. 1.1) [5] виділяють декілька характерних різновидів цього методу. До них належать процеси з початковими реагентами у твердому та газоподібному станах ($R_1(T_0)$—s, $R_2(T_0)$—g), а також реакції, де один з компонентів є рідким. Окремим напрямом розвитку стали процеси конденсаційного горіння газів, за яких вихідні реагенти перебувають у газоподібному стані, а кінцевий продукт – у твердій фазі. Незважаючи на близькість до газопаливного горіння, ці процеси розглядаються

в межах ТХП, оскільки сприяють отриманню конденсованих матеріалів зі специфічними властивостями.

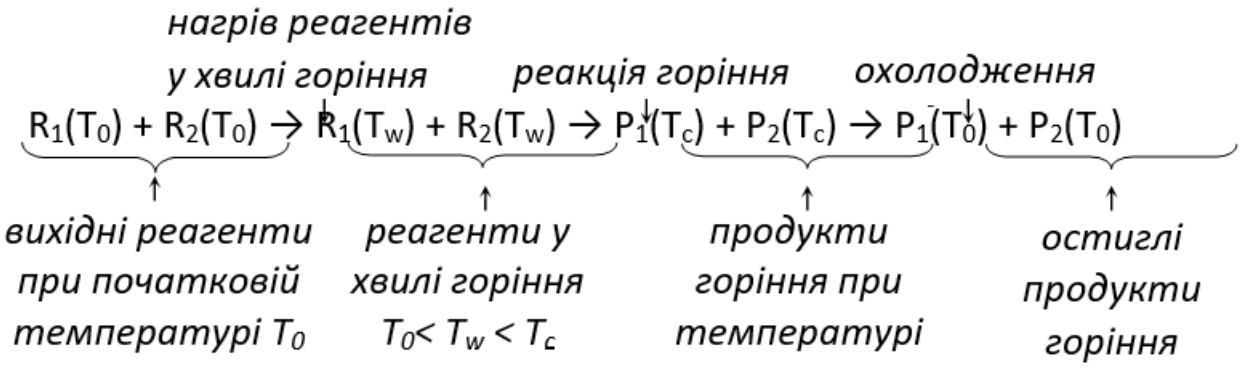


Рисунок 1.1 – Схема процесу високотемпературного синтезу

1.2 Особливості термохімічного пресування та його застосування для отримання інтерметалідів

Термохімічне пресування є одним із різновидів технологій високотемпературного синтезу і розглядається як ефективний метод отримання компактних, практично безпористих матеріалів та виробів складної форми. Сутність технології полягає в тому, що пористі продукти реакції синтезу, які перебувають у стані високої температури й ще не встигли охолонути, піддаються додатковому зовнішньому впливу – пресуванню, екструзії, прокатці або навіть обробці вибухом. Таким чином, процес поєднує хімічне перетворення реагентів із одночасною пластичною деформацією продукту синтезу, що дозволяє значно підвищити густину та однорідність матеріалу.

Розпочинається технологія з ретельного добору та підготовки вихідної сировини – металевих і неметалевих порошків. Їх властивості, зокрема розмір частинок, форма зерен, ступінь чистоти та кількість домішок, істотно впливають на параметри синтезу та якість кінцевого продукту [16]. Особливо важливим є контроль дисперсності. Наприклад, встановлено, що в системі Ni–Al збільшення розміру частинок титану від 2…20 мкм до 100…160 мкм приводить до зростання середнього розміру зерен інтерметаліду від 2…3 мкм до приблизно 20 мкм. Це

свідчить про те, що для отримання дрібнозернистої структури необхідно використовувати порошки з мінімально можливою дисперсністю.

Наступним ключовим етапом є змішування компонентів шихти. Воно має забезпечити високу гомогенність порошкової суміші та не призводити до її забруднення сторонніми включеннями. Однорідність суміші контролюють хімічним аналізом проб, які відбирають із різних зон змішувального об'єму. Існують два основних підходи до змішування – сухий та мокрий. Мокрий спосіб у середовищі спирту дозволяє швидко досягти рівномірності, проте створює труднощі із видаленням залишків рідини та ризик часткового гідролізу реагентів. Тому для процесів термохімічного пресування частіше застосовують сухе змішування у вакуумі або у повітрі.

Із підготовленої порошкової суміші формують шихтовий брикет (шихтову заготівку) шляхом пресування. Його відносна густина є критично важливим параметром, оскільки вона визначає розмір зерна інтерметаліду у компактованому матеріалі (рис. 1.2). Залежність має нелінійний, екстремальний характер: мінімальне значення розміру зерна досягається при густині 0,60–0,65. Саме тому тиск пресування підбирають так, щоб забезпечити оптимальну щільність брикету.

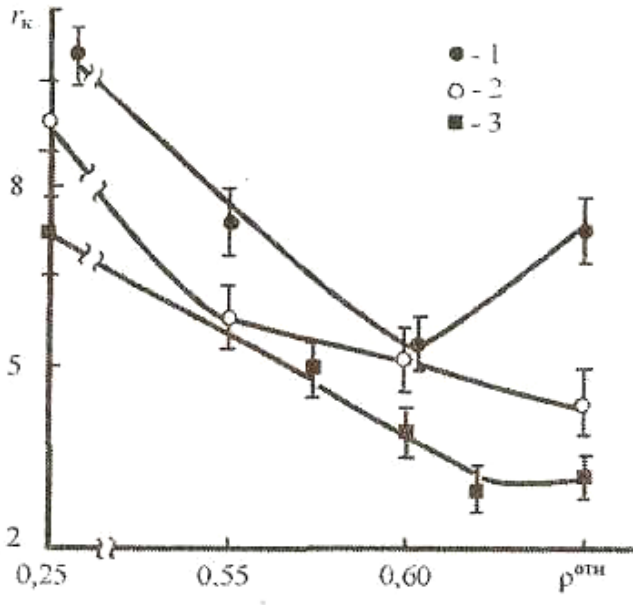


Рисунок 1.2 – Залежність середнього розміру зерна фази інтерметаліду в компактованому матеріалі від відносної щільності матеріалу

Подальша технологічна послідовність ґрунтується на тимчасовій діаграмі процесу термохімічного пресування (рис. 1.3). Термохімічне пресування фактично є прикладом динамічного компактування, у якому поєднуються синтез і ущільнення.

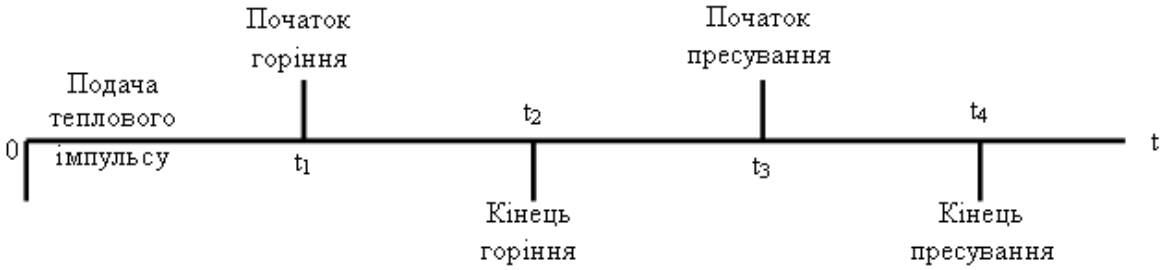
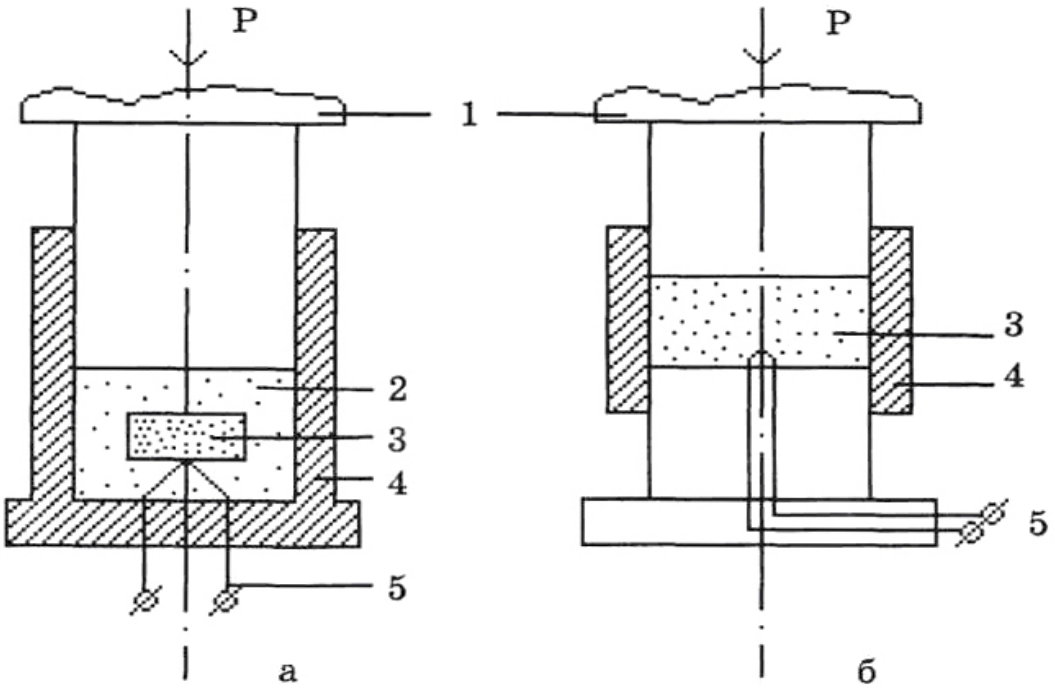


Рисунок 1.3 – Тимчасова діаграма процесу термохімічного пресування

Для реалізації процесу використовують таку схему. Спочатку шихтову заготівку, виготовлену з порошків різних компонентів, розміщують у реакційній прес-формі в середовищі сипкого теплоізолятора (найчастіше піску). Така теплоізоляційна оболонка не лише сповільнює охолодження, а й виводить гази, що утворюються під час горіння, та забезпечує рівномірну передачу тиску. Запальник, через який пропускається електричний струм, ініціює хвилю горіння. Тривалість проходження хвилі по всьому об’єму заготовки – час реакції t_R – становить від 0,5 до 15 секунд.

Після завершення синтезу матеріал витримують 1-5 секунд для відведення газів, а далі прикладають тиск пресування ($P_К$), формуючи щільний компакт. Тривалість ущільнення зазвичай становить 3-120 секунд. Схема, наведена на рисунку 1.4а, застосовується для малогабаритних заготівок. Для них наявність теплоізолятора критично важлива: без нього вироби охолонуть настільки швидко, що процес ущільнення фізично не встигне завершитися і залишкова пористість залишиться значною.



1 – пуансон; 2 – теплоізолятор; 3 – шихта; 4 – перс-форма; 5 – ініціюючий пристрій

а – для тонких заготівель, б – для великогабаритних заготівель

Рисунок 1.4 – Принципові схеми проведення процесу термохімічного пресування [17]

Важливою умовою отримання безпористого компактного стану є дотримання співвідношення температур:

$$T_k \leq T_0,$$

де T_0 – температура після синтезу,

T_k – температура початку ефективного пресування.

Завдяки теплоізоляційній оболонці час охолодження збільшується, і ця умова виконується.

Однак схема з піском має і недолік – спотворення форми виробу через деформацію сипкого середовища. Тому для масивних деталей (понад 1 кг), які повільно охолоджуються природним чином, використовують схему без

теплоізолятора (рис. 1.4б). Це дозволяє отримувати вироби точної форми, що потребують мінімальної механічної обробки.

Отже, синхронізація процесів високотемпературного синтезу та динамічного компактування дозволяє отримати інтерметалідні матеріали з високодисперсною структурою. Розмір зерен у таких компактних сплавах значно менший, ніж у матеріалах, отриманих традиційними методами лиття, спікання або ударно-хвильової дії. Подрібнення структури відбувається завдяки інтенсивній пластичній деформації та високим швидкостям охолодження. Ефективність процесу зростає при збільшенні ступеня пластичної деформації під час синтезу, наприклад у разі екструзії через калібр або використання інших схем прикладення тиску безпосередньо в момент високотемпературного реакційного процесу.

1.3 Печі графітізації для впровадження інтерметалідних каталізаторів

Графітація – це технологічна операція високотемпературної обробки вуглецевих матеріалів (коксів, вугілля або виробів на їх основі) за температур 2500–3000 °C. Як правило, графітації піддають напівфабрикати, що вже пройшли етапи формування (пресування) та попереднього випалу. Високотемпературна дія може застосовуватися як до кускових матеріалів (наприклад, під час отримання термографіту), так і до порошкоподібних форм.

У процесі графітації структура вихідних матеріалів зазнає глибоких змін. Під впливом таких екстремальних температур істотно зростають їхня густина, хімічна інертність, електро- і теплопровідність. Матеріали стають характерно «жирними» на дотик та залишають слід на папері – тобто набувають властивостей, притаманних природним графітам. Саме це й дало підставу назвати процес «графітацією», тобто перетворенням вуглецевих виробів у матеріали, аналогічні природному графіту.

Процес графітації належить до найбільш енергоємних електротермічних технологій. Залежно від типу та розмірів виробів споживання електроенергії може сягати 3000-10000 кВт·год на тонну продукції.

Історично першу ідею графітації вугільних стрижнів запропонував Кастнер (США, 1893 р.), який передбачав нагрівання матеріалу електричним струмом у контактних затискачах, однак його метод не був технічно доведений до промислового рівня. Перші промислові печі для графітації розробили Жирар і Стріт (Франція, 1893–1895 рр.). Це були дугові печі безперервної дії, у яких електрична дуга, замкнута між електродами, нагрівала протягувані крізь неї вугільні стрижні малого діаметра. Через конструктивні недоліки такі печі не набули широкого застосування.

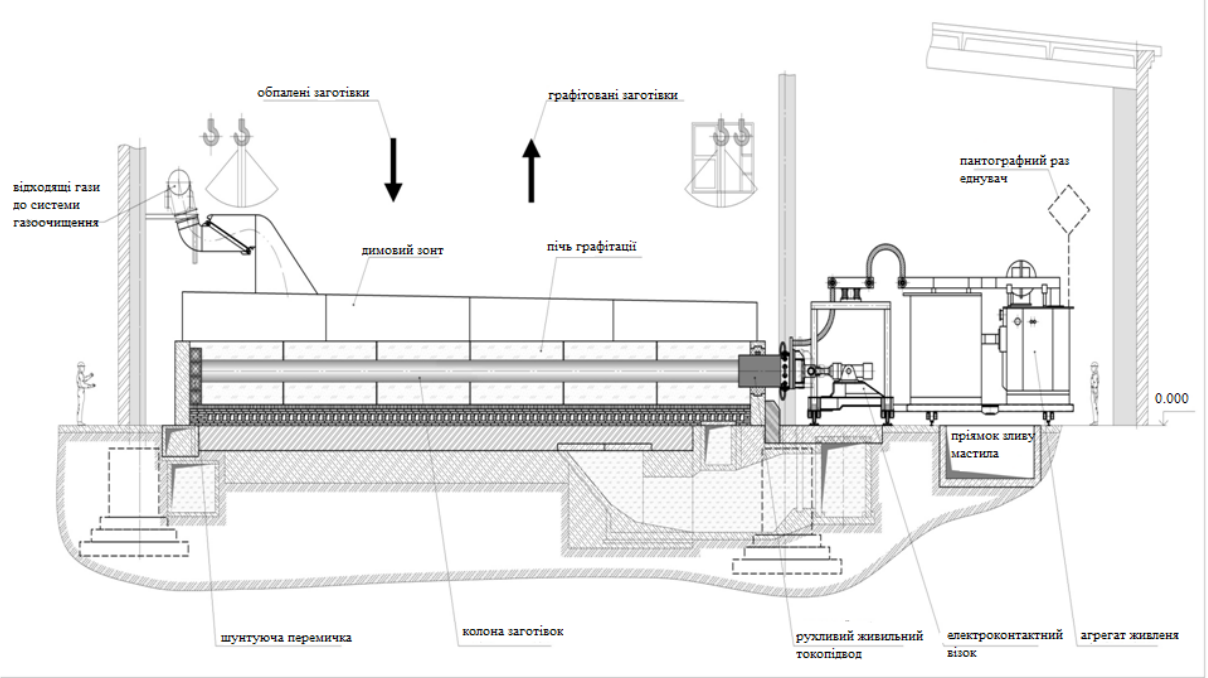
Найбільш ефективний метод графітації розробив Ачесон (США, 1896 р.), який запропонував нагрівати матеріал струмом, що безпосередньо проходить через нього. Ачесон також створив конструкцію печі, здатної одночасно обробляти значні об’єми матеріалів різної форми та розміру. Цей підхід став основою сучасних технологій графітації й поширився по всьому світу. Від часу його розробки принцип дії печей майже не змінився, хоча їх розміри та потужності трансформаторів суттєво зросли.

Печі графітації, запозичені із виробництва карбідів ще наприкінці XIX століття, зберегли класичну конструкцію й сьогодні. Вони належать до групи електричних однофазних печей опору прямого нагріву, де джерелом тепла виступає електричний струм, що проходить крізь графітований матеріал і нагріває його до 3000 °С. Цінність таких печей полягає у можливості концентрувати колосальну кількість енергії в обмеженому об'ємі.

Під терміном «електрична піч» у контексті графітації розуміють комплекс обладнання, що включає саму піч, трансформатор та систему короткої електричної мережі — провідників, які передають струм низької напруги від джерела живлення до робочої зони, де електроенергія перетворюється на тепло.

На рис. 1.5 подано загальний вигляд графітувальної печі. Основними її складовими є дві торцеві стінки, з’єднані основою — подиною печі. У стінках

розташовані струмопідвідні електроди, через які електроенергія подається безпосередньо у робочий простір між ними. Цей простір заповнюють матеріалом або виробами, що підлягають графітації; після завантаження ця зона називається «керном» печі.



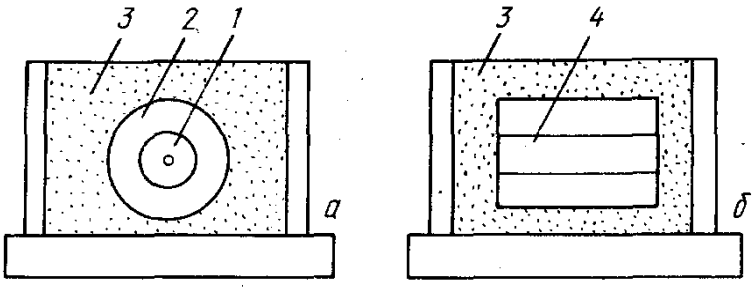
1 -торцева стінка; 2 - основа печі; 3 - струмопідвідні електроди; 4 - робочий об'єм (керн)

Рисунок 1.5 – Схема печі графітації

Деякі ділянки короткої мережі можуть одночасно служити елементами конструкції печі (наприклад, струмопідвідні електроди).

На рис. 1.6 наведені поперечні розріз карборундової (а) та графітувальної (б) печей. У карборундовій печі в центрі робочого об'єму розташовані керни 1, навколо нього - шихта 2, з якої утворюється карбід кремнію (SiC). Керн у цьому випадку є нагрівачем (через нього тече електричний струм) і елементом, який створює теплове поле для виникнення та завершення процесу утворення карбіду кремнію з шихти 2. У графітувальній печі завантажені вироби також називають керном 4, але функції його зовсім інші, ніж у карборундовій. У тому ж обсязі, де виділяється тепло за рахунок струму, що протікає, протікає і основний процес -

графітація.



а - карборундовий; б - графітувальний; 1 - керн; 2 - шихта; 3 - теплова ізоляція; 4 - робочий об'єм (керн)

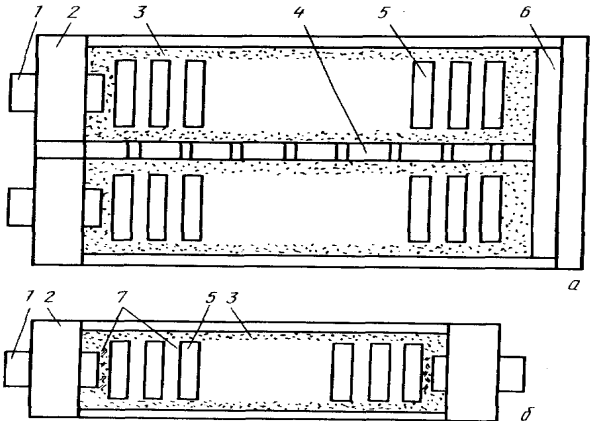
Рисунок 1.6 – Схематичні поперечні розрізи електричних однофазних печей опору

Тому термін "керн" для печі графітації не несе того значеннєвого навантаження, що для карборундової, а перенесений з практики експлуатації карборундової печі.

Печі графітації відносяться до класу печей періодичної дії. Графітація виробів провадиться окремими партіями; після завершення процесу графітації (кампанії) піч охолоджують, потім розвантажують, а після огляду та ремонту - знову завантажують та підключають до електричної мережі.

Піч Ачесона має великі недоліки, зумовлені переважно періодичністю її дії. Це – низький к.п.д. і мала продуктивність через тривалий процес графітації простоїв при охолодженні, розвантаженні та завантаженні. Через малу продуктивність однієї печі потрібна установка великої кількості печей, спорудження для них великої площі будівлі, довгі магістралі струмопідвідних шин. Крім того, необхідні величезні кількості допоміжних матеріалів – теплоізоляційної шихти та пересипання. Наприклад, для завантаження однієї печі потужністю близько 8000 кВ цих матеріалів потрібно на проведення однієї кампанії близько 50 т, що пов'язано з незручностями при експлуатації. До того ж виробничі операції доводиться виконувати вручну і в безпосередній близькості до великих мас сильно нагрітих матеріалів.

В даний час у промисловості використовуються дві характерні конструкції печей графітації: нормальні (прямі) або, як їх іноді називають, печі Ачесона та П-подібні печі. На рис.1.7 представлені схеми цих печей.



а - П-подібна піч; б - нормальна піч (Ачесона); 1 - струмопідвідний електрод; 2 -торцева стіна; 3 - теплоізоляційна шихта; 4 - роз'єднувальна стінка; 5 - електроди; 6 - сполучний провідник; 7 - пересипання

Рисунок 1.7 – Схеми основних типів печей графітації

Нормальні графітувальні печі є найпоширенішими та можуть працювати як від змінного, так і від постійного струму. Печі П-подібної конфігурації застосовують значно рідше — переважно на потужних установках, що функціонують виключно на постійному струмі.

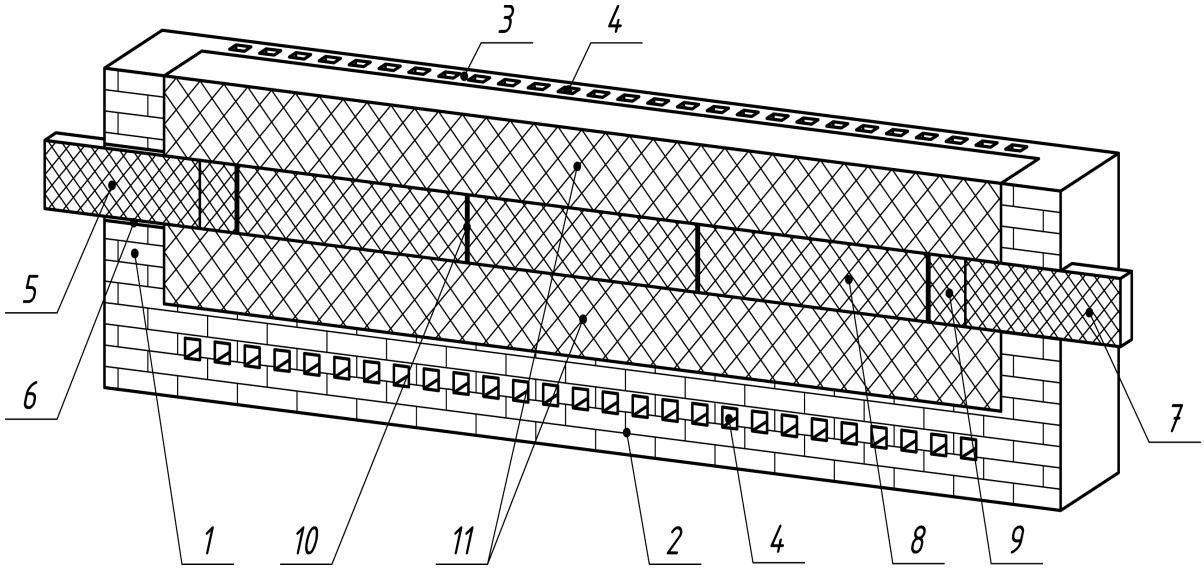
Конструкцію типової прямої (нормальної) графітувальної печі наведено на рис. 1.8. Піч має міцну основу у вигляді прямокутного корита 1 та дві торцеві стінки 2. У цих стінках передбачено отвори для встановлення струмопідвідних електродних пакетів 3, до яких подається електричний струм від високопотужних джерел живлення. Усередину корита формують спеціальну подину — ущільнений шар суміші порошкоподібних вуглецевих матеріалів і піску. На підготовлену подину укладають вироби 4 (наприклад, електроди), що підлягають графітації.

Бічні стінки 5 виконують функцію утримання завантаження в межах печі. Зазвичай вони є розбірними – їх монтують перед початком кампанії та демонтують після її завершення. Існують також конструкції з нерозбірними

бічними стінками, або з однією розбірною стінкою для полегшення завантаження та розвантаження печі.

Габарити графітувальних печей визначаються обсягом завантаження та геометричними параметрами виробів. Так, під час графітації електродів ширина печі залежить від довжини електрода, який укладається перпендикулярно до її осі. Сучасні електроди мають довжину близько 1700 мм, а іноді й до 2000 мм. Відповідно, ширина печі повинна забезпечувати не лише розміщення електрода, а й товщину теплоізоляційного шару (близько 500–700 мм з кожного боку), а також шунтувальних шарів і бічних стінок.

Для графітації малогабаритних виробів — конструкційних графітів, щіток для електричних машин та інших видів малотоннажної продукції — допускається застосування форсованих режимів нагріву. Для таких цілей зазвичай використовують малопотужні печі з перерізом керна від 0,3 до 1,0 м².



1,3 - торцева і бічна стіни; 2 - подина; 4 - повітряні канали; 5 - рухливий струмопідвод; 6 - гніздо рухливого струмопідвода; 7 - нерухомий струмопідвод; 8 - заготовки; 9 - вирівнююча вставка; 10 - демпферна прокладка; 11 - теплоізоляція.

Рисунок 1.8 – Графітувальна піч нормальна пряма

Визначення оптимальної довжини графітувальної печі є значно складнішим завданням, ніж підбір її ширини чи висоти. На практиці

використовують печі довжиною від 4 до 20 м (для роботи на змінному струмі) та до 40 м — у разі застосування постійного струму. Збільшення довжини печі часто є економічно вигідним, оскільки, за однакової потужності трансформатора, подовження керна підвищує як тепловий, так і електричний ККД, що, у свою чергу, збільшує продуктивність і зменшує питому витрату електроенергії. Це пояснюється зростанням активного опору зі збільшенням довжини керна.

Втім, для печей, що працюють на змінному струмі, паралельно зростає і індуктивний опір. На надто довгих печах він стає настільки значним, що нівелює позитивний ефект від збільшення омічного опору, різко погіршуючи техніко-економічні показники. Через це у промисловості не будують печі з довжиною керна понад 20 м. Нижче наведені узагальнені дані щодо типових значень довжини керна та відповідних потужностей графітувальних печей.

Режим графітації. Граничні температури завершення процесу графітації зазвичай перебувають у межах 2300–3000 °С. Питання швидкості нагрівання залишається більш дискусійним. З одного боку, повільніший нагрів сприяє отриманню більш щільних виробів, з іншого — надто великий градієнт температур може викликати утворення тріщин. Ці вимоги суперечать теплотехнічній логіці процесу: з позицій енергетичної ефективності найвигіднішим є максимально швидкий нагрів. Будь-яке штучне його уповільнення зменшує досяжну максимальну температуру та підвищує витрати електроенергії.

Найважливіші структурні зміни, що супроводжуються суттєвою усадкою, відбуваються в інтервалі 1300–2100 °С. Частина фахівців вважає, що цей температурний діапазон слід проходити повільно — зі швидкістю близько 30 °С/год. Якщо його пройти швидше, усадка помітно зменшується, що негативно впливає на щільність і механічні властивості виробів. Нижче та вище цього діапазону швидкість нагрівання може бути значно збільшена.

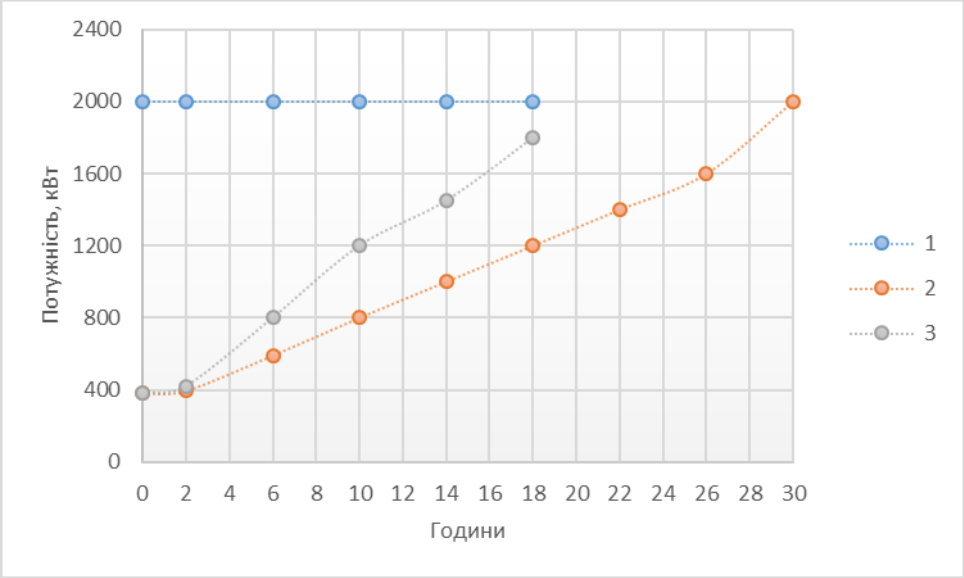
Основна причина появи тріщин під час графітації — нерівномірний прогрів виробу по довжині та поперечному перерізу. Це створює значні внутрішні напруження, здатні зруйнувати виріб. Наприклад, під час

графітування електродів нагрів починається з поверхні і лише з часом поширюється до центру. Це пов’язано з тим, що керн печі складається з опорів пересипання з високим електричним опором та електродів з відносно низьким опором. За однакового струму, що протікає через піч, більша частина теплової енергії (приблизно 98 %) виділяється саме в пересипанні. Через низьку теплопровідність коксових електродів швидкий підйом температури спричиняє значні перепади температури між периферією та центром, що може призвести до їх розтріскування.

У графітувальних печах практично неможливо здійснювати безпосередній контроль температури всередині виробу. Тому у виробничій практиці режим графітації задають за допомогою графіка підведеної потужності. Він базується на припущенні, що температура в керні прямо залежить від кількості енергії, поданої до печі. Хоча спожита енергія не відображає точної швидкості нагріву, загальна закономірність така: що коротший час введення певної кількості енергії, то стрімкіше зростає температура та вищих температур можна досягти. При зменшенні швидкості підводу енергії спостерігається протилежний ефект.

Попри недоліки, метод керування процесом за графіком потужності є найпоширенішим у промисловості, оскільки альтернативні методи мають ще більше обмежень. Графіки встановлюють експериментально, виходячи з необхідності отримати якісні вироби, високий вихід придатної продукції та раціональні витрати електроенергії.

На рис. 1.9 наведено приклади графіків потужності для виробів різного розміру. Показано лише керовану (ліву) частину графіка. Зокрема, для дрібних виробів застосовується режим, за якого піч підключають на максимальну напругу і трансформатор працює на повній потужності. Процес проходить дуже швидко, суттєво зменшує теплові втрати та забезпечує мінімальну витрату електроенергії.

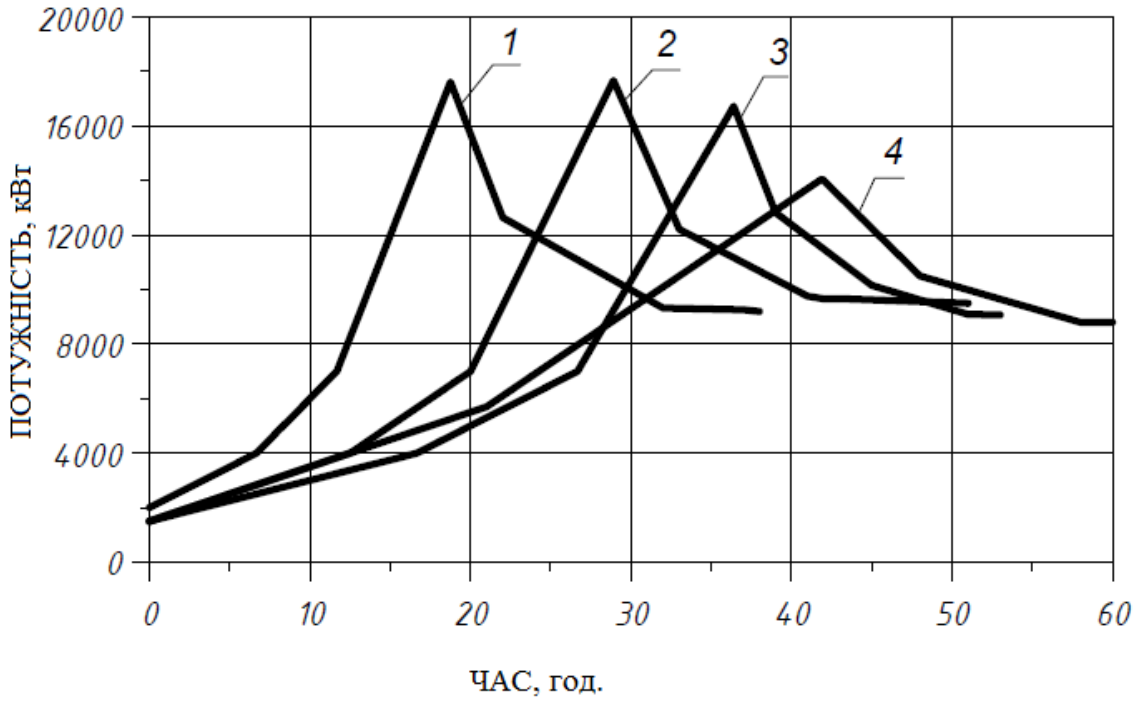


1 - для дрібних виробів; 2 - для великих виробів; 3 - для середніх виробів

Рисунок 1.9 - Криві потужності при графітуванні різних виробів

Графік 3 застосовують для обробки крупногабаритних виробів. Для нього характерна значна тривалість процесу та низька початкова потужність. Такий режим графітування потребує підвищених витрат електроенергії та призводить до зменшення продуктивності. Графік 2 займає проміжну позицію й використовується для графітування виробів середніх розмірів.

Аналіз промислових режимів графітування показує, що всі вони мають спільні риси, пов’язані з особливостями електротехнічних параметрів процесу. Потужність зростає поступово й досягає певного максимального значення — критичної точки, після якої відбувається її спадання (див. рис. 1.10). Паралельно зменшуються активний опір печі та коефіцієнт потужності.



1 - Ø300 мм; 2 - Ø350 мм; 3 - Ø400 мм; 4 - Ø600 мм

Рисунок 1.10 – Графіки типових регламентів введення потужності

Інтенсифіковані режими введення потужності при графітуванні заготівок малих і середніх діаметрів (таблиця 1.1).

Таблиця 1.1 – Інтенсифіковані режими графітування заготівок

Ø заготівок, мм	ПВЕ, кВтг·г/т	Потужність включення, кВт		Підйом потужності, кВт/ч					
		на піч	на тонну	до 4000 кВт		до 6000 кВт		до максимуму	
				на піч	на тонну	на піч	на тонну	на піч	на тонну
200	3700	1500	30	500	10	без обмежень			
250	3900	1200	24	350	7	450	9	700	14
300	4000	1200	24	300	6	400	8	700	14
350	4100	1200	24	250	5	400	8	600	12
400	4500	1000	20	150	3	250	5	400	8

Застосування описаних режимів подачі електроенергії дозволило скоротити тривалість графітувальних кампаній, підвищити продуктивність печей і збільшити вихід електродів вищих сортів порівняно з традиційними режимами без інтенсифікації. Цей метод відзначається простотою реалізації та не потребує спеціалізованого приладового забезпечення, проте він не дає точного уявлення про ключовий показник процесу графітування – температуру, її розподіл усередині керна та швидкість зміни в часі.

Як видно з проведеного аналізу, розробка оптимального регламенту подачі електроенергії є досить складним завданням. З одного боку, високоефективними з точки зору енергоспоживання є високоінтенсивні режими нагріву. З іншого боку, застосування таких інтенсивних графіків обмежене через обмежену потужність живлячого обладнання та ризик виникнення тріщин або руйнування вуглеграфітових заготівок через високі швидкості нагріву та великі перепади температур, що особливо критично для виробів великого діаметру та довжини.

Таким чином, забезпечення науково обґрунтованого нагріву вуглеграфітових виробів, при якому досягаються необхідні фізико-механічні властивості графіту, зберігається цілісність виробів і забезпечується прийнятна енергоємність процесу, є комплексним завданням, що залежить від багатьох факторів. Тому особливо важливим є детальне дослідження процесів, що протікають під час графітування, особливо при розробці нових технологічних заходів для виробництва нової продукції, підвищення якості графітуваних виробів і поліпшення енергетичної ефективності кампаній графітування.

Одним із найважливіших завдань при укладанні керна печі є забезпечення максимально рівномірного розподілу температур як по перерізу, так і вздовж усієї довжини керна. Дослідження показують, що при нерівномірному укладанні різниця температур у межах 300-400 °С у різних ділянках керна може зберігатися протягом усієї кампанії, незважаючи на її тривалість. Повністю однорідне укладання керна, що забезпечувало б рівномірний температурний профіль по всьому об’єму, практично неможливе. Тому на практиці режим графітування

організовують так, щоб мінімальні температури залишалися в межах, необхідних для отримання графіту високої якості.

Досягти однакових температур по всьому об’єму керна можна лише за умови, що в кожній одиниці його об’єму виділяється однакова кількість енергії. На процес розподілу тепла впливають початкові температури, різниця тисків у верхніх і нижніх шарах керна, електродинамічні взаємодії струмів печі та зворотних шин, а також явище скін-ефекту.

Керн печі характеризується явним наростаючим ефектом: будь-яка нерівномірність укладання, незначна у холодному стані, під час нагріву значно посилюється, приводячи до істотних нерівномірностей розподілу струму при високих температурах (див. рис. 1.11).

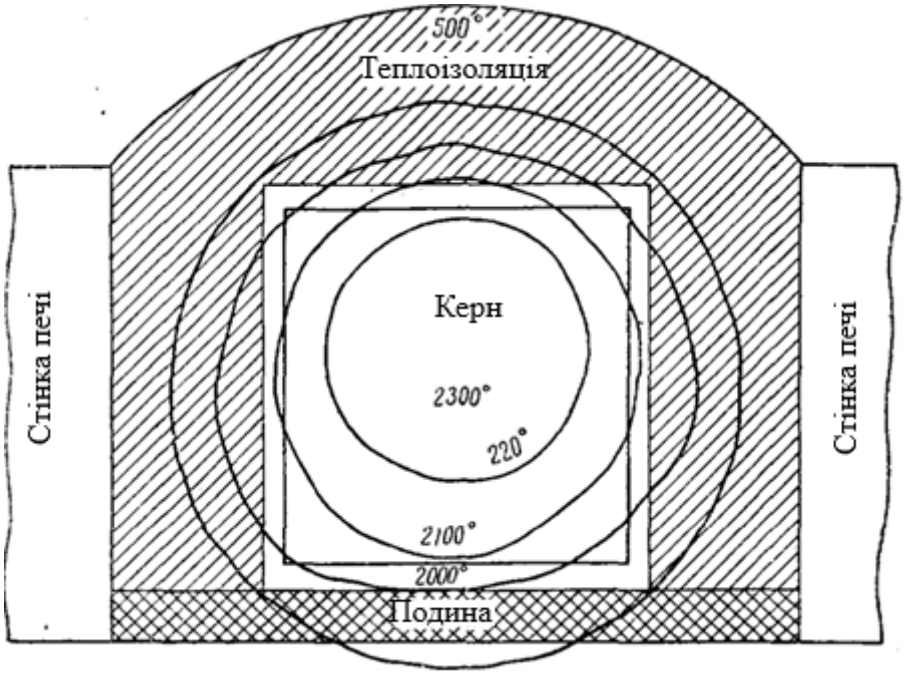


Рисунок 1.11 - Топограма розподілу температур у печі графітації

У сучасних графітувальних печах, крім основного процесу нагріву вуглеграфітових виробів, застосовується каталітична очистка газів, що утворюються під час графітації, на основі інтерметалідних каталізаторів. Ці каталізатори забезпечують ефективне розщеплення та окиснення летких органічних сполук і шкідливих газів, що виділяються з коксових матеріалів, зменшуючи викиди шкідливих речовин у навколишнє середовище. Застосування

інтерметалідних каталізаторів дозволяє підтримувати високі екологічні стандарти виробництва, покращує енергетичну ефективність печей і сприяє більш стабільному процесу графітації, оскільки очищені гази не утворюють нерівномірного термічного навантаження на матеріали, що нагріваються.

Впровадження такої каталітичної очистки особливо актуальне для великих печей, де утворюється значна кількість газів, і дозволяє одночасно забезпечити ефективну роботу печі, знизити ризик утворення дефектів у графітованих виробах та підвищити безпеку виробничого процесу.

2 ДОСЛІДНИЦЬКО-РОЗРАХУНКОВА ЧАСТИНА

2.1 Моделювання деформаційних і реологічних параметрів отримання інтерметалідних сплавів в умовах термохімічного пресування

На основі аналізу наукових досліджень, присвячених моделюванню процесів синтезу інтерметалідних сплавів [18, 19], а також отриманих раніше власних результатів у галузі термохімічного пресування [20, 21], було здійснено спробу встановити ключові закономірності впливу деформації на процеси структуроутворення. Метою такої роботи стало визначення можливих підходів і механізмів керування формуванням структури та властивостей виробів під дією пластичної деформації. Для розв’язання поставленої задачі застосовано метод математичного моделювання, реалізацію якого умовно поділено на кілька основних етапів:

– ідеалізація внутрішніх властивостей досліджуваного процесу та зовнішніх факторів впливу, тобто побудова фізичної моделі;

– математичне формулювання поведінки створеної фізичної моделі та розроблення відповідної математичної схеми;

– вибір методу дослідження математичної моделі та виконання числових розрахунків;

– аналіз отриманих результатів і встановлення основних залежностей.

Під час математичного опису процесу термохімічного пресування необхідно враховувати термокінематичні характеристики реакційного середовища, швидкість переміщення реагентів та макроскопічну щільність матеріалу. Тому разом із кінетичними рівняннями формування інтерметалідної структури, значеннями енергій активації та параметрами хімічного перетворення слід використовувати рівняння реологічних моделей. Це забезпечує можливість проведення чисельних розрахунків кінетичних залежностей основних параметрів пресування продукту високотемпературного синтезу: температури

реакції, ступеня хімічного перетворення, макроскопічної щільності утвореної фази, рівня пружних напружень, швидкості пластичної деформації та розміру зерна кінцевого матеріалу.

Початковим матеріалом для синтезу інтерметалідної фази NiAl є порошкова суміш нікелю й алюмінію, спресована у вигляді брикету та поміщена в закриту прес-форму. Після нагрівання до визначеної температури брикет переходить у режим теплового вибуху, що супроводжується саморозповсюдженням реакції. За наявності зовнішнього тиску матеріал одночасно піддається деформації. Пластична деформація триває до моменту охолодження реакційного продукту до температури Tk, за якої він втрачає пластичність і процес деформації припиняється.

Для математичного опису етапу пресування продукту високотемпературного синтезу необхідно сформулювати систему рівнянь, що враховує просторовий розподіл термокінетичних та реологічних параметрів матеріалу всередині прес-форми. Вважаючи, що процес відбувається в умовах одностороннього стиснення без тертя між продуктом і стінками прес-форми, вихідні рівняння можуть бути записані в такому вигляді:

1. Рівняння нерозривності [18]:

$$\frac{\partial(\rho\rho_1)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho\rho_1 V)}{\partial z} = 0. \tag{2.1}$$

2. Рівняння руху [18]:

$$\rho\rho_1\left(\frac{\partial V}{\partial t} + V\frac{\partial V}{\partial z}\right) = \frac{\partial \sigma_{zz}}{\partial z} \tag{2.2}$$

з реологічними співвідношеннями

$$\sigma_{zz} = \left(\frac{4}{3}\mu + \xi\right)\frac{\partial V}{\partial z}, \tag{2.3}$$

$$\sigma_{rr} = \sigma_{\theta\theta} = \left(-\frac{2}{3}\mu + \xi\right)\frac{\partial V}{\partial z}\,. \qquad (2.4)$$

де ρ – відносна щільність;

ρ_1 – щільність конденсованої фази;

t – час;

V – швидкість зв'язкової течії;

z – осьова координата;

$\sigma_{rr}, \sigma_{\theta\theta}, \sigma_{zz}$ – радіальне, тангенціальне та осьове напруження;

μ, ξ – зсувна і об'ємна в'язкість.

Передбачається, що розподіл відносної щільності в початковій порошковій суміші є однорідним:

$$\rho(z, 0) = \rho_u.$$

У разі, коли щільність продукту синтезу відрізняється від щільності початкової порошкової суміші, можна записати:

$$\rho_1 = \frac{\rho_1\rho_1}{\alpha\rho_c + (1-\alpha)\rho_f},$$

де ρ_c – початкова щільність суміші:

$$\rho_c = \frac{\rho_{Ni}\rho_{Al}}{\rho_{Ni}(1-c_0) + \rho_{Al}c_0},$$

де ρ_{Ni} – щільність нікелю;

ρ_{Ni} – щільність алюмінію;

ρ_c – щільність продукту реакції, що утворюється;

α – глибина хімічного перетворення інтерметаліду в процесі синтезу;

c_0 – відносна масова концентрація нікелю в початковій бінарній порошковій суміші.

Глибина хімічного перетворення визначається як:

$$\frac{da}{dt} = f(\alpha)k_0 exp\left(-\frac{E}{RT}\right),$$

де $f(\alpha)$ – кінетичний закон;

k_0 – передекспоненційний множник;

E – енергія активації хімічної реакції.

Згідно з роботою [19], кінетичний закон хімічної взаємодії інтерметалідної системи можна представити у вигляді:

$$f(\alpha) = (1 - \mu\alpha)(1 - \alpha)^{1-1/n}$$

де μ – коефіцієнт складу суміші, рівний відношенню коефіцієнта при легкоплавкому компоненті в стехіометричному рівнянні реакції до молярного коефіцієнта при цьому компоненті в суміші;

$n = 1,2,3$ – залежно від того, одно-, дво- або тривимірний фронт реакції переміщається всередину тугоплавкої частинки.

Залежність зсувної та об'ємної в'язкості продукту синтезу від його щільності має вигляд:

$$\mu(\rho) = \mu_1 \rho^m, \qquad \xi(\rho) = \frac{4}{3}\mu(\rho)\frac{\rho}{1-\rho} \tag{2.5}$$

де $\mu_1 = \mu_0 \exp\left(\frac{U}{RT}\right)$ – в'язкість нестискаючої основи матеріалу;

μ_0, U – фізичні константи;

R – універсальна газова стала;

T – температура суміші;

m – показник ступеня.

3. Рівняння теплопровідності:

$$c_1\rho\rho_1\left[\frac{\partial(\rho T_1)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho V T_1)}{\partial t}\right]=\frac{\partial}{\partial z}\left[\lambda(\rho)\frac{\partial T_1}{\partial t}\right]+\rho\rho_1 Q\frac{\partial\alpha}{\partial t}-\frac{2\chi_i}{r_i}(T_i-T_0), \quad (2.6)$$

де T_i – температура матеріалу в матриці (i = 1) і у прес-формі (i = 2);

$\lambda(\rho)$ – залежність від щільності теплопровідності матеріалу;

χ_i – ефективний коефіцієнт теплопередачі;

r_i – радіус перерізу матриці;

$c_s = c_{Ni}c_0 + c_{Al}(1-c_0)$ – теплоємність вихідної суміші;

Q – тепловий ефект реакції утворення інтерметаліду NiAl;

T_0 – початкова температура.

Для опису процесу пресування інтерметалідного продукту синтезу в режимі теплового вибуху були зроблені такі допущення:

– Нагрівання і охолодження реагуючої порошкової системи в робочому просторі прес-форми протікають без температурного градієнта;

– продукт синтезу деформується в однорідно-напруженому стані;

– напруження на верхній межі початкового пресування за абсолютною величиною дорівнює силі пресування.

Таким чином, використовуючи рівняння (2.1) і співвідношення (2.2), (2.3), зміну щільності реагуючої в прес-формі порошкової системи можна записати у вигляді:

$$\frac{\partial(\rho\rho_1)}{\partial t}=\frac{\rho\rho_1 N}{{}^4/_3\mu+\xi} \quad (2.7)$$

де N – величина прикладеного тиску.

А рівняння теплового балансу продукту синтезу, з урахуванням ряду припущень, може набути такого вигляду:

$$c_1\rho\rho_1\frac{\partial T}{\partial t} = \rho\rho_1 Q_{NiAl}\frac{\partial \alpha}{\partial t} - \chi_i\frac{S}{V}(T - T_0), \quad (2.8)$$

де S – загальна площа внутрішньої поверхні прес-форми;

V – об'єм прес-форми.

Рівняння (2.7) та (2.8) дозволяють провести кількісну оцінку параметрів процесу термохімічного пресування синтезованого під тиском інтерметалідного сплаву. Процес формування структури в синтезованому під тиском продуктів розглядається в припущенні, що початковий розмір зерна відповідає розміру початкових частинок тугоплавкого компоненту (нікелю), тобто $D_0 = D_{Ni}$ (D_0 – діаметр частинки нікелю).

Кінетика зростання зерен в результаті рекристалізації синтезованого інтерметалідного продукту оцінюється з рівняння [19]:

$$\frac{\partial D}{\partial t} = \frac{K(T_1)}{D^h}, \quad (2.9)$$

де D – початковий розмір (діаметр) зерна;

$K = k_0\exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right)$ – залежна від температури константа;

k_0 – передекспонентний множник;

E_a – енергія активації зростання зерна;

h – показник ступеня, за величиною близький до 1.

Величина деформації синтезованого продукту при пресуванні визначається з рівняння:

$$\varepsilon = \frac{r_1^2 - r_2^2}{r_1^2}. \quad (2.10)$$

Залежність розміру зерна синтезованого продукту від ступеня його деформації при пресуванні описується емпіричним співвідношенням:

$$D_\varepsilon = \frac{D}{\sqrt[3]{A\left(\frac{\varepsilon}{\varepsilon_{\text{кр}}}\right)^2}}, \tag{2.11}$$

де $\varepsilon_{\text{кр}}$ – ступінь деформації, при якому відбувається утворення зародку рекристалізації ($\varepsilon_{\text{кр}} \approx 0{,}1$);

A – коефіцієнт форми перетину початкового зерна ($4\pi/3 < A < 6$).

Кількісну оцінку розміру зерна в інтерметалідному продукті синтезу після пресування можна провести, скориставшись рівнянням теплового балансу (2.8) і провівши в (2.9) заміну похідної за годиною на похідну по температурі.

Таким чином, провівши необхідні перетворення, для кінцевого розміру зерна інтерметалідних продуктів при термохімічному пресуванні можна записати:

$$D_k = \sqrt{D_\varepsilon^2 + \frac{c\rho_0\rho_c r_2 R T_{ad}^2}{\chi_2 E_a (T_{ad} - T_0)} k_0 \exp\left(-\frac{E}{RT_{ad}}\right)}. \tag{2.12}$$

З рівняння (2.12) видно, що кінцевий розмір зерна в продукті пресування залежить від розміру зерна синтезованого в прес-формі продукту D_0, ступеня деформації ε синтезованого продукту при пресуванні, адіабатичні температури синтезу T_{ad} і швидкості його охолодження (залежить від температури прес-форми T_0, радіуса його поперечного перерізу r_2 і коефіцієнта теплообміну χ_2 синтезованого продукту зі стінками прес-форми).

Теорія Холла-Петча подіє таку залежність величини короткочасної границі текучості матеріалу $\sigma_{0,2}$ від величини зерна d і товщини ламелей при сегреації фаз [12]:

$$\sigma = \sigma_0 + \frac{k_d}{\sqrt{d}} \tag{2.13}$$

де σ_0 – межа плинності текстурованого матеріалу;

k_d – константа матеріалу.

Механічні властивості дворівневої структури можна поліпшити при переході параметрів структурно-фазової сегреації d з мікронного на нанорозмірний рівень. Крім термічних умов, параметри сегреації оптимізуються введенням модифікуючих легуючих домішок, що впливають на значення коефіцієнтів k_d. Найкращий результат досягається при спільній дії цих факторів.

$$\sigma_{Ni_3Al} = \sigma_0 + \frac{k_d}{\sqrt{d}} = 437 + \frac{0{,}91}{\sqrt{25 \cdot 10^{-6}}} = 620 \text{ МПа;} \quad (2.14)$$

$$\sigma_{NiAl_3} = \sigma_0 + \frac{k_d}{\sqrt{d}} = 431 + \frac{0{,}91}{\sqrt{104 \cdot 10^{-6}}} = 520 \text{ МПа.} \quad (2.15)$$

Теоретичні вищезазначені розрахунки були проведені за допомогою моделі Холла-Петча, показали, що отримання сплаву Ni_3Al з наноструктурами ламелей має граничну міцність до 620 МПа, що більше на 100 більше, ніж у сплаві $NiAl_3$.

2.2 Особливості реакційних перетворень інтерметалідних Ni-Al сплавів

Для визначення теплового ефекту і енергії активації реакції в околиці розрахункової точки необхідно враховувати схеми хімічних реакцій, відповідно до яких утворюються і розкладаються інтерметалідні з'єднання (металеві фази). Діаграма стану системи компонентів суміші дозволяє досить просто визначати відповідну фазу продукту реакції за поточною температурі і стехіометрії складу компонент в околиці розрахункової точки (по відносній масовій частці компонент). Для утворення кожної фази продукту реакції експериментально визначені значення необхідної енергії активації і теплового ефекту реакції. Наприклад, в бінарній системі Ni-Al утворюються чотири інтерметалідних з'єднання: $NiAl_3$ (β-фаза, E_β = 15 ккал/моль),Ni_2Al_3 (γ-фаза, E_γ = 18 ккал/моль), NiAl (δ-фаза, Eδ = 22 ккал/моль) і Ni_3Al (ε-фаза, E_ε = 30 ккал/моль). Дві фази

утворюють тверді розчини на основі Al и Ni – відповідно α-фаза і ζ-фаза. Відповідно до діаграмою стану системи Ni–Al, яка представлена в джерелах [23, 24], з'єднання Ni_2Al_3 и Ni_3Al характеризуються відносно вузькими областями гомогенності, NiAl – широкої, а фаза $NiAl_3$ відповідає формальному складу. Утворення і розпад фаз з урахуванням теплових ефектів реакції згідно діаграмі стану наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Реакційна дифузія в системі

Металохімічна реакція	Температурний діапазон реакції
Утворення фаз	
$Al + 3Ni \rightarrow Ni_3Al + 37{,}6$ ккал	$T_{Al} \leq T < T_{\varepsilon}$, $T_{\varepsilon} = 1380$ ℃
$2Al + Ni_3Al \rightarrow 3NiAl + 46{,}7$ ккал	$T_{Al} \leq T < T_{\delta}$, $T_{\delta} = 1638$ ℃
$Al + 2NiAl \rightarrow Ni_2Al_3 - 15{,}4$ ккал	$T_{Al} \leq T < T_{\gamma}$, $T_{\gamma} = 1132$ ℃
$3Al + Ni_2Al_3 \rightarrow 2NiAl_3 + 13{,}8$ ккал	$T_{Al} \leq T < T_{\beta}$, $T_{\beta} = 854$ ℃
Розпад фаз	
$Ni_3Al \rightarrow NiAl + 2Ni - 9{,}5$ ккал	$T \geq T_{\varepsilon}$
$NiAl \rightarrow Ni + Al - 28{,}1$ ккал	$T \geq T_{\delta}$
$Ni_2Al_3 \rightarrow 2NiAl + Al + 15{,}4$ ккал	$T \geq T_{\gamma}$
$2NiAl_3 \rightarrow Ni_2Al_3 + 3Al - 13{,}8$ ккал	$T \geq T_{\beta}$

Фази $NiAl_3$, Ni_2Al_3 та Ni_3Al утворюються за перитектичними реакціями, тобто при нагріванні розкладаються по схемам [24]:

$$NiAl_3 \xrightarrow{854\,℃} \text{ж} + \gamma(Ni_2Al_3),$$
$$Ni_2Al_3 \xrightarrow{1132\,℃} \text{ж} + \delta(NiAl),$$
$$Ni_3Al \xrightarrow{1380\,℃} \text{ж} + \delta(NiAl),$$

Аналіз мікроструктури шару продуктів взаємодії свідчить про складний і багатостадійний характер процесів, що розвиваються на межі розділу компонентів. На сьогодні не існує універсальної теорії, яка б повністю описувала механізми дифузійної взаємодії між твердою та рідкою фазами металів.

У роботі [14] запропоновано підхід, що описує кінетику росту інтерметалідних фаз у межах мезорівня. Модель ґрунтується на низці припущень, які спрощують опис процесу, а саме:

- формування інтерметалідів контролюється дифузією компонента з меншою швидкістю переміщення;
- на межах між фазами швидко встановлюється локальна термодинамічна рівновага, тобто процес має переважно дифузійний характер;
- зміною дифузійних коефіцієнтів залежно від концентрації нехтують;
- вплив міжфазного поверхневого натягу та термопружних ефектів не розглядається.

У разі узгодження теплових процесів синтезу із динамічним ущільненням продукту синтезу можливо отримати компактний інтерметалідний матеріал із дрібнодисперсною структурою. Розмір зерен у такому сплаві є значно меншим порівняно зі структурами, сформованими під час традиційного лиття, спікання або ударно-хвильового впливу. Зменшення зернистості під час синтезу під тиском обумовлене поєднанням інтенсивної пластичної деформації та великих швидкостей охолодження.

Синтез інтерметалідного сплаву δ-NiAl із порошкової суміші нікелю й алюмінію в умовах термохімічного пресування в режимі теплового вибуху навіть за мінімального зовнішнього тиску дозволяє отримати продукт із середнім розміром зерна близько 29 мкм. Подальше підвищення ступеня пластичної деформації синтезованого матеріалу, особливо за умов інтенсивної пластичної деформації, відкриває можливість істотно (на порядок) зменшити розмір зерен і навіть сформувати в інтерметалідному сплаві субмікрокристалічну структуру.

Таким чином були інтегровані такі вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{\text{ад}}(NiAl) = 1911$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{NiAl} = 5870$ кг/м^3, $c_{NiAl} = 600 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot$ К, $E_a(NiAl) = 92{,}048 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$, $D_{Ni} = 100$ мкм.

За результатами розрахунку були отримані наступні дані:

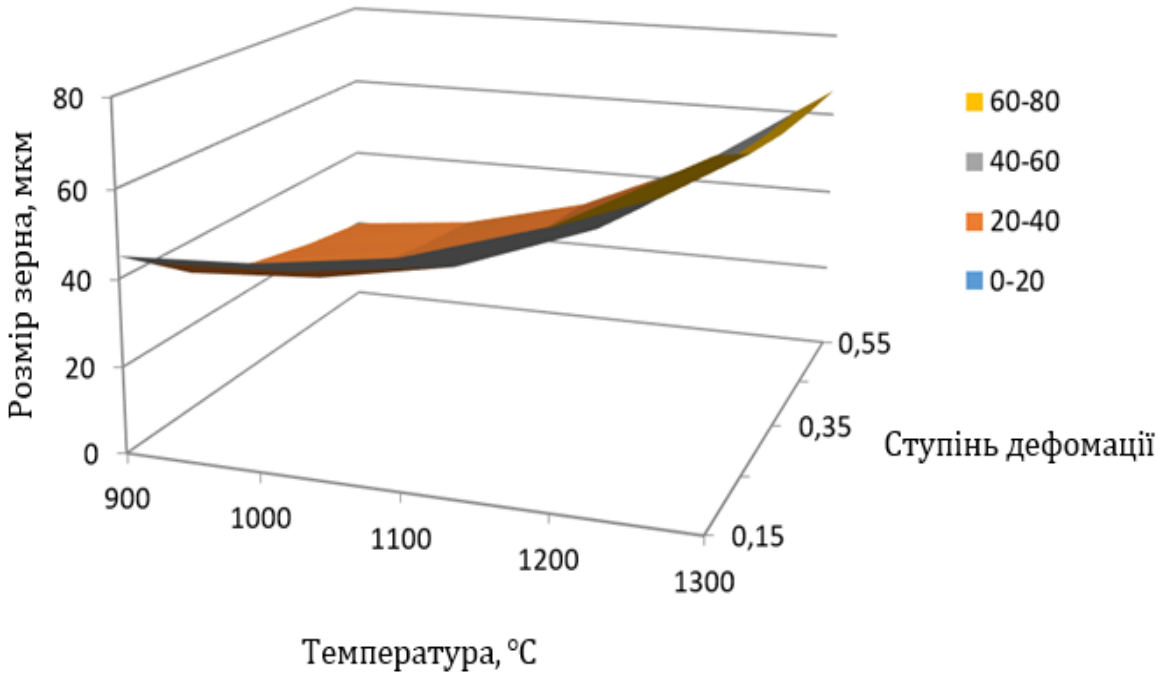


Рисунок 2.1 – Графік залежності кінцевого розміру зерна інтерметаліду NiAl від температури та ступеню його деформації

Високотемпературний синтез інтерметалідного сплаву $\gamma - Ni_2Al_3$ в порошковій суміші чистих елементів в умовах термохімічного пресування при тепловому вибуху при мінімальному зовнішньому тиску на суміш дозволяє

отримати інтерметалідний продукт синтезу із середнім розміром зерна ~55 мкм. Збільшення ступеня пластичної деформації синтезованого під тиском інтерметалідного продукту в умовах інтенсивної пластичної деформації дозволить на порядок знизити розмір зерна в кінцевому продукті і навіть сформувати в інтерметалідному сплаві субмікрокристалічну зернисту структуру.

Таким чином були інтегровані такі вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{ад}(Ni_2Al_3) = 1405$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{Ni_2Al_3} = 4770$ кг/м^3, $c_{Ni_2Al_3} = 726 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot$ К, $E_a(Ni_2Al_3) = 75{,}312 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$, $D_{Ni} = 100$ мкм.

За результатами розрахунку були отримані наступні дані:

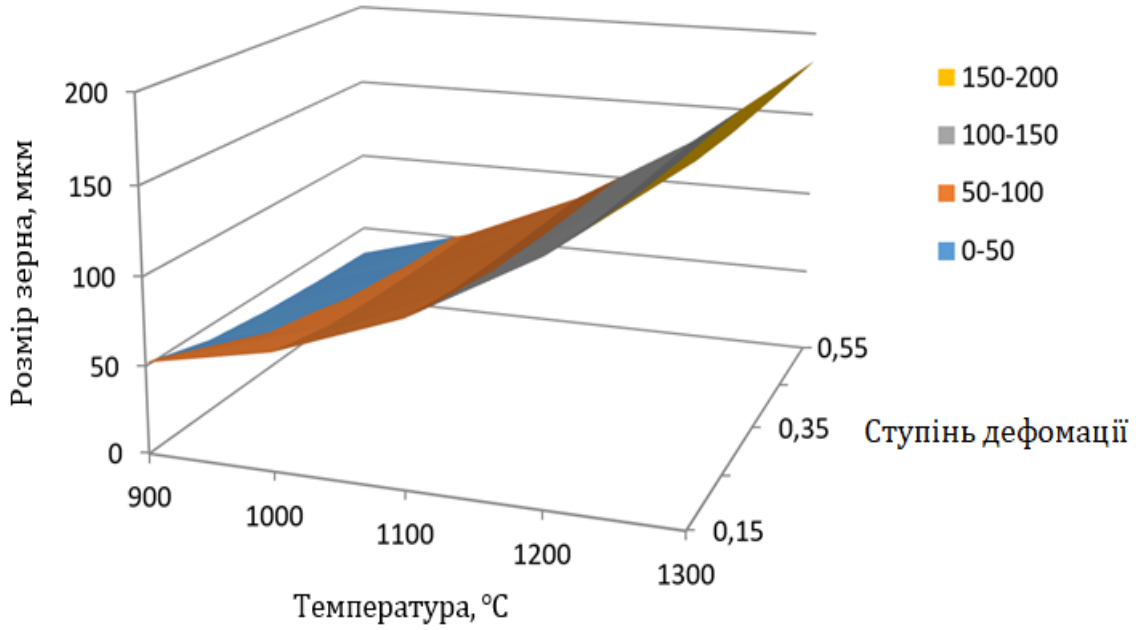


Рисунок 2.2 – Графік залежності кінцевого розміру зерна інтерметаліду Ni_2Al_3 від температури та ступеню його деформації.

Високотемпературний синтез інтерметалідного сплаву $\beta - NiAl_3$ в порошковій суміші чистих елементів в умовах термохімічного пресування при тепловому вибуху при мінімальному зовнішньому тиску на суміш дозволяє отримати інтерметалідний продукт синтезу із середнім розміром зерна ~104 мкм. Збільшення ступеня пластичної деформації синтезованого під тиском інтерметалідного продукту в умовах інтенсивної пластичної деформації

дозволить на порядок знизити розмір зерна в кінцевому продукті і навіть сформувати в інтерметалідному сплаві субмікрокристалічну зернисту структуру.

Таким чином були інтегровані такі вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{ад}(NiAl_3) = 1127$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{NiAl_3} = 3960$ кг/м^3, $c_{NiAl_3} = 508 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot$ К, $E_a(NiAl_3) = 62{,}760 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$, $D_{Ni} = 100$ мкм.

За результатами розрахунку були отримані наступні дані:

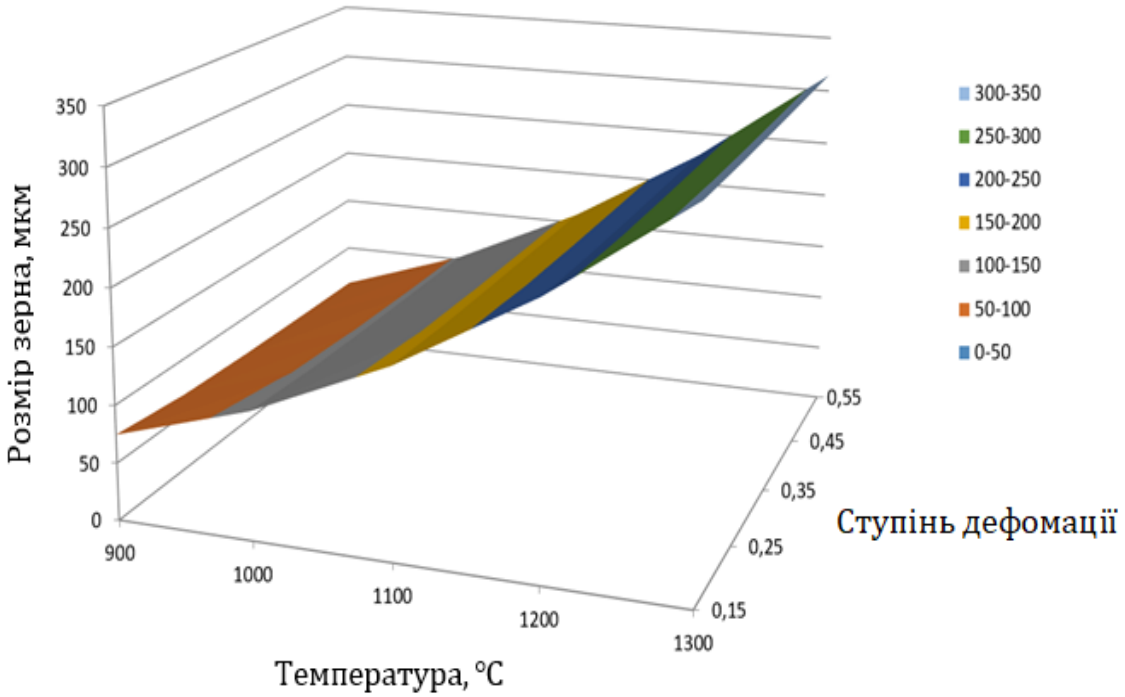


Рисунок 2.3 – Графік залежності кінцевого розміру зерна інтерметаліду $NiAl_3$ від температури та ступеню його деформації.

Високотемпературний синтез інтерметалідного сплаву $\varepsilon - Ni_3Al$ в порошковій суміші чистих елементів в умовах термохімічного пресування при тепловому вибуху при мінімальному зовнішньому тиску на суміш дозволяє отримати інтерметалідний продукт синтезу із середнім розміром зерна ~35 мкм. Збільшення ступеня пластичної деформації синтезованого під тиском інтерметалідного продукту в умовах інтенсивної пластичної деформації

дозволить на порядок знизити розмір зерна в кінцевому продукті і навіть сформувати в інтерметалідному сплаві субмікрокристалічну зернисту структуру.

Таким чином були інтегровані такі вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{ад}(Ni_3Al) = 1911$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{Ni_3Al} = 7290$ кг/м^3, $c_{Ni_3Al} = 644 \frac{Дж}{кг} \cdot К$, $E_a(Ni_3Al) = 125{,}520 \frac{кДж}{моль}$, $D_{Ni} = 100$ мкм.

За результатами розрахунку були отримані наступні дані:

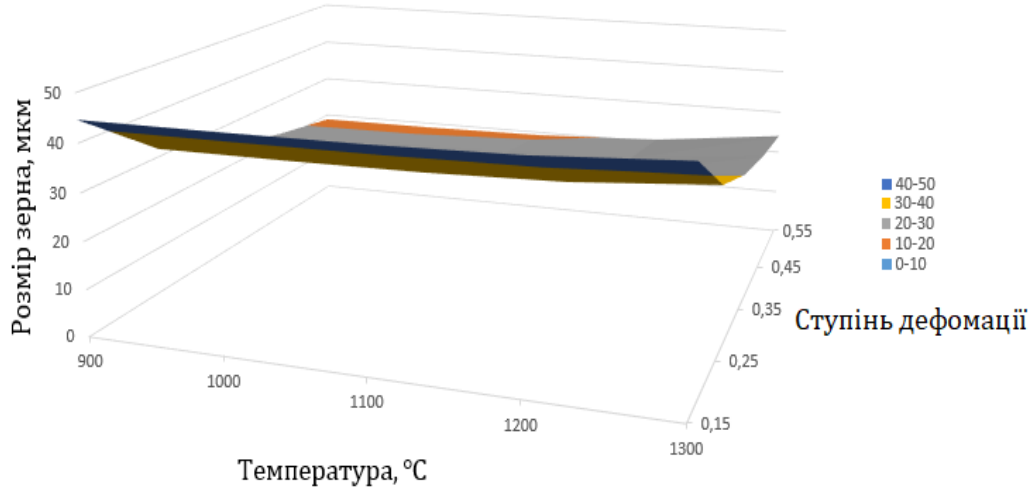


Рисунок 2.4 – Графік залежності кінцевого розміру зерна інтерметаліду Ni_3Al від температури та ступеню його деформації

2.3 Комп'ютерне моделювання процесів деформації

Комп'ютерне моделювання процесів гарячої деформації інтерметалідних $\delta - NiAl$ сплавів виконане з використанням програмного комплексу DEFORM.

Програма DEFORM – потужна система моделювання технологічних процесів, призначена для аналізу тривимірної поведінки металу при різних процесів обробки тиском. Програма заснована на методі кінцевих елементів, одному з найвідоміших, надійних і використовуваних у даний час розрахункових методів. Автоматичний сітковий генератор дозволяє будувати оптимізовану кінцево-елементну сітку, згущаючи її у найбільш критичних зонах. Крім того, програма надає важливу інформацію про перебіг матеріалу та розподіл

температур під час процесу деформування, дозволяє моделювати повний перелік процесів обробки металів тиском і вирішувати завдання деформування і теплопередачі.

Таким чином, для першого експерименту були інтегровані такі вихідні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{\text{ад}}(NiAl_3) = 1127$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{NiAl_3} = 3960$ кг/м^3, $c_{NiAl_3} = 508 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot$ К, $E_a(NiAl_3) = 62{,}760 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$, $D_{Ni} = 100$ м.

Для другого експерименту були інтегровані наступні дані: $H_0 = 50$ мм, $r_1 = 25$ мм, $r_2 = 15$ мм, $T_{\text{ад}}(Ni_3Al) = 1911$ К, $T_0 = 300$ К, $\rho_0 = 0{,}6$, $\rho_{Ni} = 8907$ кг/м^3, $\rho_{Al} = 2700$ кг/м^3, $\mu = 0{,}14$, $\rho_{Ni_3Al} = 7290$ кг/м^3, $c_{Ni_3Al} = 644 \frac{\text{Дж}}{\text{кг}} \cdot$ К, $E_a(Ni_3Al) = 125{,}520 \frac{\text{кДж}}{\text{моль}}$, $D_{Ni} = 100$ мкм.

Всього в моделюванні брали участь чотири об’єкти: заготовка, контейнер , матриця і пуансон.

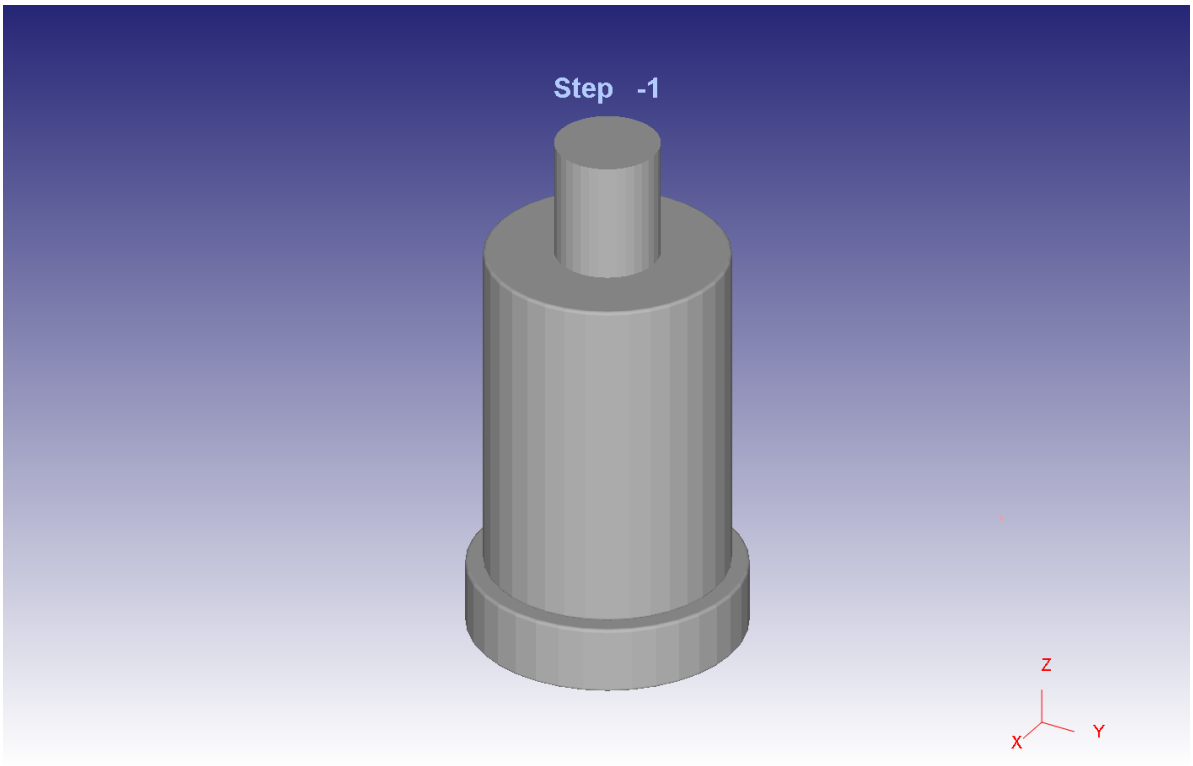
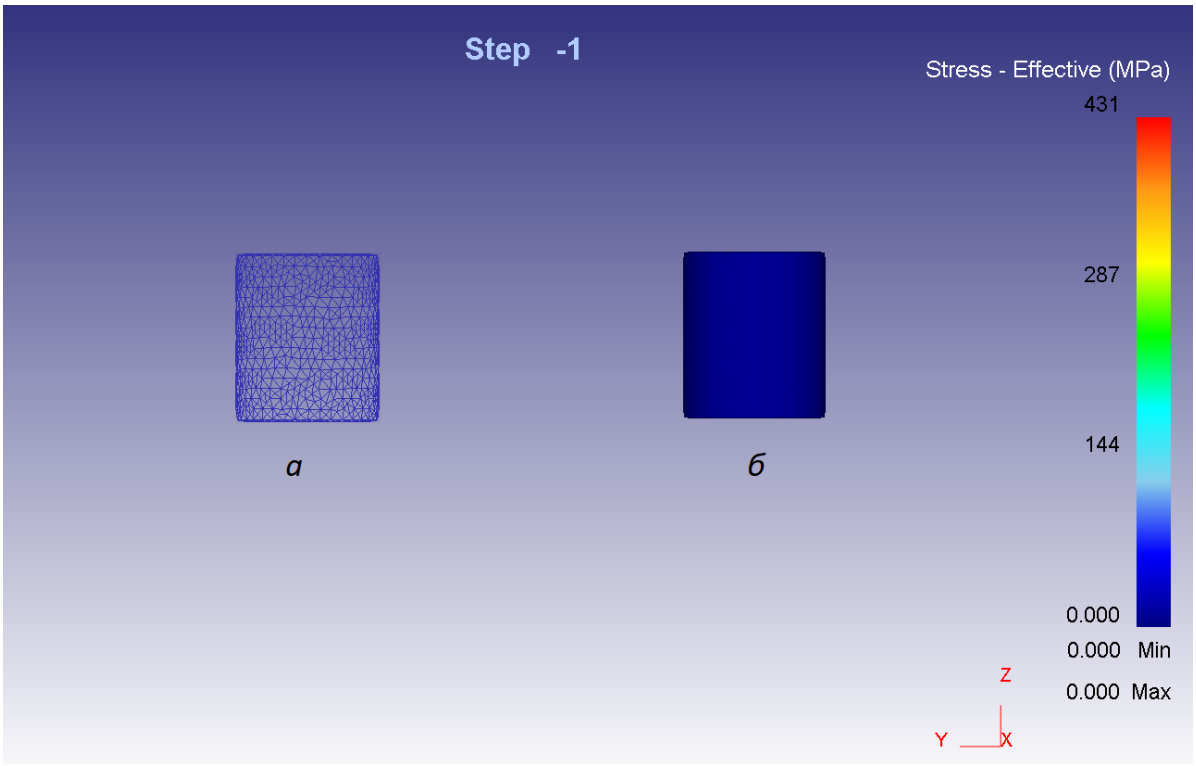


Рисунок 2.5 – Загальний вид преса для пресування у системі моделювання технологічних процесів DEFORM

Кінченно-елементна сітка складалася з 10000 елементів. При виборі співвідношення розмірів найбільшого та найменшго елементів керувалися припущення, що дефомація і напруга усередині заготовки розташовуються достатньо однорідно і можуть бути описані достатньо грубо. Водночас заготовки мають бути описані з певною точністю для порівняння формоутворення при математичному розрахунку з реальним випробуванням.

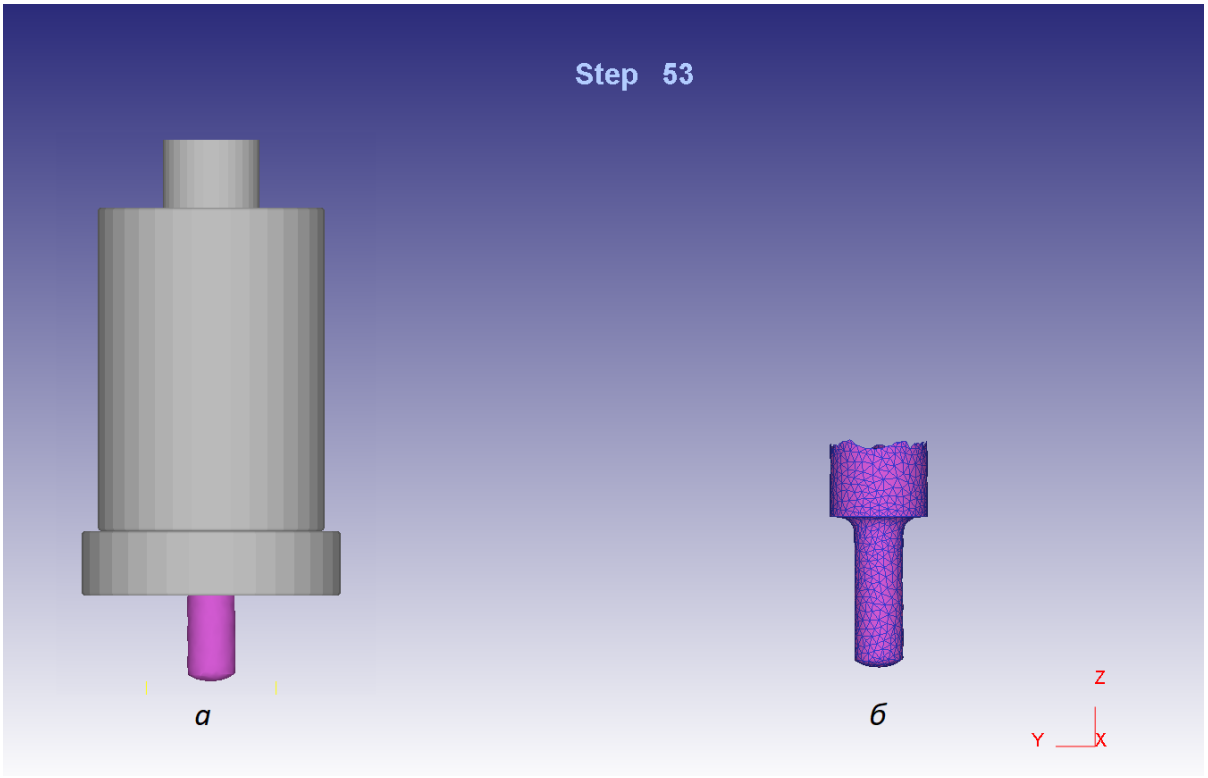


а – схема звичайно-елементної моделі заготовки; б – віртуальна модель;

Рисунок 2.6 – Звичайно-елементна модель заготовки використовувана при моделюванні термохімічного пресування інтерметалідних сплавів

Як модельований матеріал розглядалися інтерметалідні $\varepsilon - Ni_3Al$ та $\beta - NiAl_3$ сплави. Необхідні значення опору деформації завдавалися залежно температури 1000 °С та швидкості деформації – 0,1 і 1,0 $с^{-1}$, отримані в результаті фізичного моделювання експериментально на комплексі Gleeble-3800 . Цей комплекс являє собою високошвідкісний пластометр з можливістю регулювання швидкості, часу і температури нагріву зразків. А також керування швидкістю її охолодження, ступенем та швидкістю деформації.

У результаті за допомогою розробленої віртуальної моделі була проведена імітація пластичної деформації інтерметалідного продукту високотемпературного синтезу в процесі пресування. За результатами числового розрахунку був проведений аналіз температурних полів, напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів процесу.



а – загальний вид преса у процесі деформації; *б* – заготовка, що деформується пресом

Рисунок 2.7 – Початок деформації заготовки у системі моделювання технологічних процесів DEFORM

Процес супроводжується дією всебічного стиснення, яке забезпечує матеріалу найкращі пластичні властивості за даних умов. Під впливом цих стискаючих напружень матеріал переміщується у напрямку найбільшого градієнта напружень — від зони під пуансоном, де їх величина максимальна, до калібру матриці.

Хоча всебічне, але нерівномірне стиснення створює сприятливі умови для підвищення пластичності порівняно з іншими методами обробки тиском, ця перевага проявляється лише за умов значної неоднорідності деформацій. У

реальному процесі в різних ділянках об’єму деформованого матеріалу можуть виникати не лише стискаючі напруження, які поступово зменшуються в напрямку пресування, але й напруження іншої природи.

Різниця між перерізами контейнера та калібром матриці, а також дія контактного тертя та низки супутніх факторів призводять до того, що частинки матеріалу рухаються не лише уздовж напрямку головної деформації, але й у поперечних напрямках. Такі складні траєкторії переміщення, що мають різну довжину та супроводжуються зміною швидкості руху частинок у різних зонах, спричиняють появу локальних додаткових напружень різного знаку й величини. В окремих ділянках це може викликати навіть розтягуючі напруження, що суперечать основній картині всебічного стискання.

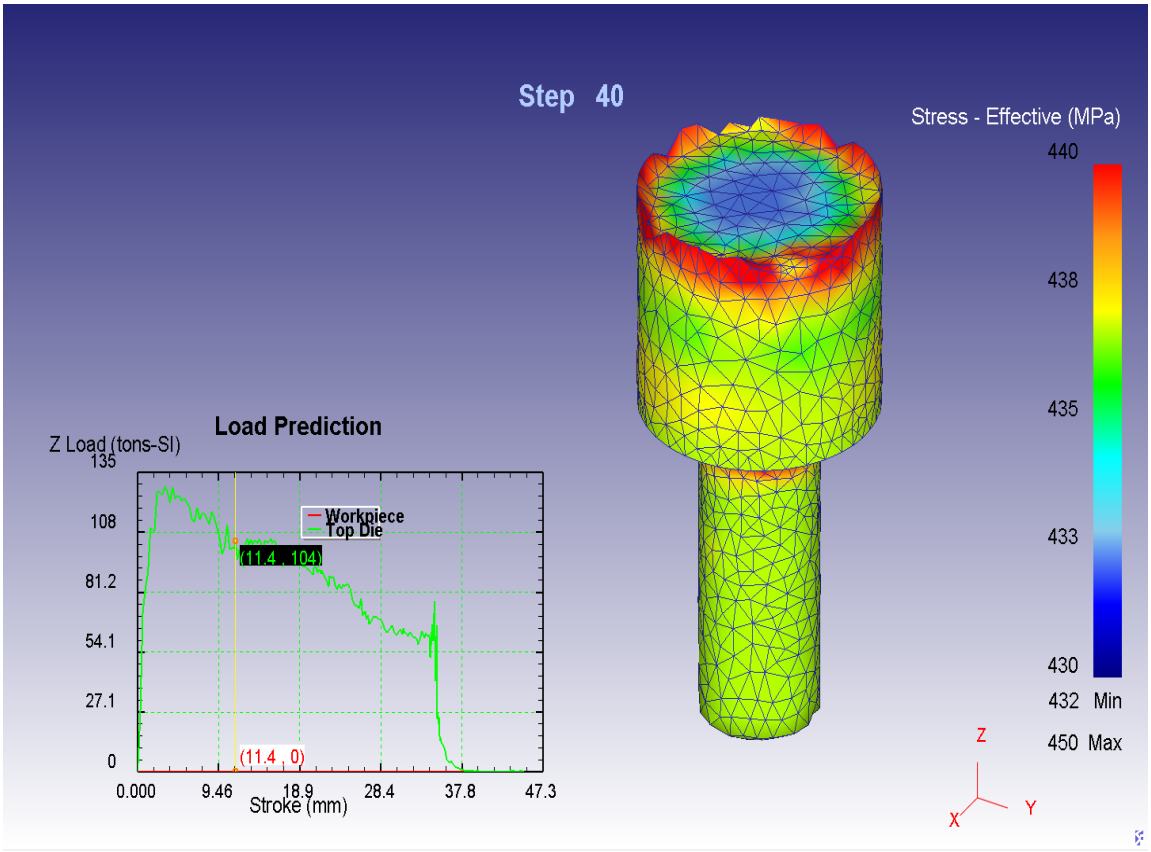


Рисунок 2.8 – Моделювання процесів пресування Ni-Al сплавів

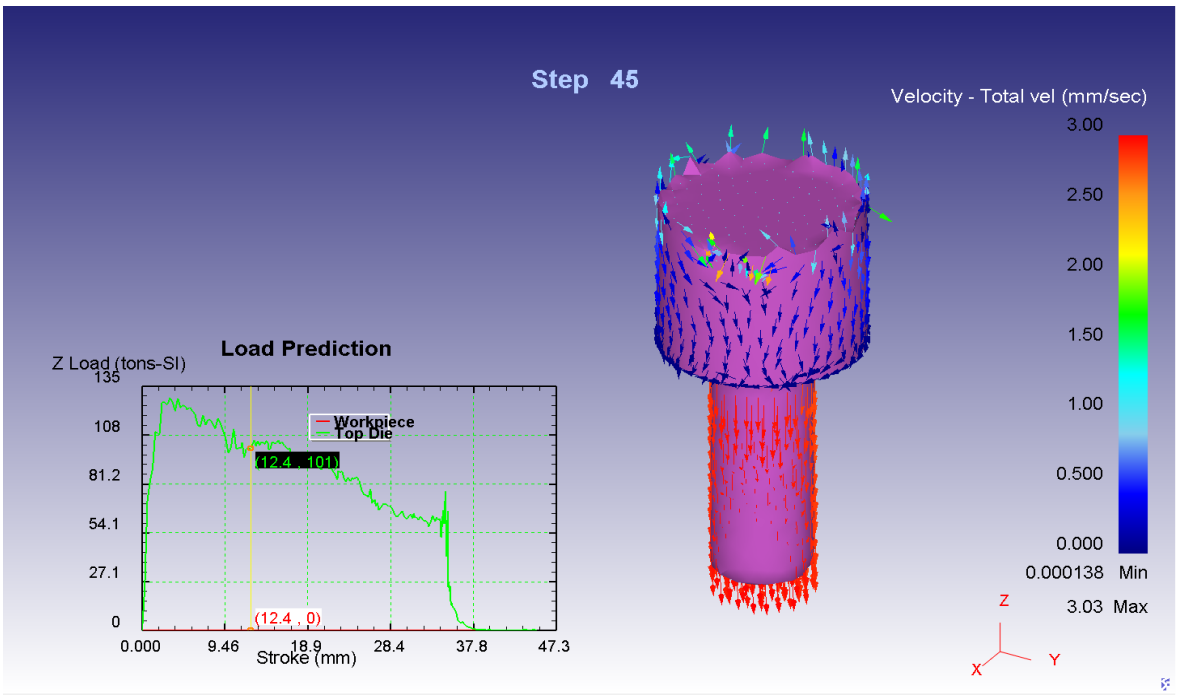


Рисунок 2.9 – Напрямок течії інтерметалідного Ni-Al сплаву при пресуванні

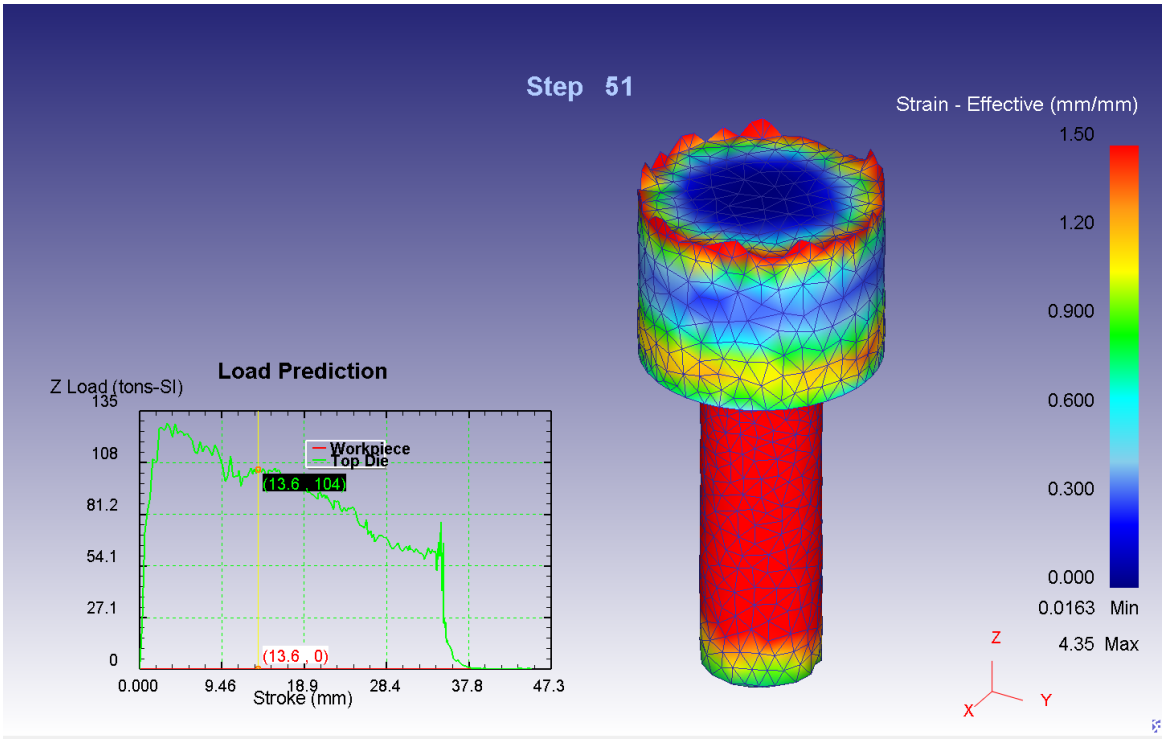


Рисунок 2.10 – Інтенсивність деформації інтерметалідного Ni-Al сплаву при пресуванні

2.4 Висновки до розділу

Пластична деформація є ефективним інструментом не лише для формування дрібнозернистих напівфабрикатів, а й для цілеспрямованого керування параметрами пластинчастої мікроструктури в інтерметалідних сплавах. Особливе значення це має під час отримання структур із малим розміром колоній та нанокристалічною міжпластинчатою відстанню, які, згідно з даними сучасної наукової літератури, демонструють найбільший практичний інтерес у контексті підвищення експлуатаційних властивостей матеріалів.

Процес подрібнення зерна інтерметалідного сплаву під час його синтезу під дією тиску зумовлюється поєднанням інтенсивної пластичної деформації новоутвореного продукту реакції та високих швидкостей охолодження. Встановлено, що підвищення ефективності цього процесу можливе за умов застосування інтенсивної пластичної деформації безпосередньо в ході формування зерен під час високотемпературного синтезу сплаву під тиском. Це забезпечує значно активніше руйнування первинних структурних блоків і формування тонкодисперсної мікроструктури.

Теоретичні оцінки, виконані з використанням моделі Холла-Петча, підтвердили перспективність такого підходу. Зокрема, для сплаву Ni_3Al із нанорозмірними ламелями було отримано прогнозовану граничну міцність на рівні близько 620 МПа, що приблизно на 100 МПа перевищує міцність сплаву $NiAl_3$. Це свідчить про значний потенціал керування мікроструктурою для підвищення механічних характеристик інтерметалідних матеріалів.

Узагальнюючи викладене, слід відзначити, що розроблений концептуальний підхід і запропонована математична модель дають змогу описувати не лише макроструктуру синтезованого матеріалу, а й відтворювати тонкі особливості хвильової динаміки процесу горіння. Модель комплексно поєднує задачу теплопровідності, кінетику хімічної взаємодії реагентів з урахуванням неоднорідності міжфазної поверхні, схему реакцій утворення та розпаду інтерметалідних фаз відповідно до діаграми стану системи, а також

рівняння дифузійної взаємодії, що описують кінетику росту інтерметалідних шарів у процесі саморозповсюджувального високотемпературного синтезу.

На основі розробленої віртуальної моделі в програмному середовищі DEFORM було проведено імітаційне моделювання пластичної деформації продукту високотемпературного синтезу в процесі пресування. Чисельні результати дали змогу детально проаналізувати температурні поля, напружено-деформований стан матеріалу та енергосилові характеристики процесу деформації, що є важливим для оптимізації технологічних режимів обробки тиском.

У підсумку запропоновано й реалізовано математичну модель, орієнтовану на отримання Ni–Al інтерметалідних сплавів із заданою структурою та комплексом властивостей. Вона поєднує результати фізичного моделювання процесу термохімічного пресування з можливостями програмного комплексу DEFORM. Проведений високотемпературний синтез у порошковій суміші чистих елементів за умов термохімічного пресування дозволив отримати інтерметалідний Ni-Al сплав із середнім розміром зерна близько 35 мкм, що підтверджує ефективність запропонованого підходу.

3 ЕКСПЕРИМЕНАЛЬНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСІВ ОТРИМАННЯ ПОРИСТИХ СТРУКТУР

3.1 Устаткування та матеріали для термохімічного пресування

Технологічний процес починається з вибору та підготовки вихідної сировини, оскільки її характеристики безпосередньо впливають на якість кінцевого матеріалу, отриманого в процесі компактування [25].

Як реакційне середовище використовували суміші порошків з дисперсністю 100–200 мкм наступних матеріалів:

1. Al – алюміній марки АСД-4 (ТУ 48-5-226-82);
2. Ni – нікель марки ПНЕ1 (ГОСТ 9722-97).

Підготовка порошкових компонентів до пресування займає важливе місце в загальній схемі виробництва інтерметалідів [26]. Основні операції включають сушку, класифікацію (розсів) та змішування порошків.

Перед змішуванням суміш порошків просушували при температурі 75–120 °С протягом 1–3 годин. Для отримання часток певного розміру порошки піддавали класифікації або розсіву.

Змішування порошків проводили в барабанному млині протягом 2–4 годин, залежно від маси шихти. Співвідношення компонентів визначалося за стехіометричними розрахунками, щоб забезпечити необхідний склад кінцевого інтерметаліду.

Після підготовки ретельно перемішану та зважену реакційну суміш засипали у реактор. Для компактування початкових заготовок застосовувався гідравлічний прес ПСУ-125 (рис. 3.1).

Процес пресування складається з кількох етапів. На підготовчій стадії із суміші порошків у спеціальній прес-формі формували шихтовий брикет. Зусилля пресування становило 70 кН, а швидкість навантаження контролювалася вручну та підтримувалася в межах 1–5 кН/с. Для забезпечення більш рівномірного

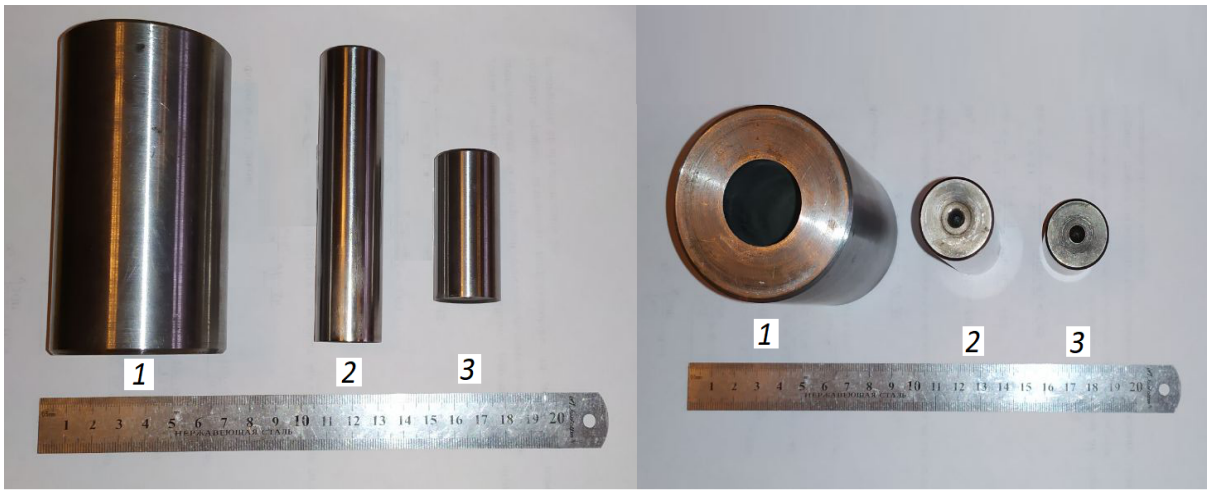
розподілу тиску по всьому об’єму заготівки передбачалася коротка витримка тривалістю близько 20 с [27].



Рисунок 3.1 – Лабораторний прес ПСУ-125



Рисунок 3.2 – Зважені порошки алюмінію і нікелю для подальшого їх пресування на лабораторному пресі ПСУ-125

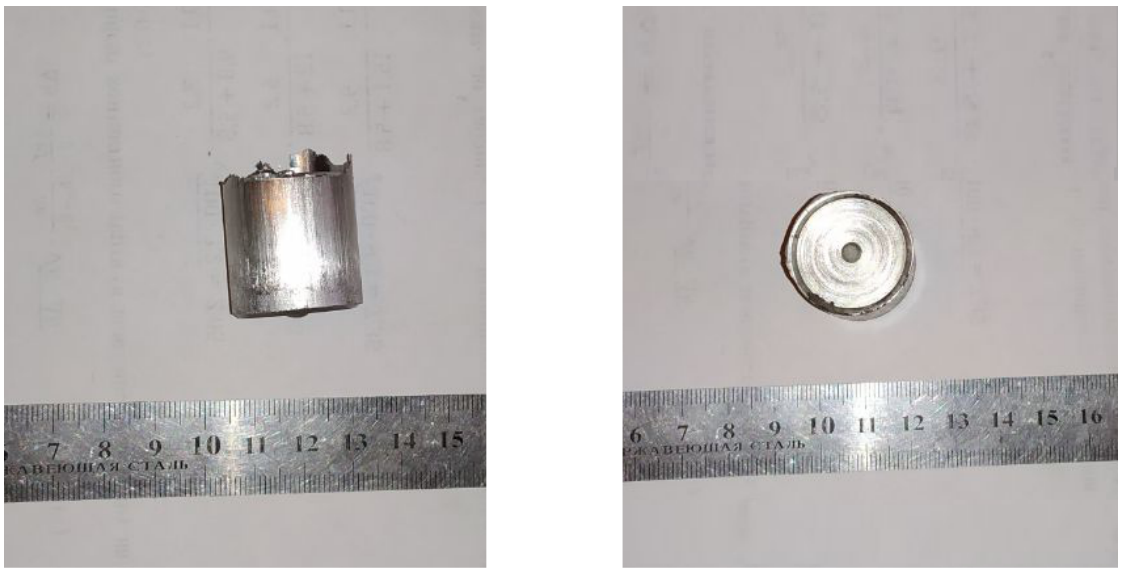


а *б*

1 – контейнер; 2, 3 – пуансон.

а – вид збоку; б – вид зверху.

Рисунок 3.3 – Контейнер і матриці для пресування інтерметалідних порошків на лабораторному пресі ПСУ-125



а *б*

а – вид збоку; б – вид зверху.

Рисунок 3.4 – Інтерметалідний сплав NiAl спресований на лабораторному пресі ПСУ-125



Рисунок 3.5 – Матриця для термохімічного пресування

На другій стадії процесу брикет поміщали в реакційну прес-форму (матрицю для гарячого пресування, показану на рисунку 3.5). Синтез продукту

здійснювався у режимі теплового самозаймання: вихідні реагенти підігрівалися всередині реактора до температури, при якій відбувається самозаймання, яка залежить від складу порошкової суміші.

Для контролю температури під час екзотермічної реакції синтезу інтерметалідів проводили експерименти у тонкостінному сталевому відкритому реакторі, оснащеному двома термопарами типу ВР-5. На початковому етапі роботи із вибраними складами здійснювався підбір режимів синтезу та вдосконалення технології отримання зразків, що забезпечували точність збереження співвідношення компонентів.

Установка для термохімічного пресування складається з кількох основних функціональних систем: реакційного устаткування, системи газозабезпечення, системи контролю та регулювання технологічних параметрів, а також системи утилізації газів.

Реактор оснащений пористою подиною, яка стабілізує рівень реакційної суміші. Для процесу термохімічного пресування використовували реагенти класу «ч» та «чда». Дно реактора виконане у вигляді кришки з вмонтованим вхідним патрубком, що з’єднаний з газовою магістраллю. Для зменшення теплових втрат та надійної фіксації термопар зверху реактор закривали азбестовою кришкою, а нагрів здійснювався в печі шахтного типу. В режимі горіння процес ініціювався електроспіраллю запалювального пристрою.

Система газозабезпечення включає балон з інертним газом (аргон), редуктор, ресивер, вентилі, витратоміри та газову магістраль. Ресивер підтримує стабільну швидкість подачі газу, що дозволяє працювати з кількома реакторами одночасно.

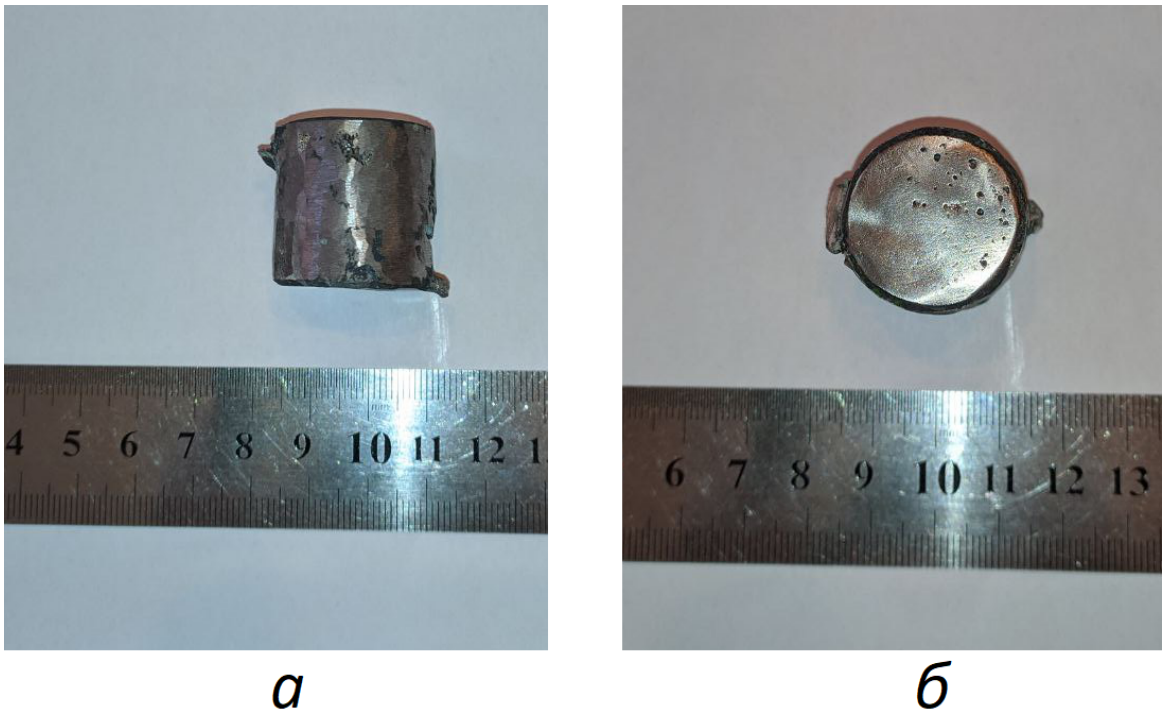
Для термохімічного пресування заготовок застосовувався гідравлічний прес із максимальною силою 1,25 МН. Технологічна схема приготування шихти включала дозування, змішування, заповнення форми, холодне двостороннє пресування, термохімічне пресування та подальшу термічну обробку.

Процес пресування складається з кількох стадій. На підготовчій стадії із суміші вихідних порошків виготовляли шихтовий брикет у спеціальній прес-

формі (рис. 3.4), при цьому діапазон тиску пресування складав 7 МПа, а швидкість навантаження контролювалася вручну в межах 0,1–0,5 МПа/с.

На другій стадії брикет переміщували в реакційну прес-форму для гарячого пресування (рис. 3.5), оснащену теплоізоляцією, яка могла бути виконана з футерувального теплоізоляційного матеріалу або звичайного піску. Ініціація горіння шихтового брикету відбувалася у режимі самозаймання шляхом попереднього нагріву до температури початку самозаймання. Час проходження хвилі горіння через шихтову заготовку відповідав часу синтезу t_r = 0,5-15 с.

Після завершення горіння проводилося додаткове пресування (компактування) та витримка під тиском протягом t_k = 3-120 с для забезпечення ущільнення матеріалу та відводу газів. Потім реактор залишали охолоджуватися протягом приблизно 20 хвилин, після чого синтезований матеріал витягували з матриці (рис. 3.6).



а – вид збоку; б – вид зверху.

Рисунок 3.6 – Спресована заготовка інтерметалідного NiAl сплаву після термохімічного пресування

3.2 Дослідження фізико-хімічних перетворень при термохімічному пресуванні

Термодинамічна допустимість процесу ТХП є необхідною, але ще не достатньою умовою його здійснення. У реальних умовах, коли тепловитрати не дорівнюють нулю, для стаціонарного розповсюдження хвилі горіння необхідно, щоб швидкість ракції і, отже швидкість тепловиділення в реакційній зоні, були набагато більші за швидкість тепловиділення в навколишнє середовище. Окрім цього, швидкість реакції повинна швидко збільшуватися із зростанням температури. Тому дещо більш детальну інформацію про кінетику та фізико-хімічні перетворення дає обробка температурних профілів хвилі горіння [25].

Майже 80 секунд триває процес інертного лінійного нагріву, і лише досягши температури плавлення евтектики 1094 К починає швидке зростання температури (стадія теплового самозаймання). При цьому збільшення температури до максимального значення 2184 К відбувається всього за 2 секунди, потім 3…4 секунд тримається максимальне значення, і потім починається охолодження.

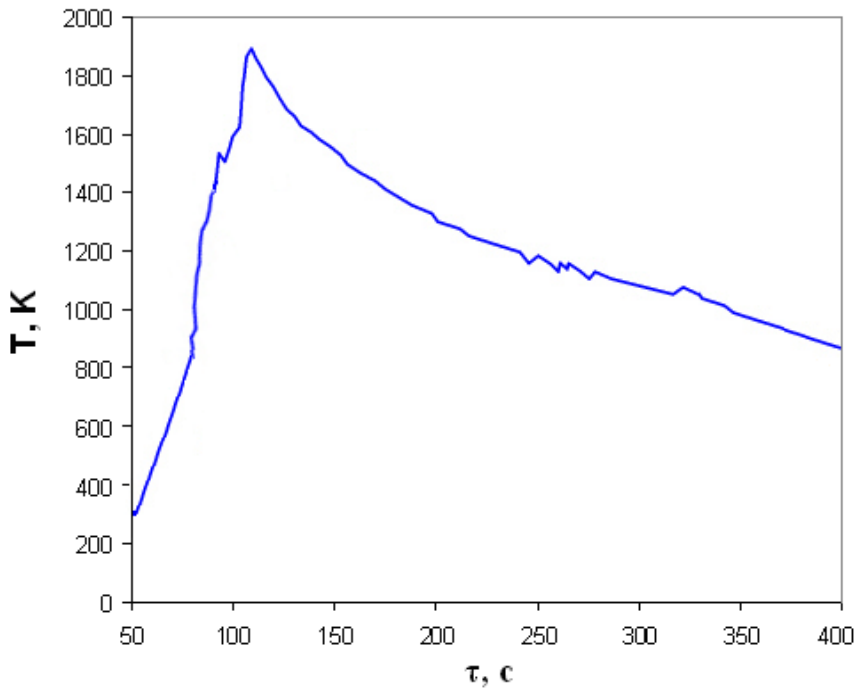


Рисунок 3.7 – Характерний вигляд температурної кривої при тепловому самозайманні Ni-Al

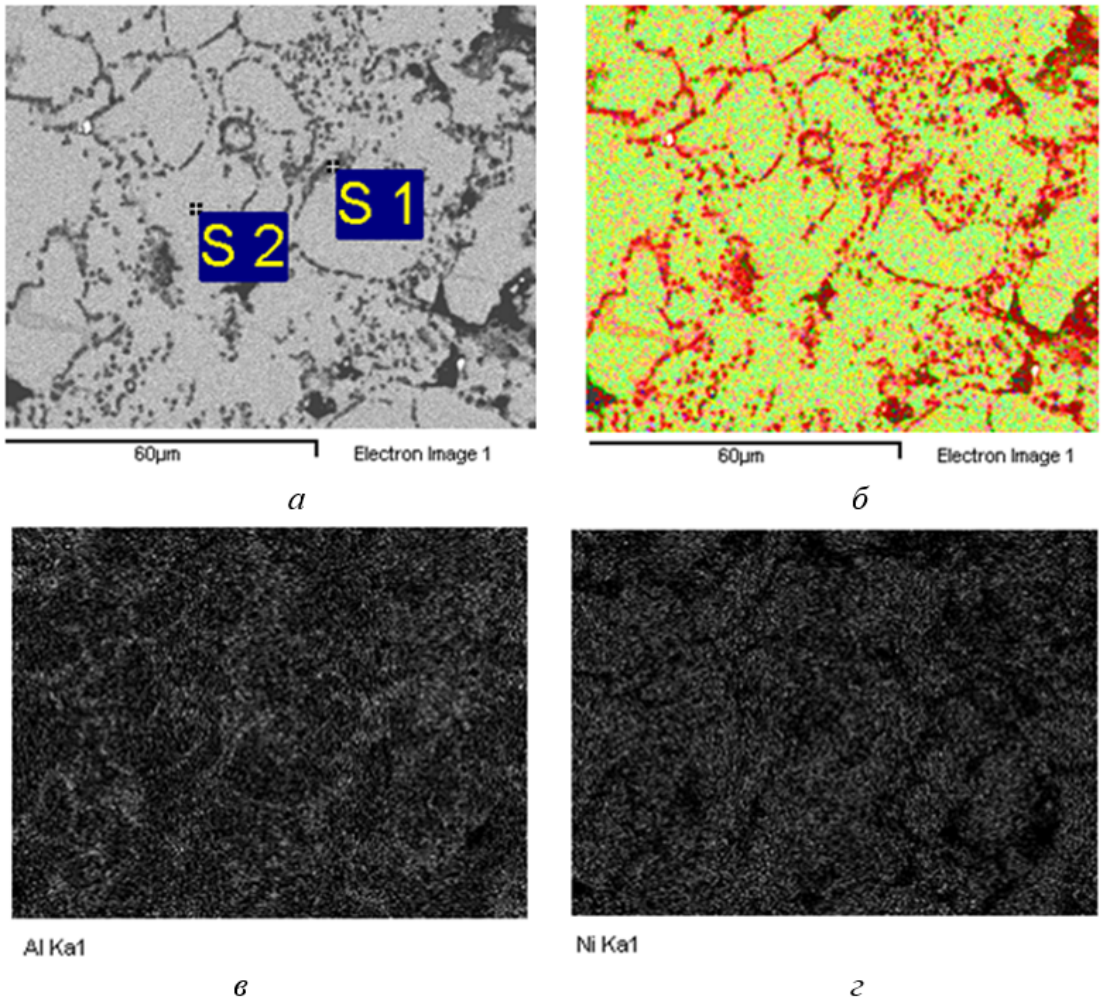
Розглянемо фазові та структурні перетворення, що відбуваються під час термохімічного пресування інтерметалідної системи Ni-Al. На початковому етапі, коли температура зразка є нижчою за температури плавлення обох компонентів (нікелю та алюмінію), має місце взаємна дифузія твердих реагентів, у результаті якої формується евтектична суміш. Тому першу стадію умовно можна охарактеризувати як стадію інертного нагріву, оскільки взаємодія компонентів уже відбувається, однак її інтенсивність незначна й супроводжується малим тепловим ефектом порівняно з тепловим потоком від зовнішнього джерела, що практично не позначається на формі температурної кривої. Після досягнення температури плавлення евтектики на межі контакту частинок утворюється рідка фаза, яка змочує порошкові частинки та поширюється по об’єму зразка. Це спричиняє різке зростання інтенсивності хімічної взаємодії між компонентами та, відповідно, збільшення тепловиділення. Внаслідок саморозігріву температура зразка стрімко підвищується, і алюміній переходить у рідкий стан. За наявності достатньої кількості розплаву відбувається розчинення твердих частинок нікелю з подальшою кристалізацією зерен нової інтерметалідної фази NiAl безпосередньо в об’ємі розплаву.

Дослідження закономірностей тепловиділення в умовах термохімічного пресування дозволили встановити таку послідовність фазових перетворень: $NiAl_3 \rightarrow Ni_2Al_3 \rightarrow NiAl$ [28]. Усі ці реакції супроводжуються значним виділенням тепла. Саме на стадії різкого зростання температури відбувається перетворення основної частини реагентів, причому максимальна інтенсивність процесу спостерігається після плавлення алюмінію.

У міру накопичення твердого продукту NiAl та відповідного зменшення кількості розплаву реакція поступово сповільнюється. Швидкість процесу знижується, незважаючи на подальше підвищення температури. Зрештою встановлюється динамічна рівновага між тепловиділенням, зумовленим дореагуванням, упорядкуванням кристалічної структури твердого продукту та кристалізацією залишків розплаву, з одного боку, і тепловтратами зразка — з іншого. Упродовж 2-4 секунд температура зберігається практично сталою. Після

того як тепловиділення перестає компенсувати тепловтрати, починається стадія охолодження зразка.

Результати дослідження структури отриманого інтерметаліду NiAl представлені на рисунку 3.8.



а *б*

в *г*

а, б – мікроструктура сплаву, *в* – розподіл алюмінію

г – розподіл нікелю

Рисунок 3.8 – Дослідження структури інтерметалідного сплаву *NiAl* після проходження високотемпературного синтезу

3.3 Випробування та контроль інтерметалідів

Металографічний аналіз (LM). Мікроструктуру шліфів досліджували на оптичному мікроскопі «Neophot-21» при збільшенні $\times 50 - 500$.

Шліфування зразків проводили на наждачному папері почергово замінюючи їх з 180-2000. Після шліфування проводили полірування на алмазних пастах з послідовним зменшенням розміру зерна до 0/1 мкм. Остаточне полірування проводили на сукні в присутності водної емульсії оксиду хрому.

Растрова електрона мікроскопія (SEM). Дослідження шліфів дослідних зразків проводили у режимі первинних та вторинних електронів за допомогою електронного мікроскопу JEOL JSM-6500.

Рентгеноструктурний аналіз (XRA). Для дослідження фазового складу інтерметалідів, використали рентгенівські установки «ДРОН-3» і «ДРОН-2» у CuK_α-випромінюванні із застосуванням нікелевого фільтра, що працюють разом з обчислювальним комплексом по програмі «АРФА».

Рентгеноспектральний аналіз (ЕРМА). Для аналізу фазового складу легованих сплавів та дослідження ступеня їхньої однорідності, визначення розподілу легуючих добавок у сплавах і їхній перерозподіл використовували рентгенівський мікроаналізатор JEOL JXA-8800 . Спеціальна електронно-оптична система формує тонкий електронний зонд, що бомбардує невелику, приблизно 1 –2 мкм, область досліджуваного шліфа, поміщеного на аноді, і збуджує рентгенівські промені, спектральний склад яких далі аналізується за допомогою спектрографа з вигнутим кристалом.

Дослідження на жаростійкість (TGA). Для проведення дослідження з жаростійкості були вирізані зразки різних нікельових сплавів (ВТ-1-00 та ВТ20) та інтерметалідів (NiAl, $NiAl_3$) розмірами 10х10х1 мм. Перед окисленням ці зразки обробляли механічною зачисткою наждачним папером, промивали дистильованою водою, піддавали ультразвуковому очищенню в етиловому спирті протягом 10 хвилин. Потім оброблені зразки піддавали ізотермічному та термоциклічному окисненню при температурах 600 та 900 °С в лабораторній печі СНОЛ 1,6.2,0.0,8/9. При ізотермічному окисненні зразки знаходились на важелях з метою постійного вимірювання ваги.

Термоциклічні вимірювання проводили в камерній печі з незахищеною атмосферою. Зразки поміщали до розігрітої при температурі 600 та 900 °С печі.

Таким чином розігрів зразків відбувався менш ніж за 10 хвилин. Після перебування зразків в печі протягом 24 годин вони виймались, охолоджувались до кімнатної температури, зважувалися та поміщались назад до печі через годину. Тобто один повний термоцикл склав 25 годин.

3.4 Методики проведення експерименту та статистична обробка отриманих результатів

З метою вивчення залежності пористості інтерметалідів від зусилля пресування, дисперсності порошку Ni та часу витримки використовуємо Повний факторний експеримент (ПФЕ) з використанням основним рівнем за матричним методом.

Першим чинником (X_1) обираємо зусилля пресування (Р, тонни), другим чинником (X_2) впливу є дисперсність порошку Ni (D, мкм), третім (X_3)– час витримки (τ, с).

Параметр оптимізації (Y) – пористість (Pd %).

Для визначення пористості інтерметалідів від технологічних режимів і складу вихідної суміші використовуємо в дослідженні системи: NiAl.

Побудова регресії математичного планування. Після реалізації всіх дослідів матриці планування по їх результатах будують математичну модель процесу, що вивчається. Для цього розраховуємо коефіцієнти регресії рівняння по формулі:

$$b_j = \sum_{j=1}^{n} \frac{X_{jn} \cdot Y_n}{N} \qquad (3.1)$$

де *bj* – значення *j-го* коефіцієнта регресії;

Xjn – значення *j-го* чинника в *n-ом* досвіді в кодованому вигляді;

Yn – значення параметра оптимізації в *n-ом* досвіді;

N – число дослідів в матриці планування.

В результаті одержують модель, яка має наступний вигляд:

$$Y = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + b_3 X_3 + ... + b_j X_j$$

Статистичний аналіз моделі. Метою аналізу є перевірка придатності моделі для її використання при описі досліджуваного об'єкту.

Аналіз складається з двох етапів. На першому етапі перевіряємо статистичну значущість коефіцієнтів регресії. У статистиці прийнято здійснювати перевірку значущості коефіцієнтів регресії за допомогою критерію Стьюдента. Для цього розраховуємо довірчий інтервал:

$$\Delta b_i = t_{\alpha, f_1} \cdot S_{bi} \tag{3.2}$$

де *Sbi* – середньоквадратична помилка у визначенні коефіцієнтів регресії;

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{S_y^2}{N}} \tag{3.3}$$

$t_{D,fl}$ – значення критерію Стьюдента, яке вибирається залежно від рівня значущості D і числа мір свободи при визначенні дисперсії досліду f_l.

Значення коефіцієнтів регресії порівнюємо з тими, які виявляються по абсолютній величині менше довірчого інтервалу, виключають з рівняння.

На другому етапі остаточно одержане рівняння перевіряємо на адекватність, тобто його придатність для опису об'єкту дослідження:

1) По одержаній моделі визначають по черзі для всіх дослідів матриці планування розрахункові значення параметра оптимізації ($y_{розр}$). Для цього в рівняння підставляємо значення чинників в кодованому вигляді;

2) По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S^2_{неад} = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left(y_n^{експер} - y_n^{розр}\right)^2}{f_2} \quad (3.4)$$

де $f_2 = N - K'$, K' – число коефіцієнтів моделі, включаючи b_0.

3) Визначають розрахункове значення критерію Фішера порівнюють з табличним, яке вибирають з таблиці в роботі залежно від рівня значущості D і числа мір свободи f_1, f_2.

$$F^{розр}_{f1,f2} = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y} \quad (3.5)$$

3.5 Статистичний аналіз моделі

Метою аналізу є перевірка придатності моделі для її використання при описі досліджування пористості інтерметалідів.

Досліджувані фактори, характер їхніх змін і схеми кодування наведені в таблиці 3.1. Згідно до ПФЕ були отримані дані залежності пористості від визначених факторів (таблиця 3.2) та був проведений розрахунок дисперсії, який склав 2,33. Після обробки інформації були вираховані коефіцієнти регресії та отримано відповіднє рівняння: $Y = 25.5 - 11 \cdot x_1 + 2.5 \cdot x_2 - 2.25 \cdot x_3$.

Таблиця 3.1 – Дослідні фактори

Характеристика	Фактори		
	Зусилля пресування	Дисперсність	Витримка
Код	X_1	X_2	X_3
Основний рівень	50	130	12
Інтервал варіації	25	50	8
Верхній рівень (кодоване значення +)	75	180	20
Нижній рівень (кодоване значення -)	25	80	4

Таблиця 3.2 – Результати дослідів

Матеріал	Дослід							
	1	2	3	4	5	6	7	8
NiAl	16	15	8	19	36	45	33	32

Розраховуємо довіричний інтервал коефіцієнтів регресії Δb_i. Для цього спочатку визначимо S_{bi}.

$$S_{bi} = \sqrt{\frac{2.3333}{8}} = \pm 0.5401;$$

Вибираємо для α = 0,05 і $f_1 = 2$ значення критерію Стьюдента, яке рівне 4,3027. Визначаємо довіричний інтервал для нашого рівняння:

$$\Delta b_i = \pm 4.3027 \cdot 0.5401 = \pm 2.3237;$$

Таким чином всі коефіцієнти виявилися статистично значущими, і рівняння набуває остаточно наступного вигляду:

$$Y = 25.5 - 11 \cdot x_1 + 2.5 \cdot x_2 - 2.25 \cdot x_3;$$

Тепер перевіряємо адекватність одержаної моделі в цілому. Для цього підставляємо в одержане рівняння значення «x_i» в кодованому вигляді.

Далі по одержаній моделі визначаються по черзі для всіх дослідів матриці планування розрахункові значення параметра оптимізації ($Y_{розр}$). Для цього в рівняння підставляємо значення чинників в кодованому вигляді;

По формулі одержуємо оцінку дисперсії неадекватності:

$$S^2_{неад} = \frac{\sum_{n=1}^{N}\left(Y_n^{експ} - Y_n^{розр}\right)^2}{f_2} = \frac{79.5}{8-4} = 19.875;$$

де $f_2 = n - k$; k – число коефіцієнтів моделі, включаючи b_0.

Визначаємо розрахункове значення критерію Фішера, порівнюємо з табличним.

$$F^{розр}_{f_1,f_2} = \frac{S^2_{неад}}{S^2_y} = \frac{19.875}{2.3333} = 8.5178;$$

Перехід від кодованих значень впливових факторів до реальних значень. Це робимо для більш зручного використання нашої моделі. Тому нам потрібно перерахувати кожний коефіцієнт регресії для реального значення.

$$b_0^{реал} = b_0^k - \frac{b_1^k \cdot \mathrm{x}_1^o}{\Delta \mathrm{x}_1} - \frac{b_2^k \cdot \mathrm{x}_2^o}{\Delta \mathrm{x}_2} - \frac{b_3^k \cdot \mathrm{x}_3^o}{\Delta \mathrm{x}_3} = 25.25 - \frac{-11.25 \cdot 50}{25} - \frac{2.25 \cdot 130}{50} - \frac{-2.25 \cdot 12}{8} = 44.375$$

$$b_1^{реал} = \frac{b_1^k}{\Delta \mathrm{x}_1} = \frac{-11.25}{25} = -0.44;$$

$$b_2^{реал} = \frac{b_2^k}{\Delta \mathrm{x}_2} = \frac{2.25}{50} = 0.05;$$

$$b_3^{реал} = \frac{b_3^k}{\Delta \mathrm{x}_3} = \frac{-2.25}{8} = -0.28125.$$

де, x_i^o - значення фактору впливу на основному рівні, (натуральне значення); $\Delta \mathrm{x}_i$ - інтервал варіації.

Після перерахунку коефіцієнтів регресії для кодованих показників впливових факторів, одержуємо нове рівняння регресії для факторів наданих у реальній розмірності.

$$\mathrm{Pd} = 44.375 - 0.44 \cdot \mathrm{P} + 0.05 \cdot \mathrm{D} - 0.28125 \cdot \tau .$$

Графічна інтерпретація результатів. Отриману залежність можна представити графічно у вигляді впливу окремих факторів на параметр оптимізації.

Представимо графічну залежність пористості від зусилля пресування дисперсності порошку Ni та часу витримки (рис. 3.1). Аналіз отриманого рівняння показує, що при збільшенні зусилля пресування від 20 до 70 тонн пористість стає меншою і досягає 8 %. При збільшенні зусилля пресування та витримки до 20 сек. пористість також стає меншою. При збільшенні зусилля пресування до 70 тонн та зменшення дисперсності порошку Ni до 80 мкм. пористість отриманого зразку стає меншою.

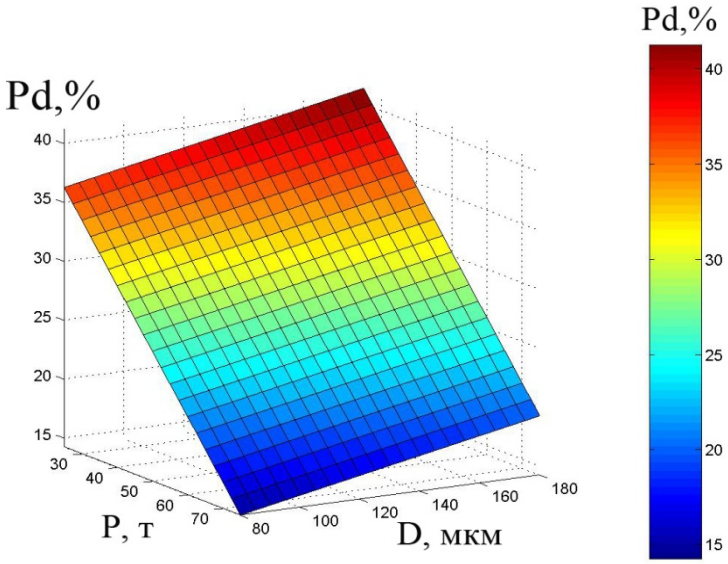


Рисунок 3.9 – Вплив зусилля пресування та дисперсності порошку Ni на пористість інтерметаліду NiAl

3.6 Дослідження природи каталітичної активності інтерметалідів

При дослідження природи каталітичної активності інтерметалідних систем, особливий інтерс представляє вивчення сплавів на основі інтерметаліду $NiAl_3$. Одібний вибір повьязаний з тим, що висока активність нікелю в реакціях окислення оксиду вуглецю і вуглеводнів підтверджена численними публікаціями як у вітчизняній [29-31], так і зарубіжній літературі [32-36]. Роведені раніше

дослідження показали, що активним в реакції окислення оксиду вуглецю і вуглеводнів виявився лише багатофазний інтерметалід $NiAl_3$, тоді як однофазні NiAl і Ni_2Al_3 виявили настільки низьку активність у досліджуваному процесі, що використання їх як каталізаторів окиснення оксиду вуглецю і вуглеводнів недоцільне. У звьязку з цим питання про природу каталітичної активності багатофазної системи $NiAl_3$ (що містит також Ni_2Al_3 і металевий Ni) потребує детальнішого розгляду.

Відправною точкою наших уявлень є *d*-характеристика перехідного металу. Під нею розуміється ступінь перекривання *d*-орбіталей перехідного металу й утворення на поверхні рельєфу електронної щільності. Причиною його виникнення є розрив зв'язків Ni-Al з подальшим утворенням субчастинок із зв'язком Ni-Ni. Утворення на поверхні зерен скелетного нікелю «пучностей» і «западин» електронної щільності визначає каталітичну здатність скелетного нікелю [37, 38]. Ступінь дисперсності та величина *d*-характеристики взаємно конкурують: чим вища дисперсність, тим менша *d*-характеристика. Тому необхідно створювати скелетний метал, в якому було б оптимальне співвідношення величин дисперсності і *d*-характеристики та максимальна каталітична здатність.

У зв'язку з наведеним уявленням про каталітичну активність (пов'язано з *d*-характеристикою) уточнимо поняття про активніцентри та їх кількість [39]. У граничному випадку, коли *d*-характеристика дуже мала, центрами хемосорбції (наприклад, водню) можуть бути всі поверхневі атоми каталізатора. Проте каталітично ктивні центри обумовлені поверхневою неоднорідністю *d*-характеристики. Ступінь орбіт *d*-орбіт у ковалентному зв'язку поверхневих атомів з об'ємними атомами ізний залежно від розташування цих атомів на поверхні з недобудованими решітками; одні поверхневі атоми володіють більшою *d*-характеристикою, інші – меншою. Інакше кажучи, одні ценри абсорбцій каталітично активніші (з більшою *d*-характеристикою), а інші – менш активні. Можливість даного поверхневого атома мати ту, або іншу *d*-характеристику можна розглядати як випадкову подію. З урахуванням великої

кількості таких випадкових подій розподіл активних центрів за *d*-характеристиками, мабуть, повинен підкорятися розподілу Гауса. На цей розподіл може накладатися також ефект хіфмічної неоднорідності, що призводить до суттєвої поверхневевої неоднорідності *d*-характеристики [40, 41].

У процесі конверсії оксиду вуглецю і пропану згідно таблиці 3.3 найбільшу активність проявив зразок складу $NiAl_3$, конверсія початкових речовин на даному каталізаторі монотонно зростає у всьому інтервалі досліджуваних температур, максимальне значення досягається при $T = 300$ ℃: дисперсія *CO* складає 100% і конверсія пропану – 90%, що є близьким до термодинамічно моливих при даній температурі.

Таблиця 3.3 – Вплив температури реакції на ступінь перетворення початуових речовин в реакції конверсії оксиду вуглецю і пропану

Каталізатор	*T*, ℃	Конверсія, %	
		CO	C_3H_8
$NiAl_3$	150	5	0
	200	14	15
	250	88	80
	300	100	90
Ni_2Al_3	200	3	0
	250	8	10
	300	61	20
NiAl	200	0	0
	250	5	3
	300	12	10

3.7 Висновки до розділу

Розроблені склади сумішей і технологічні режими процесів, що дозволяють створювати інтерметалідні каталізатори з заданим комплексом властивостей для конкретних умов експлуатації. Для промислового

використання рекомендовані багатокомпонентні Ni-Al каталізатори, леговані кобальтом, міддю, марганцем, отриманих в умовах термохімічного пресування.

Вивчено інтерметаліди складу $NiAl_3$, Ni_2Al_3 і NiAl, отримані в умовах термохімічного пресування. Показано, що найбільшою каталітичною активність володіє інтерметалід $NiAl_3$, який за даними рентгенофазного аналізу, являю багатофазну систему, що включає Ni, $NiAl_3$ і Ni_2Al_3. Ак тивність такої системи визначається присутністю фази металевого нікелю, інтерметалід Ni_2Al_3 виконує роль каркаса.

4 ОХОРОНА ПРАЦІ ТА ТЕХНОГЕННА БЕЗПЕКА

4.1 Аналіз потенційних небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища при проведенні наукових досліджень

Об’єктом дослідження є лабораторне приміщення обробки металів тиском кафедри металургійних технологій, екології та техногенної безпеки, розташоване на першому поверсі адміністративного корпусу № 9 ІННІ ім. Ю.М. Потебіні ЗНУ. У безпосередній близькості відсутні виробничі приміщення з підвищеними рівнями шуму та вібрації, а також високорослі дерева, які могли б обмежувати доступ природного світла та знижувати рівень природної освітленості.

Площа приміщення становить 48 м², висота – 3 м. Лабораторія обладнана двома вікнами. У приміщенні розміщено лабораторне електрообладнання, письмові столи для проведення навчальних занять, а також шафу для зберігання документації.

Під час перебування в лабораторному приміщенні на персонал можуть впливати такі фактори виробничого середовища:

1. Шкідливі фактори**:**

– підвищені або знижені значення температури повітря;

– відхилення вологості повітря від нормативних значень;

– недостатній рівень освітленості робочих місць;

– підвищений рівень шуму;

– наявність статичної електрики;

2. Небезпечні фактори**:**

– ризик ураження електричним струмом;

3. Психофізіологічні фактори**:**

– статичні фізичні навантаження та обмежена рухова активність;

– нервово-емоційне напруження;

– підвищене розумове навантаження.

Результати аналізу шкідливих і небезпечних факторів, характерних для робочого місця працівника лабораторії, наведені в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Оцінка факторів виробничого та трудового процесу працівника лабораторії

№	Фактори виробничого середовища та трудового процесу	Нормативне значення	Фактичне значення	III клас: шкідливі та небезпечні умови, характер праці			Час дії фактора, %
				I ступінь	II ступінь	III ступінь	
1	Пил, фіброгенної дії, мг/м^3	4	4				50
2	Шум, дБА	80	75				75
3	Мікроклімат в приміщенні: - температура повітря, °С - швидкість руху повітря, м/с - відносна вологість повітря, %	 22-24 0,1-0,2 40-60	 24 0,2 50				100
4	Важкість і напруженість праці	категорія важкості праці – легка, категорія напруженості праці – мало напружена					

Отже, аналіз шкідливих і небезпечних факторів дозволяє зробити висновок, що умови праці в приміщенні лабораторії характеризуються наявністю

нешкідливих виробничих чинників, які не призводять до зростання захворюваності з втратою працездатності та проявом початкових ознак професійної патології.

4.2 Розробка заходів захисту від впливу небезпечних і шкідливих чинників виробничого середовища лабораторії

Лабораторне приміщення належить до категорії приміщень з легкими умовами праці, оскільки в ньому виконуються роботи з незначним фізичним навантаженням. Відповідно до нормативних вимог [42], у такому приміщенні мають забезпечуватися такі параметри мікроклімату: оптимальна температура повітря – 22 °С (допустимі значення – у межах 21–25 °С); оптимальна відносна вологість – 40-60 % (гранично допустиме значення – не більше 75 %); швидкість руху повітря – не вище 0,1 м/с; атмосферний тиск – близько 750 мм рт. ст.; концентрація пилу в повітрі робочої зони – не більше 4 мг/м³ при максимальному розмірі частинок до 2 мкм. При цьому температура повітря в лабораторії не повинна знижуватися нижче +19 °С, а за умов повного завантаження обладнання – перевищувати +25 °С.

Для формування та автоматичного підтримання оптимальних параметрів температури й вологості в холодний період року застосовується система водяного опалення, тоді як у теплу пору року використовується кондиціонування повітря [22].

Усі роботи з використанням шкідливих речовин виконуються виключно у витяжних шафах. З метою розведення токсичних газів до безпечних концентрацій робочі операції проводяться за умови максимального повітрообміну в приміщенні. Припливно-витяжна вентиляція вмикається за 30 хвилин до початку робіт і вимикається після завершення робочого дня.

Працівники лабораторії допускаються до виконання робіт лише у спеціальному одязі та із застосуванням засобів індивідуального захисту

відповідно до вимог інструкцій з охорони праці, виробничої санітарії та пожежної безпеки.

У лабораторному приміщенні в доступному та добре помітному місці розміщена аптечка, укомплектована необхідними медикаментами для надання першої долікарської допомоги.

Увесь хімічний посуд з реагентами має маркування із зазначенням найменування речовини, її кваліфікації та інших відомостей відповідно до вимог ГОСТ 3885-73.

Під час виконання зорових робіт високої точності рівень загальної освітленості має становити не менше 300 лк, а комбінованої – 750 лк; для робіт середньої точності ці значення складають відповідно 200 лк і 300 лк [22]. Оскільки природне освітлення через віконні отвори є недостатнім, у лабораторії додатково застосовується штучне освітлення з системою загального рівномірного освітлення. Для цього використовуються лампи розжарювання потужністю 100 Вт, по дві лампи в кожному світильнику. Мінімально допустима освітленість для ламп розжарювання відповідно до нормативів становить Emin = 100 лк [22].

Основними джерелами шуму в лабораторії є лабораторне обладнання, друкарська та копіювальна техніка, системи кондиціонування повітря, а також вентилятори охолодження. Тривалий вплив шуму підвищеної інтенсивності може спричиняти порушення функцій слухового апарату та негативно впливати на стан нервової системи, викликаючи швидку втому й зниження працездатності, що підвищує ймовірність виробничих помилок.

Зменшення рівня шуму досягається шляхом встановлення шумогенеруючого обладнання на м’які підкладки з синтетичних матеріалів, а також використання гумових або повстяних прокладок товщиною 6–8 мм під ніжками столів. Прокладки можуть кріпитися шляхом приклеювання до опорних поверхонь. Обмеження проникнення зовнішнього шуму забезпечується підвищенням звукоізоляції огороджувальних конструкцій і ущільненням стиків

віконних та дверних блоків. При цьому еквівалентний рівень звуку в приміщенні не повинен перевищувати 80 дБА.

4.3 Електробезпека

Відповідно до вимог Правил улаштування електроустановок (ПУЕ) лабораторне приміщення належить до приміщень I класу — без підвищеної небезпеки ураження електричним струмом. Такі умови характеризуються відсутністю підвищеної вологості та запиленості, нормальним температурним режимом, наявністю ізольованих підлог і незначною кількістю заземленого обладнання [23].

Основними чинниками можливого ураження працівників лабораторії електричним струмом на робочому місці є дотик до металевих неструмоведучих частин електрообладнання, які можуть опинитися під напругою внаслідок пошкодження ізоляції, а також використання заборонених побутових електроприладів, зокрема електроплит, електрочайників і нагрівальних пристроїв.

Виконання магістерської роботи пов’язане з експлуатацією електрообладнання, що працює від мережі змінного струму напругою не більше 220 В. Проведення експериментальних досліджень здійснюється в умовах потенційного впливу електричного струму, а також інших факторів виробничого середовища, визначених санітарно-гігієнічними показниками приміщення.

Аварійні ситуації під час роботи з електрообладнанням можуть виникати, зокрема, у разі замикання фазного провідника на корпус установки. У лабораторії передбачено створення умов підвищеної електробезпеки, що зумовлює необхідність застосування електромережі із заземленою нейтраллю та обов’язкового захисного заземлення корпусів електрообладнання.

Небезпека впливу електричного струму полягає у можливості виникнення електричних травм або електричного удару. Електричні травми характеризуються локальним ураженням тканин організму й можуть

проявлятися у вигляді електричних знаків, металізації шкіри, електричних опіків і механічних пошкоджень. Електричні опіки поділяються на контактні, дугові та комбіновані; за умов використання електроустановок напругою 220 В вони виникають переважно внаслідок проходження електричного струму через тіло людини.

Ступінь небезпечного впливу електричного струму визначається не лише його величиною, а й тривалістю дії. Тому в разі виникнення аварійної ситуації необхідно негайно знеструмити електроустановку. Крім того, тяжкість ураження залежить від індивідуальних особливостей людини, зокрема стану здоров'я, віку, а також електричного опору шкіри.

З огляду на підвищену небезпеку електричного струму розроблено комплекс ефективних заходів захисту. Основними способами запобігання ураженню електричним струмом є [23]: правильне проєктування та експлуатація електрообладнання; надійна електрична ізоляція струмоведучих частин з урахуванням робочої напруги; застосування захисних огороджувальних пристроїв, що унеможливлюють доступ людини до елементів під напругою; використання захисного заземлення та занулення; застосування засобів індивідуального захисту; наявність попереджувальних знаків, написів і плакатів.

У разі несправностей окремі елементи електрообладнання можуть опинитися під напругою. Оскільки людина вмикається в коло заземлення паралельно провіднику, розподіл струму відбувається відповідно до законів Кірхгофа: сила струму в паралельних гілках обернено пропорційна їх опору. Зважаючи на те, що електричний опір тіла людини на кілька порядків перевищує опір заземлювального провідника, струм, який проходить через людину, є значно меншим.

Порушення в роботі електричних мереж, обладнання або запобіжних пристроїв можуть спричинити виникнення пожеж і вибухів. Для запобігання таким ситуаціям необхідно забезпечувати надійне з'єднання проводів у місцях контакту, зокрема шляхом скручування та пропаювання, а також застосовувати

захисне заземлення і системи автоматичного захисного відключення, які можуть використовуватися як доповнення або альтернатива заземленню.

У разі загоряння електропроводки її слід негайно знеструмити та ліквідувати осередок займання за допомогою вуглекислотних вогнегасників або азбестових покривал. Для попередження займань електропроводки необхідно використовувати провідники відповідного перерізу, що запобігає їх перегріванню, а також не допускати перевантаження електричної мережі.

У випадку ураження людини електричним струмом необхідно вжити таких першочергових заходів [24]: негайно вимкнути напругу; звільнити постраждалого від дії струмоведучих частин; винести його на свіже повітря, послабити одяг, зокрема розстебнути комір; терміново викликати медичного працівника.

4.4 Пожежна та техногенна безпека

Будівлю, у якій розміщена лабораторія, за показниками вибухопожежної та пожежної небезпеки можна віднести до категорії Д, оскільки в приміщенні наявні горючі матеріали (книги, документація, меблі) та важкоспалимі елементи (лабораторне обладнання), які у разі дії відкритого полум’я здатні горіти, але не утворюють вибухонебезпечних сумішей [45].

За конструктивними особливостями будівля належить до споруд з несучими й огороджувальними конструкціями, виконаними з природних або штучних кам’яних матеріалів, бетону чи залізобетону. Для міжповерхових перекриттів допускається застосування дерев’яних конструкцій, захищених шаром штукатурки або важкогорючими листовими й плитковими матеріалами. Відповідно до цих характеристик ступінь вогнестійкості будівлі визначається як III.

Потенційними причинами виникнення пожежі в лабораторному приміщенні можуть бути: несправний стан електропроводки, розеток і вимикачів, що здатний призвести до короткого замикання або порушення

ізоляції; експлуатація пошкоджених або технічно несправних електроприладів; використання електронагрівальних пристроїв з відкритими нагрівальними елементами; займання внаслідок прямого або вторинного впливу блискавки; поширення вогню із суміжних приміщень або ззовні будівлі; порушення правил пожежної безпеки та необережне поводження з вогнем.

З позицій техногенної безпеки особливу небезпеку становлять аварійні ситуації, пов’язані з відмовами інженерних систем (електропостачання, вентиляції, кондиціонування), які можуть спричинити перегрів обладнання, задимлення приміщень або утворення небезпечних умов для перебування людей. Тому в лабораторії передбачено постійний контроль технічного стану обладнання, своєчасне технічне обслуговування електромереж і дотримання регламентів експлуатації.

Для ліквідації пожеж у лабораторії застосовується вуглекислотний вогнегасник типу ВВ-5, який є безпечним для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою. У разі займання навіть незначної кількості легкозаймистих рідин необхідно негайно вимкнути всі електронагрівальні прилади, загасити пальники та усунути з осередку пожежі легкозаймисті предмети. Загорання рідин слід локалізувати шляхом накривання полум’я вологою вовняною або азбестовою ковдрою.

У випадку загоряння одягу на людині необхідно негайно збити полум’я та надати постраждалому першу домедичну допомогу. До прибуття медичного працівника слід обережно звільнити потерпілого від одягу, не відриваючи тканину, що прилипла до шкіри, накрити опікові поверхні стерильною пов’язкою та не торкатися уражених ділянок. Забороняється проколювати пухирі, обробляти рани мазями або розчинами — ці дії може виконувати виключно медичний персонал.

З метою оперативного виявлення та оповіщення про пожежу в лабораторному приміщенні встановлено автоматичну пожежну сигналізацію на базі автоматичних димових сповіщувачів, а також автоматичну систему пожежогасіння. У контексті техногенної безпеки ці системи забезпечують

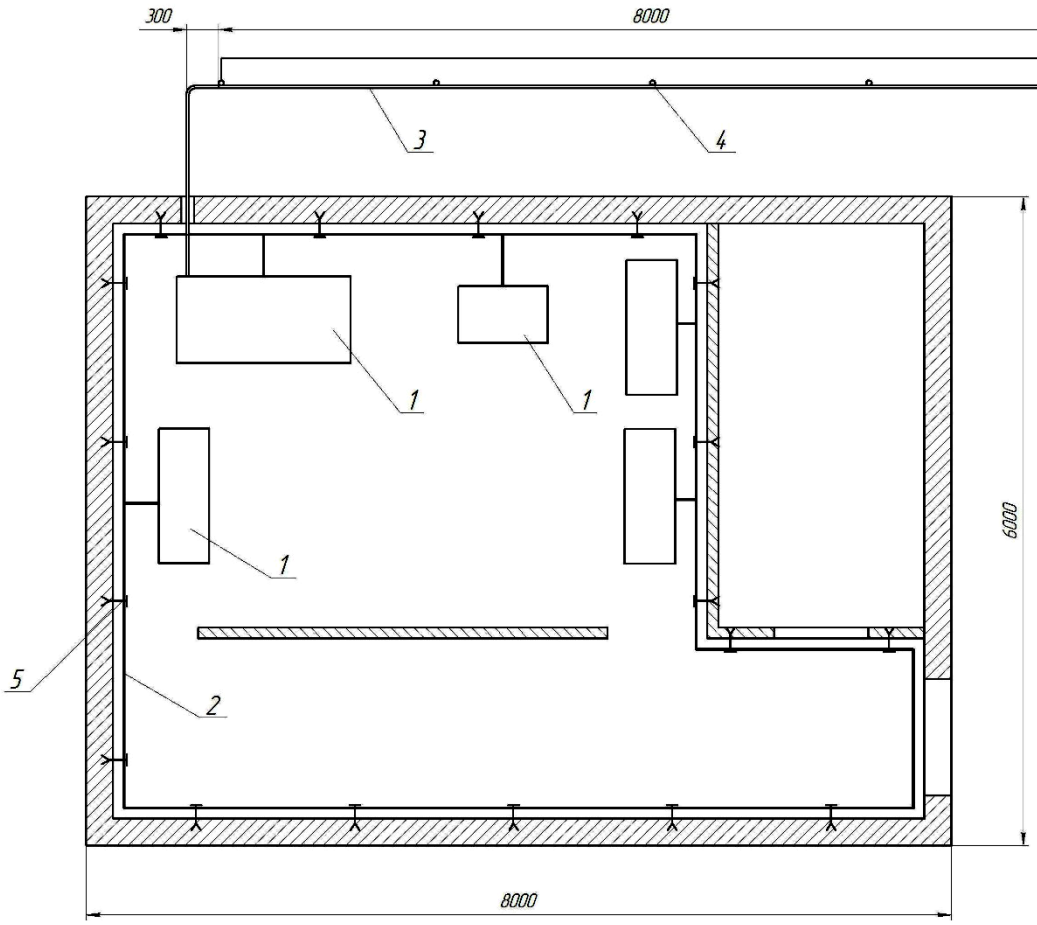
своєчасне реагування на надзвичайні ситуації, зменшення масштабів можливих збитків і ризику для життя та здоров’я людей.

Особлива увага приділяється організації евакуації персоналу. Евакуація здійснюється заздалегідь визначеними та промаркованими маршрутами відповідно до затверджених планів. Схеми евакуації розміщені у доступних і добре освітлених місцях, що дозволяє забезпечити швидке та безпечне виведення людей з приміщення у разі виникнення пожежі або іншої техногенної надзвичайної ситуації.

4.5 Розрахунок захисного заземлення

Для забезпечення захисту від ураження електричним струмом при дотику до металевих неструмоведучих частин, які можуть опинитися під напругою в результаті пошкодження ізоляції, в лабораторії пропонується застосувати захисне заземлення. Призначення захисного заземлення – створення між металевими конструкціями або корпусом електричного обладнання і землею електричного з'єднання досить малого опору, щоб у разі замикання на землю при дотику людини через його тіло пройшов струм малої величини, безпечний для організму.

Зробимо розрахунок захисного заземлення для лабораторії (рис. 4.1).



1 – електроустановка; 2 – внутрішній контур заземлення; 3 – сполучна смуга; 4 – заземлювач; 5 – скоба кріплення.

Рисунок 4.1 – Схема виносного заземлення

Вибираємо виносний заземлювальний пристрій, який застосовується при малих струмах замикання на землю, зокрема в установках до 1000 В.

Заземлювач передбачається виконати з вертикальних труб l = 2 м із зовнішнім діаметром d = 0,03 м, верхні кінці яких з'єднуються між собою за допомогою горизонтального електрода – сталевої смуги перетином 4×40 мм, покладеної в землю на глибині t = 0,7 м. Питомий електричний опір ґрунту ρ = 100 Ом·м. Коефіцієнт сезонності для вертикального заземлювача дорівнює $\psi = 1{,}3$. Нормативний опір заземлювача – 4 Ом.

Визначимо розрахунковий питомий опір грунту для вертикального заземлювача:

$$\rho_в = \psi_в \cdot \rho = 1{,}3 \cdot 100 = 130 \text{ Ом·м.} \quad (4.1)$$

Опір розтіканню струму одиночного вертикального заземлювача, заглибленого в землю на 0,7 м:

$$R_0 = \left(\frac{\rho_в}{2\pi l}\right)\left[\ln\frac{2 \cdot l}{d} + 0{,}5\ln\frac{4 \cdot t + 3 \cdot l}{4 \cdot t + l}\right] = \left(\frac{130}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 2}\right) \cdot \left[\ln\frac{2 \cdot 2}{0{,}03} + 0{,}5\ln\frac{4 \cdot 0{,}7 + 3 \cdot 2}{4 \cdot 0{,}7 + 2}\right] = 15{,}18 \text{ Ом.} \quad (4.2)$$

Орієнтовна кількість вертикальних заземлювачів складе:

$$n = \frac{1{,}3 \cdot R_0}{R_н} = \frac{1{,}3 \cdot 15{,}18}{4} = 5 \text{ шт.} \quad (4.3)$$

Знаходимо відношення відстані між заземлювачами до їх довжини:

$$A = \frac{a}{l} = \frac{2}{2} = 1 \cdot \quad (4.4)$$

Коефіцієнт використання вертикальних заземлювачів $\eta_в = 0{,}7$, горизонтальних заземлювачів – $\eta_г = 0{,}74$.

Опір розтіканню струму групи вертикальних заземлювачів:

$$R_в = \frac{R_0}{n \cdot \eta_в} = \frac{15{,}18}{5 \cdot 0{,}7} = 4{,}3 \text{ Ом.} \quad (4.5)$$

Довжина горизонтальної сполучної смуги:

$$l_г = a \cdot (n - 1) = 2 \cdot (5 - 1) = 8 \text{ м.} \quad (4.6)$$

Коефіцієнт сезонності для горизонтального заземлювача при довжині смуги 8 м – $\psi_г = 2{,}5$.

Розрахунковий питомий опір ґрунту для горизонтального заземлювача:

$$\rho_г = \psi_г \cdot \rho = 2{,}5 \cdot 100 = 250 \text{ Ом·м.} \quad (4.7)$$

Опір горизонтальної смуги, поглибленої в землю на 0,7 м становить:

$$R_г = \left(\frac{\rho_г}{2\pi \cdot l_г \cdot \eta_г} \right) \ln\left(\frac{2l_г^2}{bt} \right) = \left(\frac{250}{2 \cdot 3{,}14 \cdot 8 \cdot 0{,}74} \right) \ln\left(\frac{2 \cdot 8^2}{0{,}04 \cdot 0{,}7} \right) = 56{,}65 \text{Ом.} \quad (4.8)$$

Опір заземлювачів в цілому:

$$R_з = \frac{R_в \cdot R_г}{R_в + R_г} = \frac{4{,}3 \cdot 56{,}65}{4{,}3 + 56{,}65} = 4 \text{ Ом.} \quad (4.9)$$

Отриманий опір заземлювачів дорівнює номінальному (4 Ом), що відповідає вимогам ПУЕ.

Розташовуємо 5 заземлювачів в ряд на відстані 2 м один від одного.

4.6 Висновки до розділу

Охорона праці є комплексною системою правових, соціально-економічних, організаційних, технічних, санітарно-гігієнічних і медико-профілактичних заходів та засобів, спрямованих на збереження життя, здоров’я і працездатності людини під час виконання трудових обов’язків. Центральним об’єктом охорони праці виступає працівник у процесі професійної діяльності, а також виробниче середовище та раціональна організація праці. Основною метою охорони праці є створення безпечних, здорових і комфортних умов праці, що

мінімізують ризики професійного травматизму та негативного впливу виробничих факторів.

Нормативно-правову основу охорони праці в Україні становлять Кодекс законів про працю України, Закон України «Про охорону праці», а також інші закони, державні нормативно-правові акти, стандарти та галузеві регламенти. Закон України «Про охорону праці», ухвалений Верховною Радою України 14 жовтня 1992 року, визначає базові принципи реалізації конституційного права громадян на безпечні та здорові умови праці. Документ регулює взаємовідносини між роботодавцем і працівником з питань безпеки праці, гігієни виробничого середовища та встановлює єдиний державний підхід до організації системи охорони праці з урахуванням ролі органів державного нагляду.

Результати досліджень свідчать, що найбільша кількість нещасних випадків на виробництві припадає на працівників із трудовим стажем до п’яти років, а також на осіб, які працюють у тривалих змінних режимах, особливо в другій половині робочого дня, коли зростає рівень фізичної та психоемоційної втоми. Виявлені закономірності зумовлюють необхідність упровадження роботодавцями сучасних підходів до управління охороною праці, зокрема систематичного навчання та інструктажів, формування культури безпеки, профілактичної роботи з працівниками, а також контролю за дотриманням вимог інструкцій і правил з охорони праці з метою зниження рівня виробничого травматизму.

ВИСНОВКИ

Підвищення фізико-механічних характеристик сучасних конструкційних матеріалів доцільно реалізовувати шляхом створення комплексних багатокомпонентних інтерметалідних сплавів на основі алюмінідів. Інтерметаліди алюмінію вирізняються високою стійкістю до корозії та окислення, підвищеною жароміцністю, а також наявністю напівпровідникових і надпровідних властивостей та каталізаторної активності, що зумовлює їх значний науковий і прикладний інтерес як перспективного класу неорганічних матеріалів.

У ході роботи з використанням розробленої віртуальної моделі в середовищі чисельного моделювання технологічних процесів DEFORM виконано імітаційне моделювання пластичної деформації інтерметалідного продукту високотемпературного синтезу під час пресування. За результатами числових розрахунків проведено комплексний аналіз температурних полів, напружено-деформованого стану та енергосилових параметрів процесу обробки матеріалу тиском, що дало змогу оцінити вплив умов термохімічного пресування на формування структури та властивостей інтерметалідного сплаву.

Наукова новизна одержаних результатів полягає в такому:

1. На основі теоретичних розрахунків, виконаних із використанням моделі Холла-Петча, встановлено, що високотемпературний синтез інтерметалідних сплавів у порошковій суміші чистих елементів за умов термохімічного пресування в режимі теплового вибуху та за мінімального зовнішнього тиску забезпечує формування інтерметалідного продукту синтезу Ni_3Al із середнім розміром зерна близько 35 мкм. Отриманий матеріал характеризується граничною міцністю до 620 МПа, що приблизно на 100 МПа перевищує відповідний показник для сплаву $NiAl_3$.

2. Запропоновано та реалізовано математичну модель отримання сплавів системи Ni-Al із заданими структурними та фізико-механічними

властивостями, засновану на поєднанні результатів фізичного моделювання процесу термохімічного пресування та чисельних розрахунків у програмному комплексі DEFORM. Показано, що високотемпературний синтез інтерметалідних сплавів у порошковій суміші чистих елементів у поєднанні з термохімічним пресуванням дозволяє формувати матеріали з однорідною дрібнозернистою структурою із середнім розміром зерна на рівні ~35 мкм.

Запропонований у роботі концептуальний підхід і розроблена математична модель дають змогу прогнозувати не лише макроструктурні характеристики синтезованого матеріалу, а й більш тонкі особливості хвильової динаміки процесу горіння. Модель комплексно враховує процеси теплопровідності, кінетику хімічної взаємодії реагентів з урахуванням неоднорідності міжфазної реакційної поверхні, механізми утворення та розпаду інтерметалідних фаз відповідно до діаграми стану системи, а також дифузійні процеси, що визначають кінетику росту інтерметалідних фаз у процесі термохімічного пресування.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Середа Б.П. Обробка металів тиском : навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл. Запоріжжя : ЗДІА, 2005. 250 с.

2. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruhliak D. Modeling and thermodynamic analysis of reactions during thermochemical pressing of powder intermetallic alloys. *Математичне моделювання*. 2022. 1 (46). С. 71-79. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268399.

3. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T, Krugliak D. Exploring thermochemical pressing in the manufacture of TiN - W cermet-based composite materials. *International Journal of Thermofluids*. 2025. 25. 101020. https://doi.org/10.1016/j.ijft.2024.101020.

4. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T, Krugliak D, Bondarenko Y. Development of composite materials based on TiN–Mo cermets during thermochemical pressing. *International Journal of Lightweight Materials and Manufacture*. 2023. 6 (4). P. 508- 511. https://doi.org/10.1016/j.ijlmm.2023.05.006.

5. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T., Krugliak D., Bondarenko Y. Development of new composite materials based on TiN–Ni cermets during thermochemical pressing. *Results in Engineering*. 2022. 16. 100724. https://doi.org/10.1016/j.rineng.2022.100724.

6. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruglyak D. The effects of grain size on mechanical properties of Ni-Al intermetallic alloy. *Математичне моделювання*. 2023. 2 (49). С. 165-172. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(49)2023.293187.

7. Sereda B., Belokon Y., Kruhliak I., Sereda D., Kruglyak D. The effects of grain size on mechanical properties of Ti-Al intermetallic alloy. *Математичне моделювання*. 2023. 1 (48). С. 88-96. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(48)2023.280148.

8. Belokon Y ., Zholobko B., Sahuliakin O., Kalashnik S. Analysis of the thermodynamic properties of special-purpose alloys for conditions of thermochemical pressing. *Математичне моделювання*. 2024. No 1 (50). С. 146-151. https://doi.org/10.31319/2519-8106.1(50)2024.305581.

9. Sheyko S., Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T. Thermoplastic processing of structural metallic materials. Experiments, theory and modeling. Cham: Springer, 2024. 112 p. ISBN 978-3-031-73895-1. https://doi.org/10.1007/978-3-031-73896-8.

10. Belokon Y., Hrechanyi O., Vasilchenko T., Krugliak D. Thermochemical pressing of special purpose materials : monograph. Riga : Baltija Publishing, 2024. 156 p. ISBN 978-9934-26-508-2. https://doi.org/10.30525/978-9934-26-508-2.

11. Бєлоконь Ю. О., Чейлитко А. О., Ільїн С. В., Воденнікова О. С. Теоретичні засади термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення: монографія. Одеса : Гельветика, 2022. 148 с. ISBN 978-617-554-085-5.

12. Бєлоконь Ю. О., Кругляк Д. О., Калашник С. М., Сагулякін О. Є., Жолобко Б. О. Експериментальні дослідження процесів термохімічного пресування матеріалів спеціального призначення : монографія. Одеса : Гельветика, 2023. 154 с. ISBN 978-617-554-173-9.

13. Sereda B., Belokon Y., Krugliak D. Kinetics modeling in thermochemical pressing of powder intermetallic alloys. *Математичне моделювання*. 2022. 2(47). С. 90–97. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(47)2022.268399.

14. Belokon Y., Sereda D., Zholobko B., Sahuliakin O., Yavtushenko A. Modeling of local plastic deformation processes under extreme operating conditions. *Математичне моделювання*. 2024. No 2 (51). С. 169-176. https://doi.org/10.31319/2519-8106.2(51)2024.317635.

15. Бєлоконь Ю.О., Шапуров О.О., Гречаний О.М., Проценко В.М. Технології синтезу високоентропійних сплавів: сучасний стан і майбутні напрямки. *Металургія*. 2025. № 1(2025). С. 58-70. https://doi.org/10.26661/2071-3789-2025-1-06.

16. Belokon Y., Yavtushenko A., Protsenko V., Bondarenko Y., Cheilytko A. Mathematical modeling of physical properties of anisotropic materials. *METAL 2020 - 29th International Conference on Metallurgy and Materials.* (Brno, May 20 - 22, 2020). Brno, 2020. P. 440-445.

17. Бєлоконь Ю.О. Фізичні процеси при пластичній деформації : навч. посіб. Запоріжжя : ЗНУ, 2023. 179 с.

18. Середа Б. П., Бєлоконь Ю. О., Оніщенко А. М. Теорія обробки металів тиском : навч.-метод. посібник. Запоріжжя : ЗДІА, 2012. 129 с.

19. Обробка металів тиском при нестаціонарних температурних умовах : монографія / Б.П.Середа, І.В.Кругляк, О.А.Жеребцов, Ю.О.Бєлоконь. Запоріжжя : ЗДІА, 2009. 252 с. ISBN 978-966-8462-15-3.

20. Бєлоконь К. В., Куріс Ю. В., Манідіна Є. А. Інформаційні технології в охороні праці : навч.-метод. посіб. Запоріжжя : ЗДІА, 2018. 160 с.

21. Цифрова трансформація безпеки праці у виробництві: ергономіка, виробнича санітарія та вентиляція, електро- та пожежобезпека / К. В. Бєлоконь, Є. А. Манідіна, А. В. Вагін, В. Л. Ситий // Цифрова трансформація промислового менеджменту: теорія і практика : кол. монографія / за ред.: В. Г. Воронкової, Н. Г. Метеленко. Львів ; Торунь : Liha-Pres, 2023. С. 717-799.

22. Основи охорони праці : навч.-метод. посіб. для студентів ЗДІА всіх спец. ден. та заоч. форм навчання / К. В. Бєлоконь, В. Г. Рижков, Ю. В. Куріс, Є. А. Манідіна ; ЗДІА. Запоріжжя : ЗДІА, 2015. 180 с.

23. Манідіна Є. Забезпечення безпеки технологічних процесів та обладнання під час проєктування металургійних цехів. Формування сучасних концепцій менеджменту організацій та адміністрування в умовах цифровізації : матеріали міжнар. н.-практ. конф., присвяч. 25-річчю створення каф. менеджменту орг. та упр. проектами, 23-24 вересня 2021 року / ред.-упоряд. В. Г. Воронкова. Запоріжжя : Гельветика, 2021. С. 675-679.

24. Манідіна Є. А., Грідяєв В. В. Пожежна безпека : курс лекцій для здобувачів ступеня вищ. освіти бакалавра спец. 263 "Цив. безпека" освіт.-проф. програми "Охорона праці". Запоріжжя : ЗНУ, 2024. 313 с.