

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**МЕХАНІКО-МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ДИНАМІКА МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

«На правах рукопису»  
УДК \_\_\_\_\_

«До захисту допущено»  
Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ С. О. Пискунов  
« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**Магістерська дисертація**

**на здобуття ступеня магістра**

**зі спеціальності 131 Прикладна механіка**

**на тему: «Математичне моделювання впливу параметрів технології  
пошарового наплавлення на механічні характеристики»**

Виконав:

студент VI курсу, групи МП-81мп  
Ананченко Микита Станіславович \_\_\_\_\_

Керівник:

д. т. н., проф.,  
Бабенко А. Є. \_\_\_\_\_

Рецензент:

д.т.н. проф., зав.каф. ПМ  
Данильченко Ю.М. \_\_\_\_\_

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

Київ – 2019 року

**НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ**  
**«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ**  
**ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»**  
**МЕХАНІКО–МАШИНОБУДІВНИЙ ІНСТИТУТ**  
**КАФЕДРА ДИНАМІКИ І МІЦНОСТІ МАШИН ТА ОПОРУ МАТЕРІАЛІВ**

Рівень вищої освіти – другий (магістерський)

Затверджую

Спеціальність (8.05050101) Динаміка і міцність машин

Завідувач кафедри

\_\_\_\_\_ (підпис)(ініціали, прізвище)

« \_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2019 р.

**ЗАВДАННЯ**

**на магістерську дисертацію студенту**

**Ананченко Микити Станіславовича**

1. Тема дисертації: Математичне моделювання впливу параметрів технології пошарового наплавлення на механічні характеристики.

Науковий керівник дисертації д. т. н., професор Бабенко А.Є.

Затверджені наказом по університету від \_\_\_\_\_ 201\_ р. № \_\_\_\_\_

2. Термін подання студентом дисертації до \_\_\_\_\_ 2019р.

3. Об'єкт дослідження: вироби виготовленні пошаровим наплавленням.

4. Предмет дослідження: оптимізація технології пошарового наплавлення задля отримання задовільних експлуатаційних властивостей виробів.

5. Перелік завдань, які потрібно розробити:

- 1) Огляд сучасного стану проблеми технології пошарового наплавлення
- 2) Дослідження технологічного процесу 3D XBeam Metal Printer, та виробів, виготовлених за його допомогою
- 3) Математичне моделювання процесу пошарового наплавлення, та його оптимізація з ціллю отримання задовільних експлуатаційних характеристик

4) Порівняння результатів експерименту, отриманих наплавленням виробу на установці 3D XBeam Metal Printer і результатів моделювання технології

5) розробка стартап-проекту.

6. Орієнтовний перелік ілюстративного матеріалу – 6 і більше.

7. Орієнтовний перелік публікацій – 1 і більше.

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	Завдання прийняв
1-4	Махненко О.В., д.т.н., зав. відділу математичних методів дослідження фізико-хімічних процесів при зварюванні та спецелектрометалургії (№ 34), Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ;		

8. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 201\_ р.

Календарний план

№	Термін виконання	Примітка
1	01.09.19 - 19.09.19	Аналіз літератури
2	20.09.19 – 9.10.19	Математичне моделювання теплових полів при наплавленні
3	10.10.19 – 31.10.19	Розв’язок задачі знаходження залишкового НДС та оптимізації
4	1.11.19 – 19.11.19	Порівняння результатів моделювання і експерименту
5	20.11.19 – 10.12.19	Стартап-проект та висновки

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

Науковий керівник

\_\_\_\_\_

(підпис)

\_\_\_\_\_

(ініціали, прізвище)

## ЗМІСТ

Перелік скорочень	6
Анотація	7
Abstract	9
<b>1. Огляд літературних джерел</b>	<b>10</b>
1.1. Інформація про галузь та аналіз поточної ситуації	10
1.2 Огляд сучасних проблем виготовлення деталей адитивним методом та аналіз літератури	13
1.2.1. Аналіз технології пошарового електронно-променевого наплавлення присадковим дротом	13
1.2.2. Висновки за розділом	18
1.2.3. Механічні властивості титанового сплаву ВТ6	19
1.2.4. Висновок за статтею	23
<b>2. Розробка математичної моделі теплових процесів при пошаровому формуванні зразку</b>	<b>24</b>
2.1. Методика розв'язку задачі адитивного наплавлення, за допомогою методів математичного моделювання фізичних процесів	24
2.2. Математична модель температурних полів у процесі наплавлення	24
2.3. Математична модель знаходження напружено-деформованого стану виробу при його наплавці та після повного охолодження	27
2.4. Висновки за розділом	30
<b>3. Результати математичного моделювання процесу пошарового наплавлення тривимірних виробів</b>	<b>31</b>
3.1. Результати моделювання отриманих температурних полів у процесі наплавлення виробів	31
3.1.2. Висновки за розділом	39

3.2. Результати моделювання напружено-деформованого стану зразку у процесі його наплавлення, та після його повного охолодження	40
3.2.2. Висновки за розділом	44
3.3. Оптимізація технології пошарового наплавлення, з метою покращення механічних властивостей матеріалу, та його мікроструктури	45
3.3.2. Висновки за розділом	53
<b>4. Порівняння математичного моделювання з результатом експерименту</b>	<b>54</b>
4.2. Висновки за розділом	58
<b>5. Розроблення стартап-проекту</b>	<b>59</b>
5.1. Опис ідеї проекту	59
5.2. Технологічний аудит	60
5.3. Розроблення ринкової стратегії проекту	68
5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту	70
<b>Висновки за результатами дипломної роботи</b>	<b>72</b>
<b>Список використаної літератури</b>	<b>74</b>

## ПЕРЕЛІК СКОРОЧЕНЬ

3D Принтер	Верстат, що виготовляє деталі конвеєрним методом, за пошаровою адитивною технологією наплавлення
НДС	Напружено-деформований стан
BT6	Марка титанового сплаву

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 75 с., 24 рис., 20 табл., 15 джерел.

### **Актуальність теми**

Аддитивна технологія у даний час швидко розвивається. Вироби із складною геометрією з порожнинами та складною трьохвимірною кривизною на даний момент набагато економічно вигідніше виробляти за допомогою 3Д принтера, який стає перспективною альтернативою традиційному виробництву. В першу чергу він використовується для аерокосмічної промисловості і медицини.

В Україні розробляється технологічний процес електронно-променевого наплавлення дротом деталей складної форми. Процес проходить в умовах глибокого вакууму. Джерело складається з комплексних систем сфокусованого лазерного променя нагріву і системи подачі присадного дроту. Оптимізація адитивного виробництва на прикладі простої трьохвимірної геометрії таврового профілю є першим кроком для знаходження оптимальної технології пошарового наплавлення виробу. Оптимізація параметрів наплавлення проводилася за допомогою математичного моделювання моделювання термокінетичних процесів.

**Мета і завдання дослідження.** Мета роботи – оптимізація параметрів пошарового наплавлення на основі математичних методів, задля отримання задовільної для експлуатації мікроструктури виробу, та зменшення залишкових напружень деталі після процесу її виготовлення.

Завдання дослідження:

1. Сучасні проблеми виготовлення деталей за допомогою адитивної технології, та аналіз властивостей матеріалу – титановий сплав ВТ-6
2. Математичне моделювання технології пошарового наплавлення, за допомогою використання комп'ютерного програмного забезпечення

3. Оцінка результатів математичного моделювання для отримання вдосконалених параметрів технології наплавлення та залишкових напружень для деталей різних жорсткостей.

**Об'єкт дослідження** – деталі, виготовлені за допомогою адитивної технології.

**Предмет дослідження** – оцінка експлуатаційних характеристик деталей різного профілю, отриманих за допомогою різних параметрів наплавлення.

**Методи дослідження** – математичне моделювання та чисельні методи

**Наукова новизна:** отримано результати для оптимізації параметрів пошарового наплавлення, які впливають на мікроструктуру деталей та їх експлуатаційні характеристики;

Отримано результати залишкового НДС деталей, отриманих при різних параметрах наплавлення, та для різних жорсткостей поперечного перерізу геометрії.

**Практичне значення одержаних результатів:** Отримані результати оптимізації можуть бути використані при виробництві деталей 3D форми методом адитивної технології, зокреми розробниками даної технології в Україні – компанією xBeam 3D Metal Printer

**Публікації:** 2 статті, 5 збірок тезисів конференцій

**Ключові слова:** адитивна технологія, математичне моделювання, мікроструктура, залишковий НДС, технологія наплавлення.



## **Abstract**

Additive manufacturing technologies are growing quickly these days. Economical profit of manufacturing complex geometry of mechanism parts, with either hollow section or complex three-dimensional curvature, on 3D printers are higher than in ordinary manufacturing methods. Which means, that 3D printer is a great alternative to traditional manufacturing. It's used now for aerospace and medicine business now, and have a big future in other spheres.

Technology of wire electron beam printing of complex parts right now developing in Ukraine. Process needs in high power of vacuum. The welding channel consists of focused laser beam heating system and wire supply system. First step of additive manufacturing improvement - it's optimization of additive technology on simple 3D samples with T-profile. Using mathematical modeling for optimization of the technology parameters are makes sense these days.

**Keywords:** additive manufacturing, math modelling, microstructure, residual stresses and deformations, additive technology.

## **1. ОГЛЯД ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ**

### **1.1. Інформація про галузь та аналіз поточної ситуації**

У даний час адитивні технології у виробництві титанових конструкційних елементів є перспективною альтернативою традиційному виробництву, у першу чергу для аерокосмічної промисловості і медицини. Економічний прибуток від виготовлення деталей адитивним методом може реалізовуватись за рахунок того, що вартість переробки відходів з титанових сплавів в результаті фрезерування великогабаритних деталей, часто є вищим, ніж витрати при пошаровому формуванні такого об'єкту, а для малогабаритних деталей покращується реалізація виготовлення одиничних екземплярів з нестандартними розмірами. Також доцільним є використання технології для деталей з порожнинами або деталей із складною кривизною поверхні у трьох площинах, чи металевих трубок, виготовлених за спіральною траєкторією і вимагаючи наявність отвору за умовами експлуатації, які за традиційною технологією необхідно було витравлювати кислотою.

Існує кілька різних підходів отримання металевих конструкцій на основі принципу пошарового формування об'єкта. Ці підходи відрізняються за типами витратних матеріалів і використовуваних джерел нагріву. За типами використовуваних матеріалів ці підходи можна розділити на дві основні групи: спікання або сплавом металевих порошків і наплавлення з подачею витратних матеріалів (присадних дротів і т.п.) [1, 2, 3, 4].

Методи які використовують порошкові витратні матеріали, дозволяють отримувати складні геометричні об'єкти з дуже високою точністю виконання, зокрема для отримання тривимірних пористих конструкцій. Такого типу конструкції успішно використовуються в медицині як імплантати. Ще одною перевагою використання порошкових матеріалів є незначні залишкові напруження, через нагрів матеріалу не до високих температур. Але швидкість процесу наплавлення є невисокою, що обмежує використання даної технології для середньо- і великогабаритних конструкцій. Також механічні властивості

порошку нижчі за властивості присадкового матеріалу, що впливатиме на міцність і жорсткість самої деталі чи конструкції.

З використанням технології на основі присадних дротів, швидкість виробництва значно вище. Крім того, в таких випадках ефективність використання матеріалу на виготовлення деталей також вище та може досягати 100% [4]. У даній роботі ми будемо надалі розглядати технологію на основі використання присадкового дроту.

Джерелом нагріву, який використовують з присадним дротом, виступає лазер, електронний промінь або електрична дуга. Підходи на основі лазерних технологій зараз мають велике розповсюдження, у першу чергу завдяки їх точності [3, 6], хоча і їх енергетична ефективність мала (2-5%). Електронно-променеве наплавлення володіє більшим ККД, але вимагає високого вакууму. Дослідження структури металу свідчать, що електронно-променеве наплавлення дозволяє отримувати деталі із структурою металу наплавлених шарів, близькою до структури основного матеріалу. Тому дана методика є найбільш новітньою і перспективною в виробництві деталей адитивною технологією. Енергетична ефективність дугових процесів є найбільшою в порівнянні з лазерними і електронно-променевими технологіями. У даній праці ми будемо розглядати електронно-променеве наплавлення матеріалу.

Як зазначалось вище, основним недоліком підходів що використовують наплавлення присадковим дротом, є виникнення значних залишкових напружень і деформацій [13]. Високі залишкові напруження можуть знижувати експлуатаційні характеристики отриманих деталей, а залишкові деформації можуть призводити до неточності геометрії, до того, що деталі доведеться пускати в брак. Також проблемою використання присадкового дроту є виникнення нерівномірності механічних властивостей наплавленого матеріалу по висоті готової деталі, через різницю у швидкостях охолодження на верхніх і нижніх шарах в процесі наплавлення.

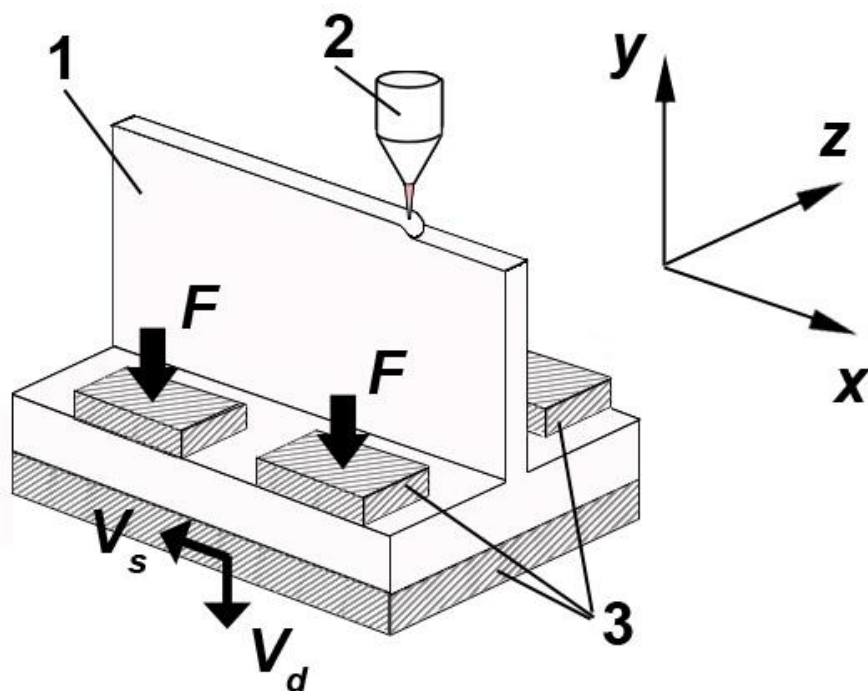
Оптимізація адитивного виробництва на основі застосування математичного моделювання є перспективним напрямом, адже лише

аналітичним методом можна отримати універсальні параметри технології, які дозволять отримати експлуатаційні характеристики наплавленої деталі, задовольняючими технічним вимогам, і не гіршим за характеристики деталей, виготовленими традиційним методом [5]. В даний математичне моделювання адитивної технології бурхливо розвивається.

## **1.2. Огляд сучасних проблем виготовлення деталей адитивним методом та аналіз літератури**

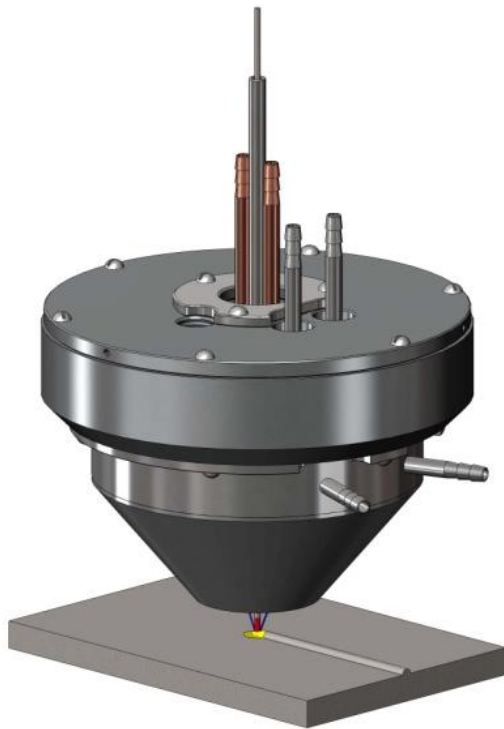
### **1.2.1. Аналіз технології пошарового електронно-променевого наплавлення присадковим дротом**

З експериментальних робіт дослідження процесу електронно-променевого наплавлення xBeam 3D Metal Printer деталей трьовимірної геометрії складної форми, на прикладі зразків невеликого розміру, зроблених наплавленням по спіралі, та послідовно, один на одній, отримано важливі результати по вивченню характерних особливостей технологічного процесу [6]. Технологічна схема на прикладі багатошарового трьовимірного формування виробу з тавровим перерізом представлена на рис. 1. Процес, що проходить в умовах вакууму -1го порядку, дозволяє позбутися перемішування металу домішками кисню і / або азотом, що в свою чергу дозволяє досягти структури без утворення внутрішніх раковин. Підкладка формованого виробу, яка у випадку наплавлення деталей таврового профілю являє собою нижню полку профілю, закріплена в силовому оснащенні, яке утримує її разом із рухомою платформою, в момент наплавлення, коли джерелі нагріву залишається нерухомим. Платформа рухається із швидкістю  $V_s$  в горизонтальній площині і переміщує періодично, після наплавлення кожного валика, в вертикальному напрямку зі швидкістю  $V_d$ . Слід відмітити, що швидкість подачі присадкового дроту, та швидкість горизонтального переміщення пластини можуть відрізнятись на незначні величини, що буде призводити або до викладення матеріалу на підкладку «розтягнутим» по довжині, або ж навпаки, «стисненим». У рамках нашого моделювання адитивної технології, ми будемо вважати, що швидкості подачі дроту і переміщення пластини будуть рівними.



**Рис. 1. Технологічна схема процесу електронно-променевого багатошарового формування зразків таврового перетину**

Джерело зварювання складається з систем фокусування променя і подачі присадного дроту (Рис. 2). Потік електронів з електронно-променевої пушки плавить метал, та розігріває підкладку, забезпечуючи сплавлення двох шарів. Фокусування електронного променя проводиться таким чином, щоб промінь мав форму гострого конуса, що сходиться максимально близько до поверхні формованої конструкції. Це дозволяє реалізувати ефективно і досить рівномірне розплавлення присадкового дроту без істотного її перегріву, а також супутній підігрів області наплавлення для активації поверхні твердого металу перед його контактом з рідким присадним матеріалом. Висота між голівкою електронної пушки, та підкладкою, також може варіюватися, що впливає на розсіювання потоку тепла з електронно-променевої пушки при наплавці. Є можливість наплавляти деталь в декілька паралельних проходів, і електродами різного діаметру, задля варіювання товщини сформованого виробу. У даній роботі ми розглядаємо формування деталі в один прохід.



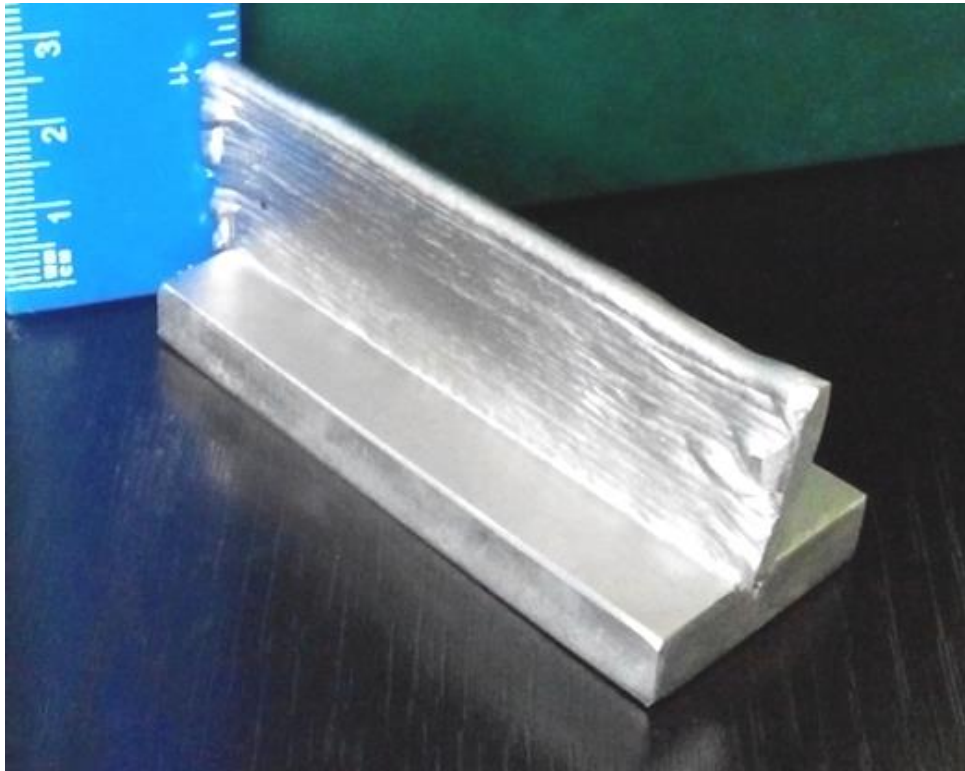
**Рис. 2. Схема модуля електронно-променевого нагріву**

Як показали експериментальні випробування, виріб під час пошарового наплавлення отримав певну залишкову згинальну деформацію в поздовжньому напрямку в результаті утворення зварювальної усадки металу в області наплавки. Крім того, торцеві області характеризуються нерегулярною структурою стінки профілю в результаті нерівномірності нагріву при наплавленні, а механічні властивості та розмір зерна матеріалу по висоті зразка може відрізнятися. Одним з переваг використовуваної технологічної схеми є можливість програмного контролю тепловкладення при наплавленні, що дає широкі можливості оптимізації технологічних параметрів даного процесу. Також, ефективним методом оптимізації зазначеного процесу є варіювання часу затримки між наплавленням кожного з валиків, а також раціональний вибір способу і ступеня попереднього підігріву.

У даній роботі ми розглядаємо таврові зразки, наплавлені на велику (пластину) та маленьку (прутки) підкладки (рис. 3 а, б)



(a)



(б)

**Рис. 3. Зразки з маленькою (а) та великою (б) підкладками.**

Параметри наплавлення приведені в таблиці 1.



**Таблиця 1. Параметри наплавлення.**

Параметр	Значення	Примітки
Присадковий матеріал	титановий пруток діаметром 1,6 мм	титан марки ВТ6
Матеріал підкладки	титанова плита 8×30×70 мм	титан марки ВТ6
Робочий газ	гелій	
Вакуум	$5 \times 10^{-1}$ Па	
Прискорююче напруження	15 кВ	
Струм електронного променю	300 мА	
Потужність електронного променю	4,5 кВт	
Швидкість подачі присадкового дроту	14 мм/с	
Швидкість по осі X	14 мм/с	
Переміщення по осі Y перед кожним новим наплавленням шару	0,5 мм	
Кількість наплавлених шарів	37	

### **1.2.2. Висновок за статтею**

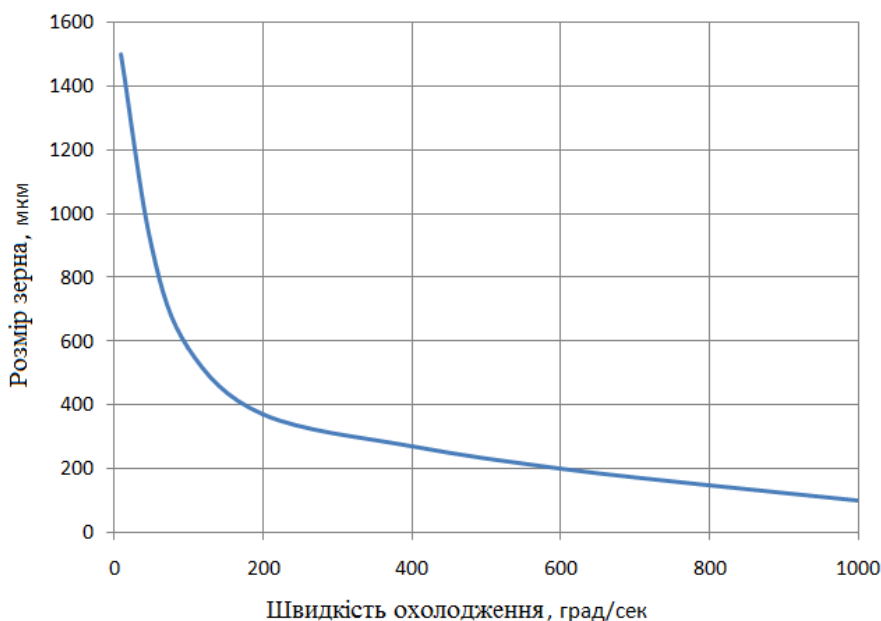
Аддитивна технологія електронно-променевого наплавлення титановим присадковим дротом є перспективною альтернативою традиційним методам виробництва. Джерело зварювання складається з електронно-променевої пушки та системи подачі присадкового дроту. Після наплавлення, у деталі виникають залишкові напруження на деформації, що може призводити до відбракування деталі. Математичне моделювання адитивного процесу є перспективним напрямком розвитку для оптимізації технологічного процесу.

### 1.2.3. Механічні властивості титанового сплаву ВТ6

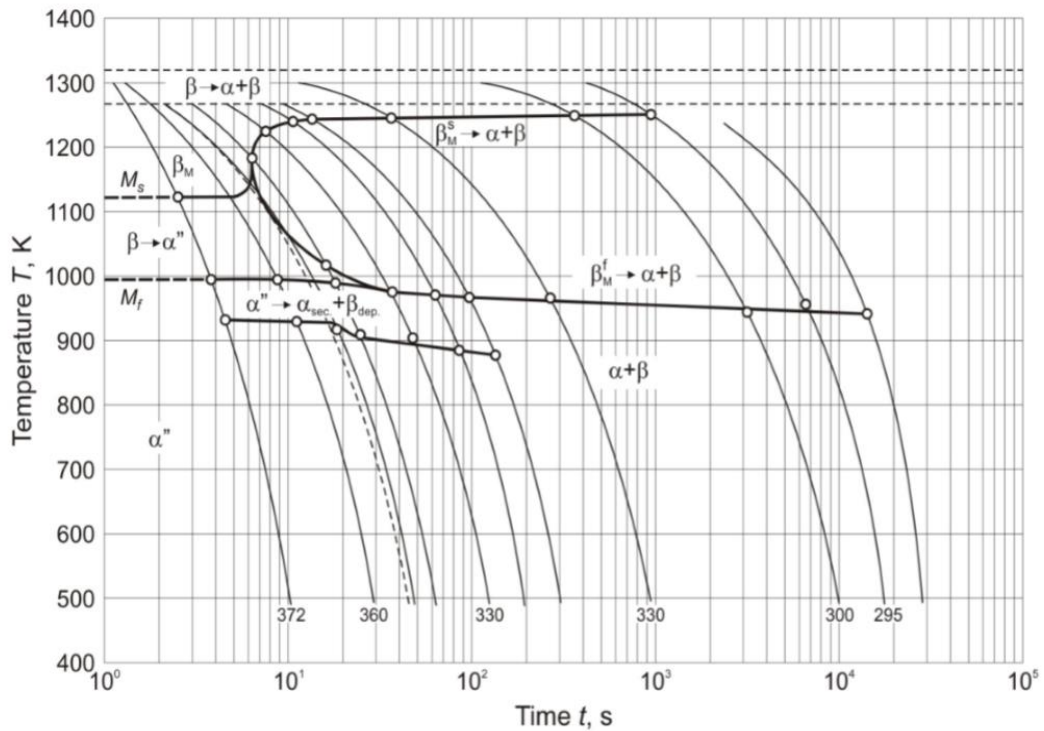
Механічні властивості матеріалу на пряму залежать від його мікроструктури. В цілому експлуатаційні характеристики кращі у структурі з меншим розміром зерна. Основним параметром, що визначає розмір зерна є швидкість охолодження [7]. Залежність розміру зерна від швидкості охолодження представлена на рис. 4 [8].

Зі збільшенням швидкості охолодження, після проходження точки рекристалізації, з кожного стану відбувається подрібнення структурних складових. На рис. 4 показано зміну розміру зерна для титанового сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V), в залежності від швидкості охолодження.

Для визначення швидкості охолодження сплаву, використовуємо діаграму поліморфних перетворень. Для даного дослідження інтерес представляє діапазон температур, при якому відбуваються поліморфні перетворення. Бачимо з діаграми на рис. 4, що поліморфне перетворення титану ВТ6 відбувається в діапазоні від 1100-1250 градусів до 500 градусів (рис. 5) [9].



**Рис.4 Розрахункове співвідношення між розміром зерна і швидкістю охолодження в сплаві Ti-6Al-4V**



**Рис. 5. Діаграма поліморфних перетворень сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V) при охолодженні.**

Механічні властивості двофазних титанових сплавів сильно залежать від морфології конкретних фаз, що в свою чергу впливає на міцність і пластичність матеріалу. Уточнення мікроструктури, з урахуванням фазового складу матеріалу є актуальною на даний час проблемою.

Тож, механічні характеристики титанового сплаву ВТ6 залежать не лише від розміру зерна, а і від співвідношення кількості  $\alpha$  фази в  $\alpha + \beta$  сплаві [10]. Відсоткове співвідношення фазових складових також залежить від швидкості охолодження. Чим більше зміст  $\alpha$  фази - тим нижче межа плинності (рис. 6). Але при пошаровому електронно-променевому наплавленні, за рахунок низьких тепловкладень, і високих швидкостей руху джерела нагріву, можливе досягнення досить високих швидкостей охолодження наплавленого матеріалу, який буде сприяти утворенню мартенситної мікроструктури з вмістом  $\alpha''$  фази. Основним параметром, що впливає на вміст  $\alpha''$  фази, є також швидкість охолодження. Як видно з рисунку 7, при швидкостях охолодження вище за 410 град/с, ми отримуємо повністю мартенситну структуру. Залежність механічних властивостей від вмісту  $\alpha''$  фази, можна побачити на рисунку 8 [14].

Quench delay (sec)	Primary $\alpha$ (%)	Transformed $\beta$ (%)	UTS (MPa)	YS (MPa)	Hardness (HRC)
30	30	70	1073	1034	37.2
50	49	51	1006	998	35.6
70	67	33	993	950	32.5

Рис. 6. Залежність механічних властивостей (границі міцності, границі текучості, мікротвердості) від кількості  $\alpha$  фази в  $\alpha + \beta$  сплаві

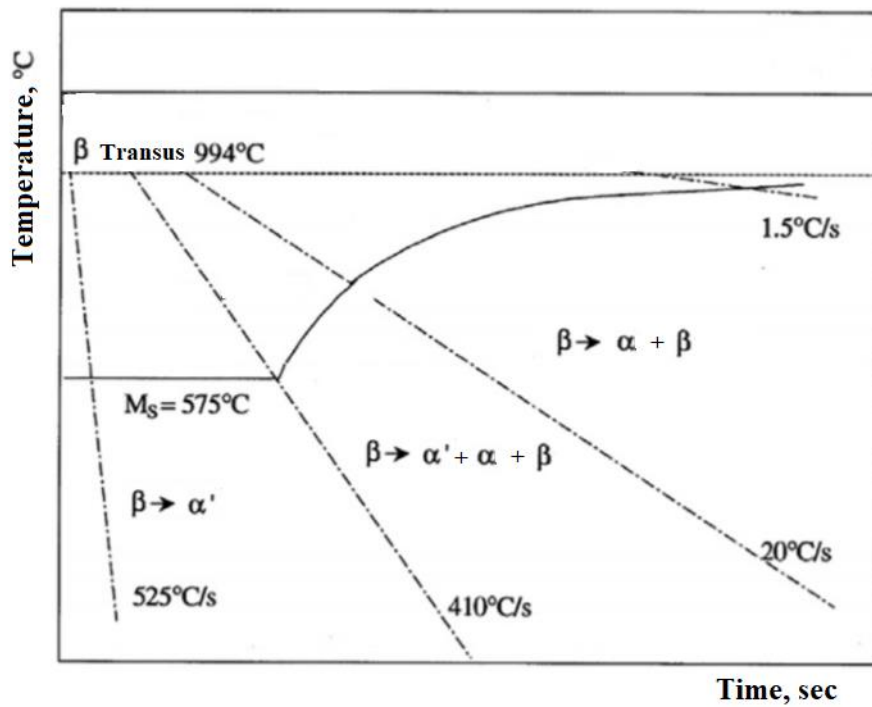


Рис. 7. Залежність мікроструктури матеріалу від швидкості охолодження сплаву

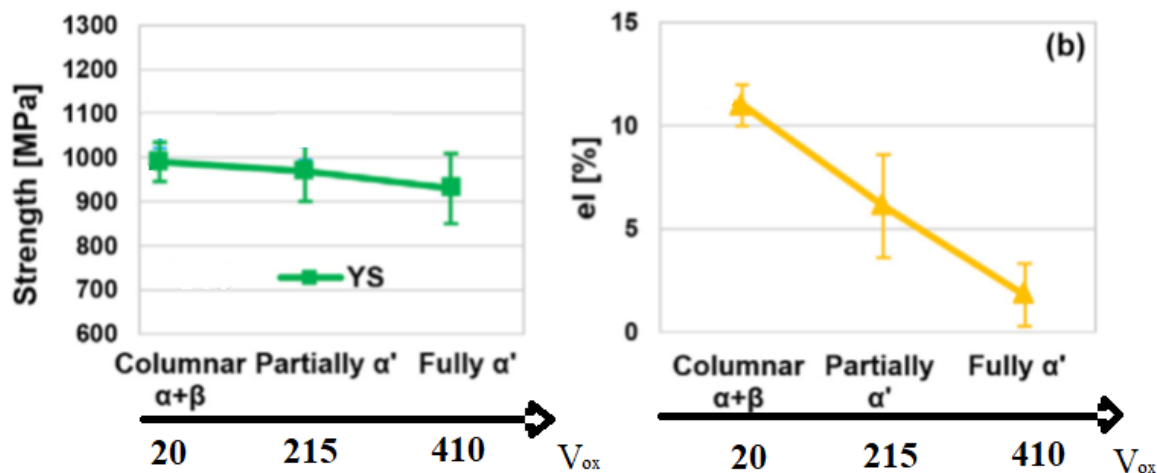


Рис. 8. Залежність механічних властивостей (границі текучості і відносного видовження) від мікроструктури матеріалу

В аналітичному вигляді, залежність розміру зерна від швидкості охолодження можна описати рівнянням 1 [9, 14].

$$\begin{cases} d_{\text{зерна}} = 10^{[3,87 - 0,62 \times \lg(V_{ox})]} \text{ мкм, при } V_{ox} > 6 \text{ град/с} \\ d_{\text{зерна}} = 2500 \text{ мкм, при } V_{ox} < 6 \text{ град/с} \end{cases} \quad (1)$$

А залежність межі текучості і відносного видовження від розміру зерна та кількості  $\alpha'$  фази, з урахуванням вище сказаного – рівняннями 2 і 3 [11, 14].

$$\begin{aligned} \sigma_T &= \sigma_0 + 1,56 \times V_{ox} - 100 \times v_{\alpha'} \text{ МПа, где} \\ \sigma_0 &= 905 \text{ Мпа} \\ V_{ox} &\text{ – скорость охлаждения} \\ v_{\alpha'} &\text{ – количество } \alpha' \text{ фазы} \end{aligned} \quad (2)$$

$$\delta = 11 - 9v_{\alpha'} \quad (3)$$

Оптимізація параметрів тепловкладення, та їх вплив на механічні властивості матеріалу, і як наслідок, на міцність виготовленої деталі, є однією з основних задач математичного моделювання технології.

#### 1.2.4. Висновок за статтею

Параметри тепловкладення при процесі наплавленні значно впливають на отриману мікроструктуру наплавлених шарів, та зону термічного впливу, а отже і на механічні властивості матеріалу. Основні параметри, явпливають на механічні властивості титану ВТ6: розмір зерна і кількість  $\alpha''$  та  $\alpha$  фази у  $\alpha + \beta$  сплаві. Математичне моделювання оптимізації параметрів тепловкладення при наплавленні дозволяє отримати вироби з задовільними для експлуатації механічними властивостями .

## **2. РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ ТЕПЛОВИХ ПРОЦЕСІВ ПРИ ПОШАРОВОМУ ФОРМУВАННІ ЗРАЗКУ**

### **2.1. Методика розв'язку задачі адитивного наплавлення, за допомогою методів математичного моделювання фізичних процесів**

Для розв'язку задачі знаходження температурних полів у процесі наплавлення, і залишкових напружень та деформацій, після його завершення, використовувався метод розбиття геометричної моделі на сітку скінченних кубічних елементів. Розв'язок задачі виконувався завдяки програмному забезпеченню, що використовує чисельні методи, реалізовані завдяки системі комп'ютерного автоматизованого інжинірингу. Розв'язок задач теплопровідності і напружено-деформованого стану металу в процесі попереднього підігріву, подальшої наплавлення аж до охолодження виробу та зняття технологічного оснащення проводився на кубічних сітках розбиття. На кожному етапі простежування стану металу змінювалася форма виробу відповідно до швидкості наплавлення і геометрії сформованих при цьому валиків. Кінетика температурного поля має кінцеві ефекти у місцях початку та кінцю проходу по валику. Але у середній зоні деталі, за рахунок високих швидкостей наплавлення при наплавці отримано однакові параметри тепловідводу, тож доцільно використовувати двовимірну постановку задачі знаходження теплових полів, задля більш раціонального використання ресурсу і часу на розрахунок.

### **2.2. Математична модель температурних полів у процесі наплавлення**

З метою вивчення характерних особливостей кінетики температурного поля конструкційного елементу з титанового сплаву в процесі його електронно-променевого наплавлення були використані методи математичного моделювання. Моделювання проводилося на прикладі тривимірного зразка таврового перерізу, стінка якого сформована адитивним методом.

Відповідно необхідно було провести чисельний аналіз можливих шляхів оптимізації параметрів тепловкладення при електронно-променевому формуванні стінки з титанового сплаву, з метою забезпечення рівномірності



швидкостей охолодження матеріалу при формуванні виробу і під час його охолодження.

Була розроблена тривимірною скінчено-елементна модель для чисельного прогнозування кінетики тривимірного температурного поля таврового зразка з титанового сплаву ВТ6 з урахуванням пошарового формування геометрії виробу. На кожному етапі простеження стану матеріалу змінювалася форма виробу відповідно до швидкості наплавлення і геометрії формування наплавлених слів. Також була розроблена двовимірною модель для розв'язку задачі знаходження кінетики температурного поля, швидкостей охолодження, мікроструктурного складу, розміру зерна і механічних властивостей матеріалу, в його поперечному перерізі, що скоротило час на розв'язок температурної задачі приблизно в 10 разів.

Для чисельного аналізу кінетики температурного поля  $T(x, y, z)$  від часу  $t$  використовувався скінчено-елементний розв'язок тривимірного нестационарного рівняння теплопровідності:

$$c\gamma(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla [\lambda(T) \cdot \nabla T] \quad (4)$$

де  $c\gamma$ ,  $\lambda$  - питома теплоємність і теплопровідність матеріалу, відповідно.

Граничні умови, необхідні для вирішення задачі (4), залежать від природи відтоку тепла з поверхні виробу. Так, в області контакту з технологічним оснащенням відтік тепла може бути описаний законом Ньютона про теплообмін контактуючих поверхонь, тоді як на вільній поверхні характеризується тепловим випромінюванням (закон Стефана-Больцмана) з додатковим вкладенням енергії з торця виробу, при розміщенні там джерела нагріву. Таким чином, граничні умови для вирішення задачі теплопровідності в даному випадку мають наступний математичний вираз:

$$-\lambda(T) \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = \begin{cases} \alpha_T \cdot (T - T_C), & \text{в області контакту з оснасткою} \\ \varepsilon \cdot \sigma_{SF} \cdot (T^4 - T_C^4) - q, & \text{на вільних поверхнях} \end{cases} \quad (5)$$

де  $n$  - нормаль до поверхні;  $\alpha_T$  – коефіцієнт тепловіддачі;  $T_C$  – температура навколишнього середовища;  $\varepsilon$  – ступінь чорноти матеріалу;  $\sigma_{SF}$  – константа Стефана- Больцмана;  $q$  – потік енергії електронно-променевого нагріву.

Розроблена модель може використовуватися для оптимізації параметрів тепловкладення при електронно-променевому формуванні стінки виробу з титанового сплаву з метою забезпечення якості сплаву шарів і рівномірності нагріву по товщині наплавленої стінки. Для реалізації цієї задачі був розроблений алгоритм оптимізації по характерним розмірам зони проплавлення (рис. 9), пошуком розв’язку методом послідовного наближення [5].

Запропоновано наступні умови для оптимізації швидкості наплавлення  $v_c$  і потужності джерела  $P$  за характерними розмірами зони проплавлення (Рис.9):

1) область значень  $v_c, t_d$

забезпечення сплаву між шарами

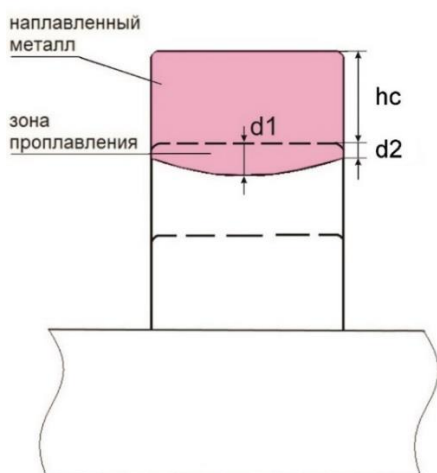
$$d1(v_c, t_d) > 0 \text{ та } d2(v_c, t_d) > 0$$

відсутність переплавлення попереднього шару

$$d1(v_c, t_d) < hc \text{ та } d2(v_c, t_d) < hc$$

2) критерій оптимізації  $v_c, t_d$

$$v_c, t_d = \{ \min(d1), \max(d2) \}$$



**Рис. 9** Характерні розміри зони проплавлення в поперечному перерізі наплавленого валика:  $d1$  – глибина проплавлення в центрі;  $d2$  - глибина проплавлення з краю;  $hc$  - висота наплавленого шару

### 2.3. Математична модель знаходження напружено-деформованого стану виробу при його наплавці та після повного охолодження

Зв'язок між компонентами тензорів напружень і деформацій може бути сформульований на основі узагальненого закону Гука з урахуванням температурних об'ємних змін і асоційованого закону пластичної течії:

$$\begin{cases} \Delta \varepsilon_{ij} = \Psi \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m) + \delta_{ij} \cdot (K \cdot \sigma_m + \Delta \varepsilon_T) - b_{ij} \\ b_{ij} = \frac{1}{2 \cdot G} (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m)^* + (K \cdot \sigma_m)^* \end{cases}, (i, j) = (x, y, z) \quad (6)$$

де  $K = \frac{1-2 \cdot \nu}{E}$ ,  $E$  – модуль Юнга,  $\nu$  – коефіцієнт Пуассона,  $G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)}$ ,

$\sigma_m = \frac{1}{3} \cdot (\sigma_{xx} + \sigma_{yy} + \sigma_{zz})$ ,  $\Delta \varepsilon_T$  – приріст деформацій, зумовлений термічним розширенням металу;  $\Psi$  – функція стану матеріалу, зумовлена умовою текучості, а саме

$$\begin{aligned} \Psi &= \frac{1}{2G}, \text{ коли } \sigma_i < \sigma_T(T), \\ \Psi &> \frac{1}{2G}, \text{ коли } \sigma_i = \sigma_T(T), \end{aligned} \quad (7)$$

$\sigma_i > \sigma_T(T)$  стан недопустимий,

де  $\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \cdot \sqrt{(\sigma_{xx} - \sigma_{yy})^2 + (\sigma_{xx} - \sigma_{zz})^2 + (\sigma_{yy} - \sigma_{zz})^2 + 6 \cdot (\sigma_{xy}^2 + \sigma_{xz}^2 + \sigma_{yz}^2)}$ .

Пластичні деформації визначаються з рівняння

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \left( \Psi - \frac{1}{2 \cdot G} \right) \cdot (\sigma_{ij} - \delta_{ij} \cdot \sigma_m), (i, j = x, y, z). \quad (8)$$

Реалізація умов (7) виконується на кожному кроці простеження, при цьому на кожному прирості по  $\Psi$  напруження  $\sigma_{ij}$  виводяться з (8) у вигляді

$$\begin{cases} \sigma_{ij} = \frac{1}{\Psi} \cdot \left( \Delta \varepsilon_{ij} + \delta_{ij} \cdot \frac{\Psi - K}{K} \cdot \Delta \varepsilon \right) + J_{ij} \\ J_{ij} = \frac{(b_{ij} - \delta_{ij} \cdot b) + \delta_{ij} \cdot \left( K \cdot \sigma^* - \frac{\Delta \varepsilon_T}{K} \right)}{\Psi} \end{cases}, \quad (9)$$

$$\text{че } \Delta \varepsilon = \frac{\Delta \varepsilon_{xx} + \Delta \varepsilon_{yy} + \Delta \varepsilon_{zz}}{3}, \quad b = \frac{b_{xx} + b_{yy} + b_{zz}}{3}.$$

Зв'язок між тензором  $\Delta \varepsilon_{ij}$  та вектором приростів переміщень  $\Delta U_i$  представляється у вигляді

$$\Delta \varepsilon_{ij} = \frac{\Delta U_{i,j} + \Delta U_{j,i}}{2}, \quad (10)$$

де кома відповідає диференціюванню, тобто у декартовій системі координат  $\{x, y, z\}$  за припущення гіпотези малих деформацій  $\Delta \varepsilon_{ij} \ll 1,0$ .

Розв'язувальна система алгебраїчних рівнянь щодо вектора приростів переміщень у вузлах кінцевих елементів на кожному кроці простеження і ітерації по  $\Psi$  визначається в результаті мінімізації функціоналу (варіаційний принцип Лагранжа)

$$\mathcal{E}_l = -\frac{1}{2} \cdot \sum_V (\sigma_{ij} + J_{ij}) \cdot \Delta \varepsilon_{ij} \cdot V_{m,n,r} + \sum_{S_p} P_i \cdot \Delta U_i \cdot \Delta S_p^{m,n,r}, \quad (11)$$

де  $\sum_V$ ,  $\sum_{S_p}$  – оператори суми по внутрішнім і поверхневим кінцевим елементам, відповідно;  $P_i$  - силовий вектор зовнішньої дії ( $i = x, y, z$ ).

Таким чином, система рівнянь, яка дозволяє отримати рішення відносно приросту вектору переміщень на кожному кроці простеження ітерації по  $\Psi$  для відповідного кінцевого елемента, має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial \Delta U_{m,n,r}} = 0; \\ \frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial \Delta V_{m,n,r}} = 0; \\ \frac{\partial \mathcal{E}_1}{\partial \Delta W_{m,n,r}} = 0. \end{array} \right. \quad (12)$$

Розв'язок зазначених задач нестационарної термопластичності згідно з наведеному математичному опису розроблялося шляхом чисельного простеження пружньо-пластичних деформацій, починаючи з етапу попереднього підігріву підкладки, наплавлення кожного валика аж до повного охолодження виробу та зняття технологічного оснащення, в рамках відповідного скінчено-елементного опису.

#### **2.4. Висновки за розділом:**

На основі отриманої моделі можна отримати розподіл температурних полів у процесі наплавлення виробу, та розподіл напружень і деформацій у процесі його наплавлення, та після повного охолодження. Розроблена модель також дозволяє варіювати параметри наплавлення, задля отримання оптимальної мікроструктури зразку, та зменшення залишкових напружень та деформацій, у порівнянні з початковими параметрами наплавлення.

### **3. РЕЗУЛЬТАТИ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПОШАРОВОГО НАПЛАВЛЕННЯ ТРИВИМІРНИХ ВИРОБІВ**

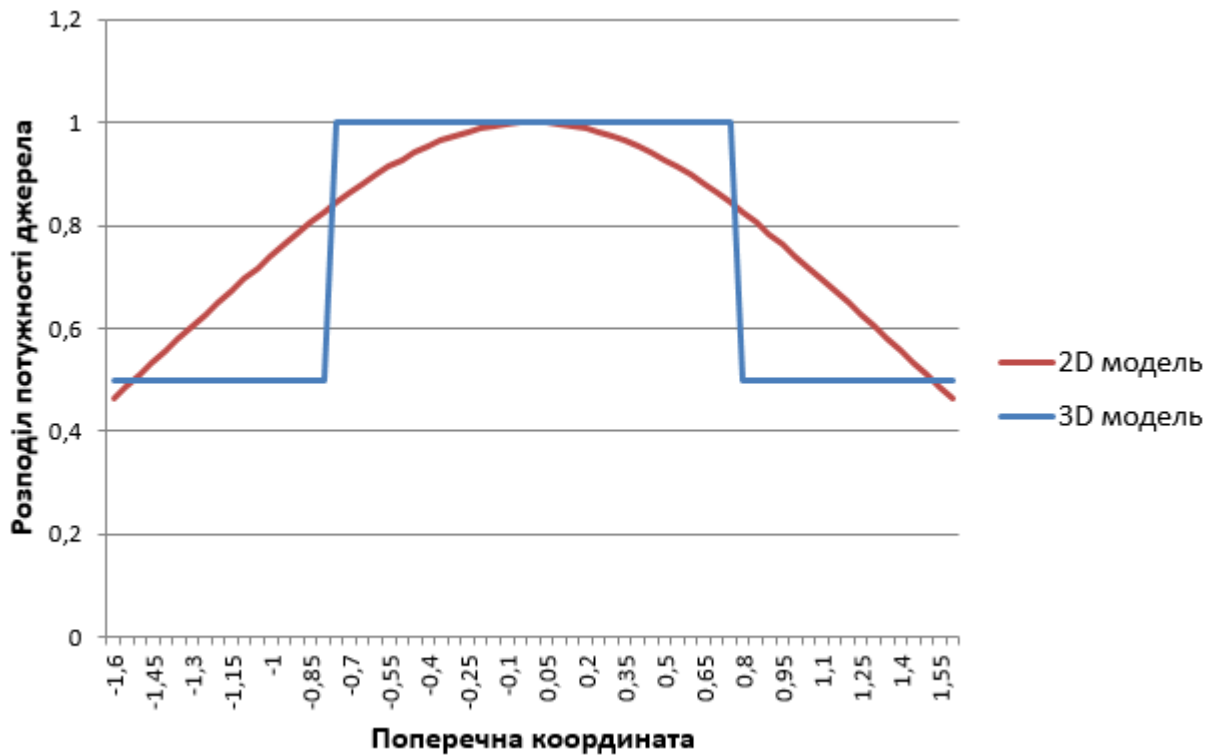
#### **3.1. Результати моделювання отриманих температурних полів у процесі наплавлення виробів**

Розглянутий технологічний процес моделювався на основі результатів лабораторних досліджень по наплавленні виробу таврового профілю з титанового сплаву, представленого на Рис.1. Основні параметри даного технологічного циклу наведені в Табл. 1.

Так, однією з основних задач, яка розглядалася на даному етапі досліджень - було вивчення потенційних можливостей досягнення стаціонарного температурного поля у виробі при наплавленні кожного з валиків. Це дозволить отримати сприятливі умови формування валиків, а також забезпечити рівномірність структурного стану металу по всьому перерізу виробу, і відповідно, ізотропність його фізико-механічних і експлуатаційних властивостей. Як показують результати математичного моделювання, згідно з викладеною вище методикою, при наплавленні валиків не спостерігається значного перегріву рідкого металу після того як він потрапляє на поверхню формованого виробу, що свідчить про ефективний відвід тепла в метал і навколишнє середовище. Це дозволяє отримувати достатній підігрів металу для сплавлення валиків і уникнути перегріву та надмірної текучості рідкого металу.

Як було зазначено вище (розд. 2.1.2.), при швидко рухаючомуся джерелі, є можливість використовувати двовимірну постановку теплової задачі, що суттєво підвищує (в десятки разів) швидкість розрахунку задачі. Точність розрахунку при цьому підвищується, завдяки можливості використання більш дрібної сітки розбиття, але з іншої сторони, не враховує кінцевих ефектів на початку і кінці наплавлення валику, що спричиняє зниження точності. Також, однією з переваг використання двовимірної моделі є можливість відтворення випромінювання

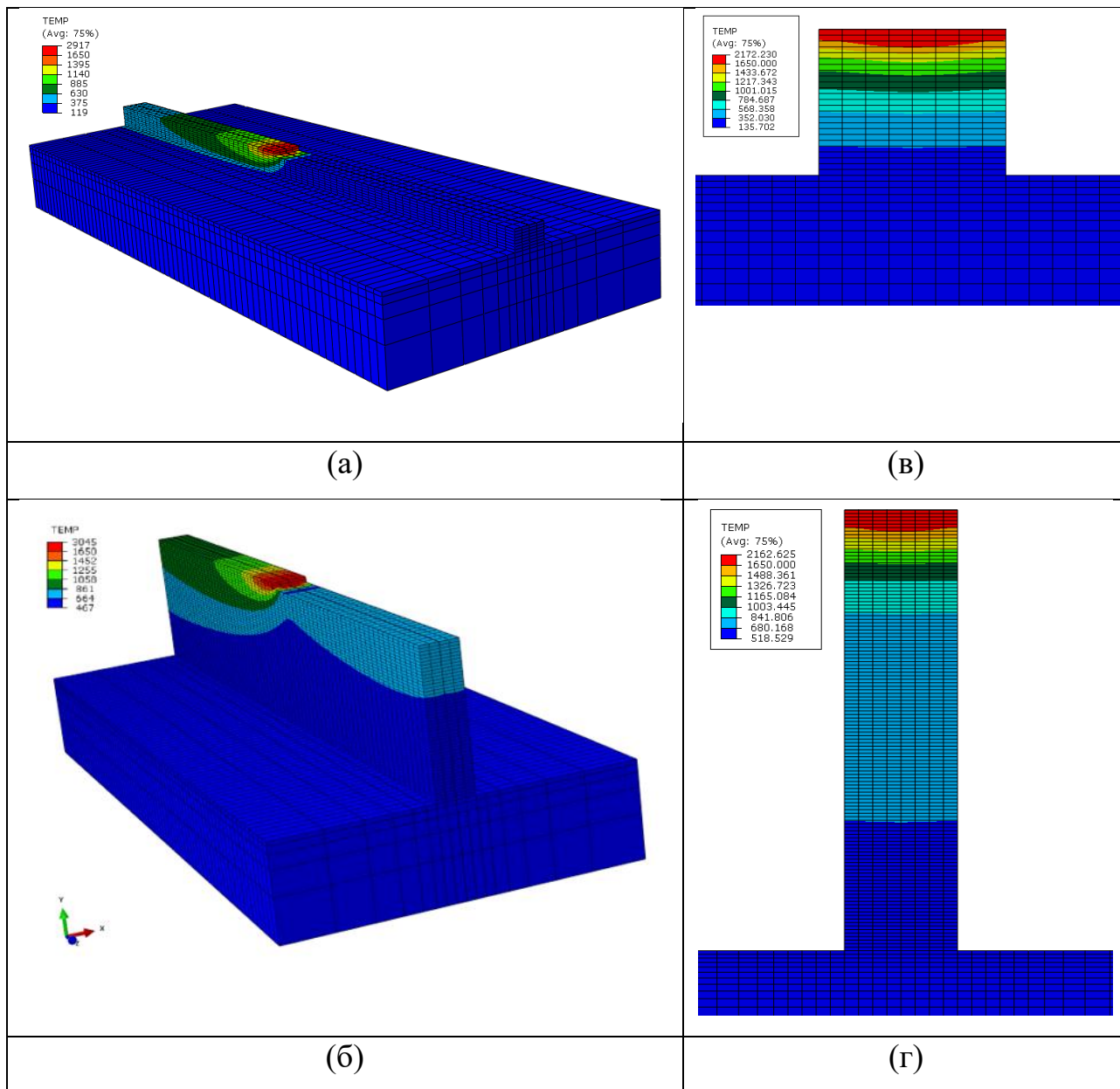
тепла від джерела нагріву за експоненційним розподілом по повздовжній координаті (рис. 10).



**Рис. 10. Порівняння змодельованого розподілу тепла від джерела по повздовжній координаті для двовимірної та трьовимірної моделей.**

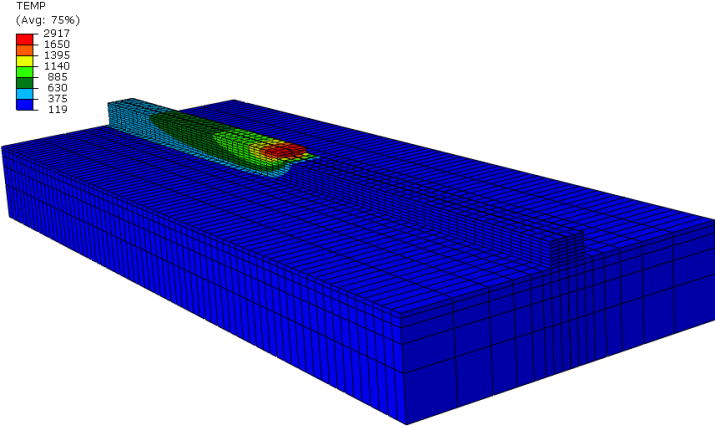
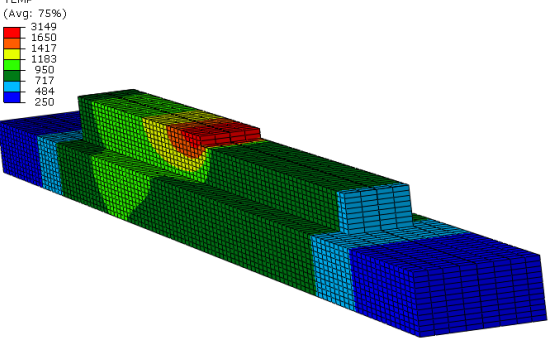
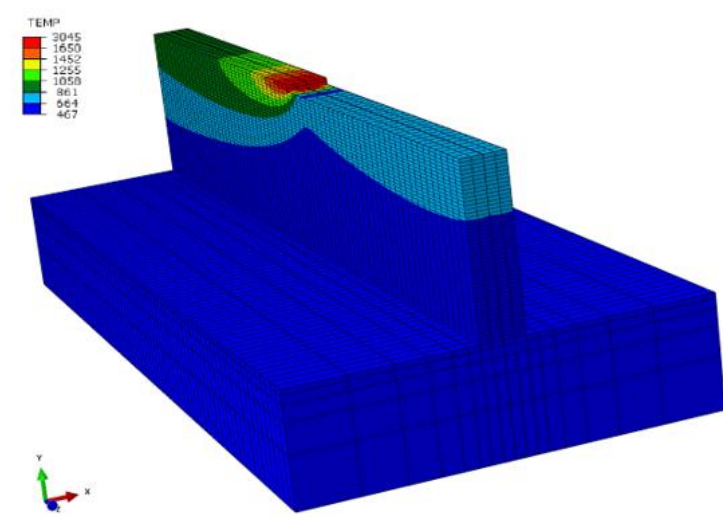
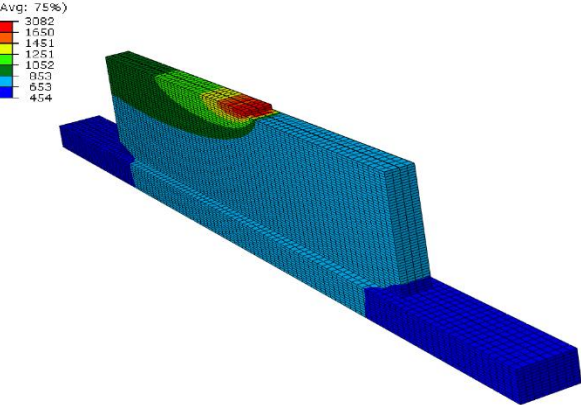
Порівняння результатів отриманих температурних полів для двовимірної та трьовимірної моделей, при процесі пошарового наплавлення матеріалу на різних шарах, на прикладі виробу з великою підкладкою представлені на рис 11.





**Рис. 11. Порівняння тривимірної (а, б) та двовимірної (в, г) моделей розподілів температурних полів у процесі наплавлення 5-го (а, в) і 25-го (б, г) шарів.**

Також, як вказано раніше (част. 1.2.1., рис. 3), було проведене порівняння наплавлення зразків на велику ( $8 \times 30 \times 70$  мм) та маленьку ( $3 \times 6 \times 110$  мм) підкладки (рис. 12). Як бачимо з результатів моделювання, зона проплавлення та ступінь розігріву вище у зразка з маленькою підкладкою, що пояснюється меншою кількістю металу в малій підкладці, а отже і більшим накопиченням тепла при процесі наплавлення [12].

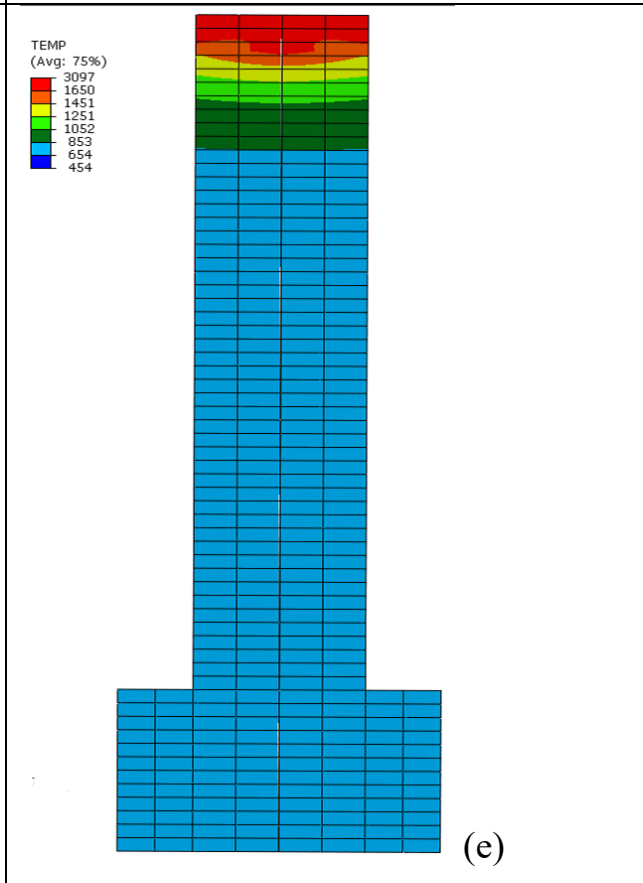
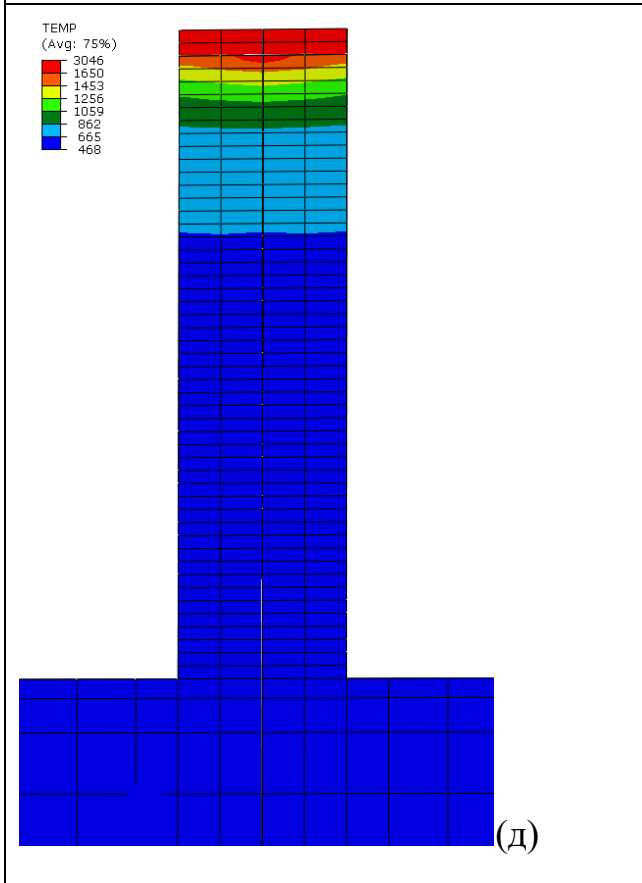
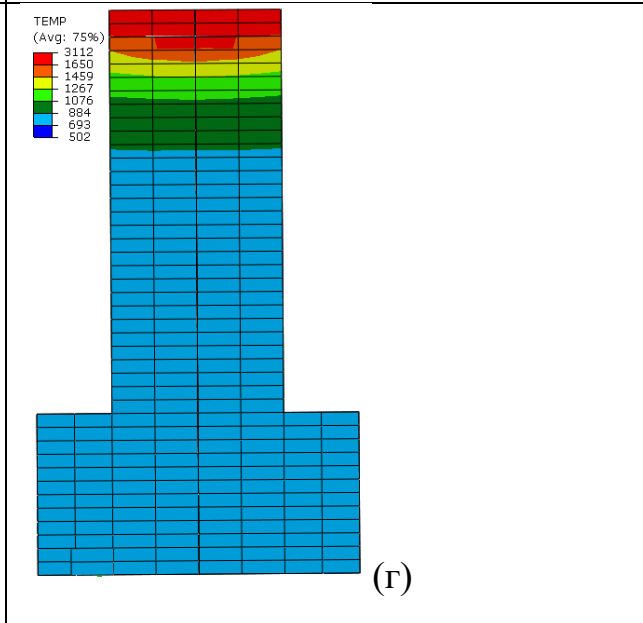
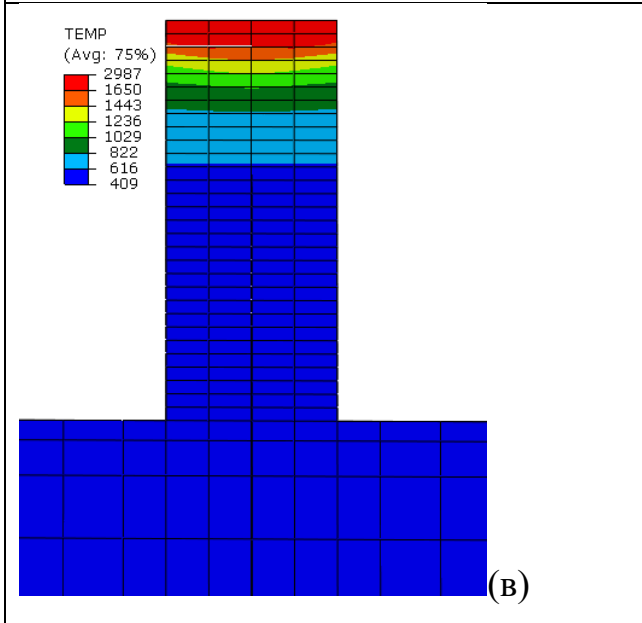
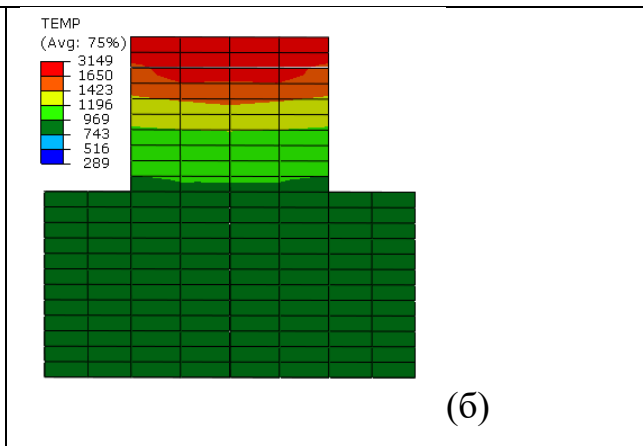
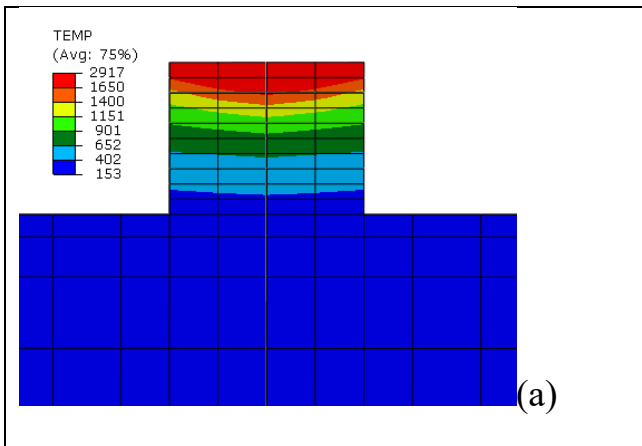
<p>TEMP (Avg: 75%)</p> 	(a)
<p>TEMP (Avg: 75%)</p> 	(b)
<p>TEMP</p> 	(B)
<p>TEMP (Avg: 75%)</p> 	(Г)

**Рис. 12. Порівняння розподілів температурних полів при наплавленні на велику (а, в) та маленьку (б, г) підкладки, для 5-го (а, б) та 25-го (в, г) валиків.**

Розроблена модель може використовуватися для оптимізації параметрів тепловкладення при електронно-променевому формуванні стінки виробу з титанового сплаву з метою забезпечення якості сплаву шарів і рівномірності нагріву по товщині наплавленої стінки. Для реалізації цієї задачі був розроблений алгоритм оптимізації по характерним розмірам зони проплавлення (рис. 9), методом пошуку розв'язків послідовними наближеннями (2.1.2)

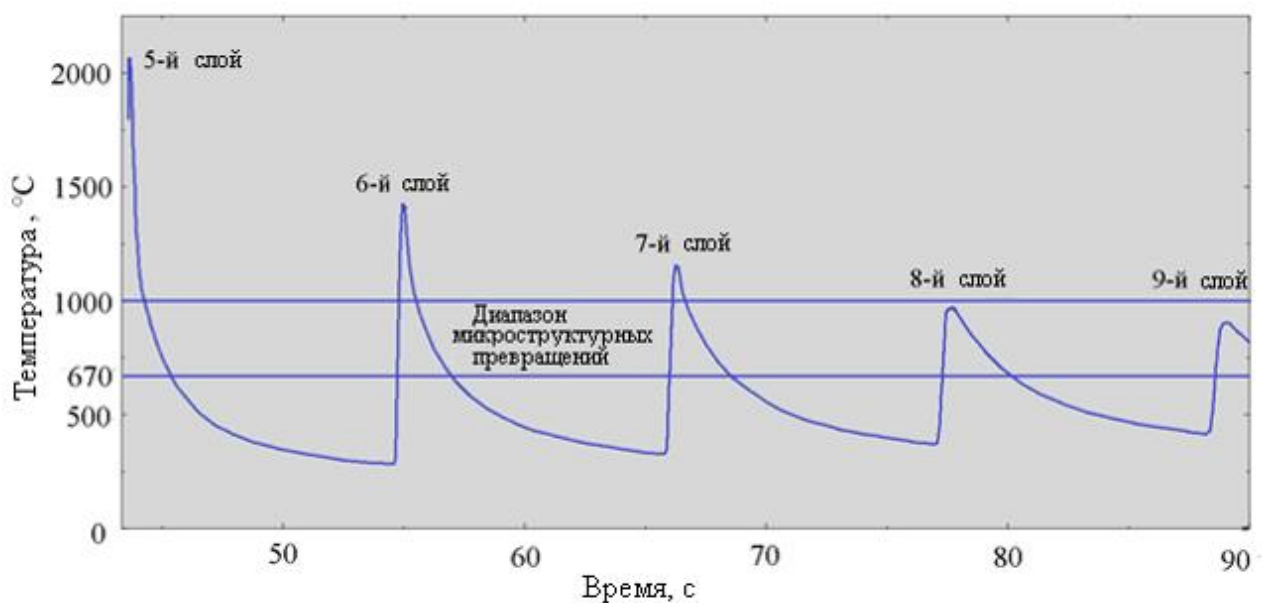
Як було зазначено, пошук оптимальних параметрів тепловкладення був проведений на основі характерних розмірів зони проплавлення металу при проході джерела через поперечний переріз (розділ 2.1.2., рис. 9). Отже, перед розв'язком задачі знаходження температурних полів, були перевірені, ітераційним методом, умови проплавлення матеріалу. Результати зображені на рисунку 13.

Як бачимо, у зразка з маленькою підкладкою зона проплавлення металу більша при однакових параметрах тепловкладення, ніж у зразка з великою підкладкою, що також можна пояснити більшим накопиченням тепла у процесі наплавлення.



**Рис. 13** Характерні зони проплавлення при проході джерела через поперечний переріз на 5-му (а, б), 15-му (в, г) і 25-му (д, е) шарах, на прикладі зразків з великою (а, в, д) і маленькою (б, г, е)

Також, при моделюванні процесу наплавлення були отримані результати щодо часу охолодження матеріалу у перерізі, після проходження через нього джерела нагріву, і побудовані термоцикли для точок поперечного перерізу на усіх шарах сформованого матеріалу (рис. 14).



**Рис. 14** Термоцикл у поперечному перерізі зразку, для точки на 5-му наплавленому шарі.

З отриманого термоциклу для наплавлення на 5-му шарі, приведеного на рисунку 14, можна зробити висновки щодо швидкості охолодження у кожній точці виробу, використовуючи отриману зміну в температурі при охолодженні, за часом. Перетворення мікроструктури відбувається у проміжку температури від 1000 °C до 670 °C, для титанового сплаву ВТ6. Матеріал при наплавленні п'ятого шару нагрівається і охолоджується у діапазоні мікроструктурних перетворень ще 2 рази, після наплавлення 5-го шару, завдяки проходженню джерела нагріву через даний перетин, під час наплавлення наступних шарів.

Останній цикл охолодження в зазначеному діапазоні визначає остаточну швидкість охолодження матеріалу. Інші проходи джерела не призводять до перевищення температури 1000 °С, тому мікроструктурних перетворення більше не відбувається.

**Висновок:** були отримані розв'язки задачі розподілу температурних полів при процесі наплавлення, методом скінченних елементів, для зразків з великою та малою підкладками. Були порівняні результати тривимірного і двовимірного моделювання температурної задачі, їх переваги та недоліки. Отримані зони проплавлення матеріалу для зразків з великою і малою підкладками. Розраховані термоцикли для усіх точок поперечного перерізу.

### **3.2. Результати моделювання напружено-деформованого стану зразку у процесі його наплавлення, та після його повного охолодження**

Залишкові прогини і внутрішні напруження в сформованому виробі можуть бути факторами, що обмежують застосування даної технології. Пластичні деформації даного зразку таврового профілю, в результаті поздовжньої усадки, можуть перевищувати допустимі, передбачені конструктивними рішеннями, що може призвести до відбракування виробу. В свою чергу, високі залишкові напруження знижують міцнісні характеристики виготовленого виробу, що впливає не тільки на міцність при статичних навантаженнях, але і на стійкість при втомі і циклічних навантаженнях. Для покращення експлуатаційних характеристик конструкцій, часто використовують термічну обробку. Але додатковий технологічний етап обробки виробів суттєво підвищує собівартість виробництва, до того ж, наприклад у аерокосмічній промисловості, не завжди є можливість провести термічну обробку деталі, через відсутність спеціального обладнання на орбіті.

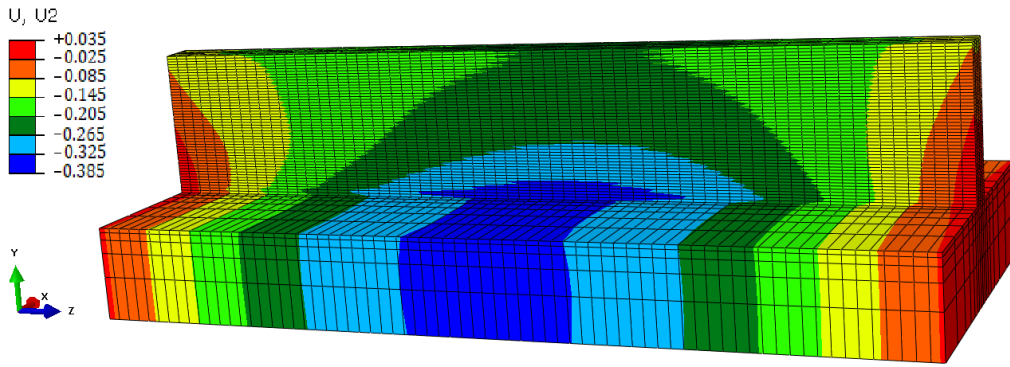
Тож був проведений аналіз напружено-деформованого стану зразку, задля визначення подальшої можливості його експлуатації, та дотримання технічних і технологічних вимог. Розв'язок задачі нестационарної термопластичності для визначення НДС таврового зразка в процесі його пошарового формування проводився шляхом чисельного дослідження пружно-пластичних деформацій, починаючи з етапу початку пошарового наплавлення шарів і до повного охолодження виробу, в рамках відповідної скінчено-елементної моделі [13].

В результаті моделювання були отримані розподіли залишкових напружень, деформацій і прогинів для зразків, наплавлених на велику і малу підкладки. Як видно з рисунку 15, після наплавлення 25 шарів і повного охолодження деталі, залишковий прогин на довжині 70 мм для зразка з великою підкладкою не перевищує 0,4 мм, при його загальній висоті 21 мм, а для зразка з малою підкладкою досягає 3 мм, при його висоті 16 мм. Найбільш високий рівень

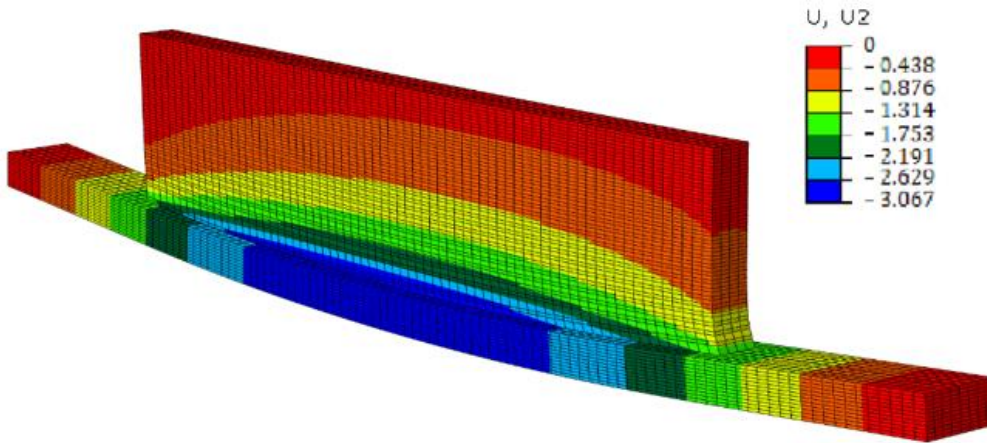


залишкових напружень має поздовжня компонента. В середній частині зразка, на віддаленні від крайових ефектів, розтягуючі напруження для зразка з великою підкладкою досягають 480 МПа (Рис. 16, а, б), а для зразка з малою підкладкою - 280 МПа (Рис. 16, в, г). Така різниця у залишковому НДС може пояснюватися різним поперечним перерізом для великої і маленької підкладок, а отже і різною їх жорсткістю, що впливає на деформівність деталі у процесі її наплавлення і під час охолодження. Як видно з отриманих результатів, завдяки більшій жорсткості великої підкладки вона zdeформувалася на порядок менше, ніж мала, але залишкові напруження у ній майже удвічі більші. Тож, можна зробити висновок що залишковий напружено-деформований стан зразків при пошаровому формуванні дуже сильно залежить від розмірів підкладки і геометрії сформованої деталі.

Навіть при електронно-променевої технології пошарового формування, яка характеризується відносно низькими деформаціями формозміни, можуть бути отримані неприпустимі залишкові деформації спотворення форми заготовок деталей.

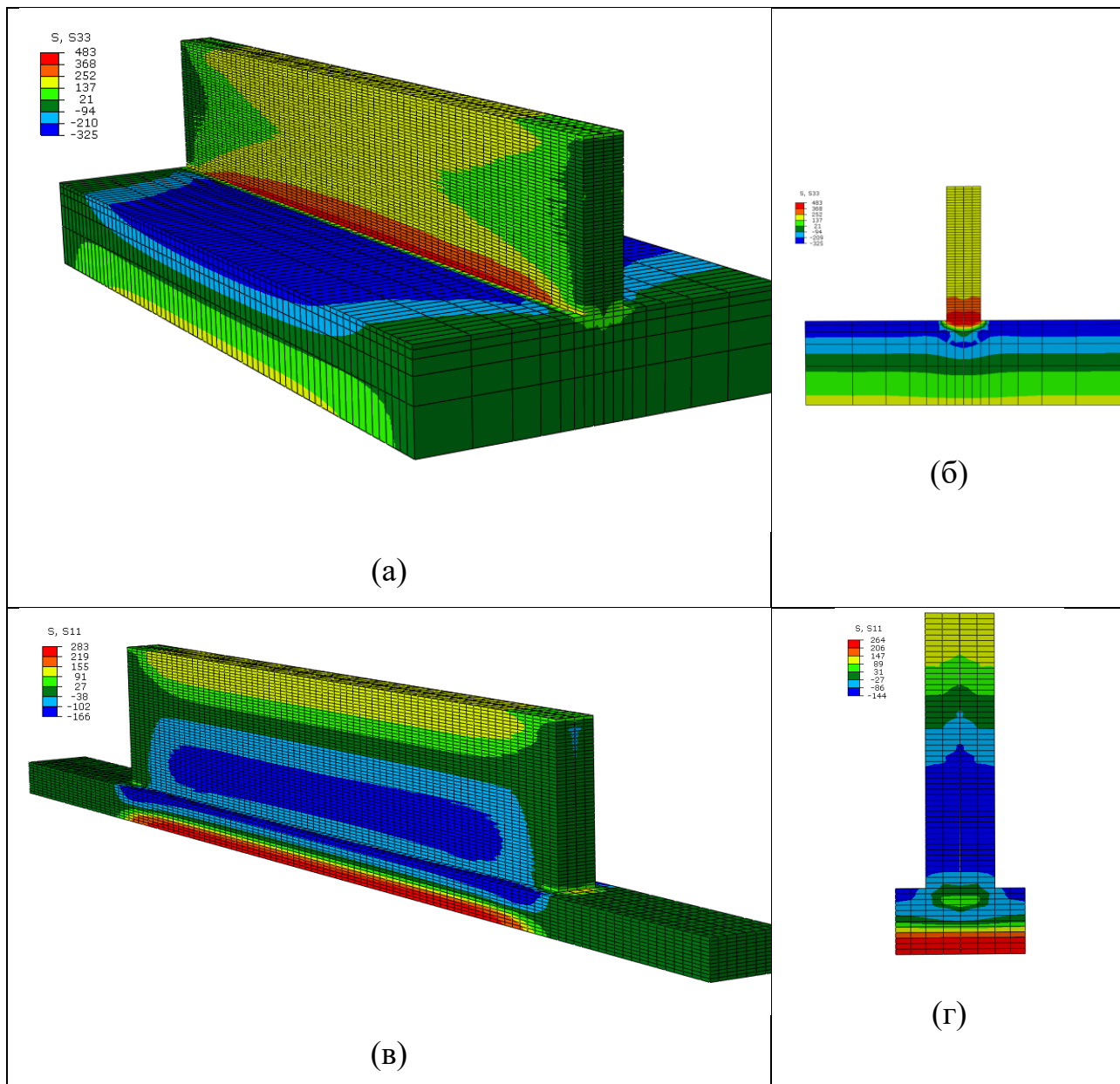


(a)



(б)

**Рис 15. Залишкові прогини, у вертикальному напрямі, зразків з великою (а) і малою (б) підкладками, після їх повного охолодження, мм.**



**Рис 16. Повздовжні компоненти залишкові напружень, зразків з великою (а, б) і малою (в, г) підкладками, після їх повного охолодження, МПа. Тривимірний вид (а, в) і у середньому поперечному перерізі (б, г).**

**Висновок:** отримано залишковий напружено-деформований стан для зразків з великою та малою підкладками. Порівняні залишкові прогини на напруження для цих зразків. Можна зробити висновок, що жорсткість перерізу виробу, тобто і його геометрія мають значний вплив на залишковий НДС. Занадто великий рівень залишкових прогинів та напружень може призводити до відбракування виробів.

### **3.3. Оптимізація технології пошарового наплавлення, з метою покращення механічних властивостей матеріалу, та його мікроструктури**

Поступове накопичення тепла в стінці розглянутого конструкційного елемента, під час її наплавлення, не дозволяє отримати рівномірну по висоті мікроструктуру і механічні властивості матеріалу виробу. Крім того, це може привести до перегріву верхніх частин конструкції і істотної зміни ширину наплавлення валика, що потребує великої кількості відрізаємого матеріалу у стружку при остаточному фрезуванні металу, для отримання необхідної геометрії профілю. До того ж механічна обробка такого твердого матеріалу як титан, є ресурсномістким, дорогим і витратним процесом.

Через нерівномірний відвід тепла для кожного з валиків по висоті, що пов'язано з наплавленням перших шарів на холодну підкладку, а останніх – на розігрітий метал, ми отримуємо занадто дрібне зерно на нижніх шарах наплавлення; і занадто велике зерно на останніх шарах наплавлення. Що в свою чергу спричиняє низьку пластичність матеріалу на нижніх шарах і низькі міцнісні характеристики – на останніх. Отримані характеристики матеріалу на нижніх шарах пояснюються високими швидкостями охолодження при наплавленні на холодну підкладку розпеченого металу, що призводить (рис. 7) як до занадто дрібного зерна, так і до великої кількості  $\alpha''$  включень; і занадто низькими швидкостями при наплавленні верхніх шарів на розпечений метал. На верхніх шарах має місце ефект надмірного накопичення тепла при наплавленні, в результаті чого нижня точка по осі температури, у термоциклі (рис. 14) падає нижче границі завершення поліморфного перетворення (670 °C) лише після повного охолодження матеріалу, але не під час наплавлення наступних шарів. Що призводить до занадто довгого часу остаточного охолодження матеріалу, що в свою чергу призводить до занижених швидкостей охолодження на верхніх шарах.

Як зазначено у пункті 3.1, з рис. 14 ми можемо отримати швидкості охолодження у кожній точці по висоті виробу (по довжині зразка швидкість охолодження не зазнає значних змін), а з рівнянь 1-3, пункту 1.2.3, ми можемо визначити розмір зерна і механічні властивості матеріалу в кожній точці, з отриманих на попередньому кроці швидкостей охолодження.

Отже, можна зробити висновок що математичне моделювання розміру зерна і швидкостей охолодження на кожному шарі виробу може бути використане для подальшої оптимізації параметрів процесу виробництва деталей. Варіювання параметрів процесу дає можливість отримання оптимальної мікроструктури по висоті деталі, з рівномірним розміром зерна та механічними властивостями матеріалу. Має сенс використовувати двовимірну постановку температурної задачі оптимізації параметрів теплового процесу, адже у такому випадку виграш у часі на розрахунок скорочується у десятки разів.

Одним з факторів якими можна оперувати при виборі раціональних параметрів наплавлення розглянутого зразка, є час затримки  $t$  між наплавленням кожного з валиків. З одного боку, збільшення часу затримки дозволяє більш рівномірно розподіляти тепло від кожного з наплавлення валиків, з іншого, зменшення  $t$  веде до зниження енергоємності розглянутого процесу і меншому накопиченню конструкційним елементом теплової енергії.

Зрозуміло, що оперування фактором  $t$  проводиться для виходу на стаціонарний режим процесу наплавлення, що має зробити стабільним відвід тепла при наплавленні, та отримання оптимальної і стаціонарної у часі швидкості охолодження по висоті зразка. Було порівняно час затримки  $t$  після наплавлення одного валику, і перед початком наплавлення іншого, для таких значень: 0 с, 5 с, 24 с та 60 с (рис. 17), і їх вплив на швидкість охолодження. Як бачимо, після 8-9 шару, для більшого часу затримки, швидкість охолодження починає спадати менш стрімко, а після 17-18 шарів, починає виходити на стаціонарний режим. Швидкість охолодження впливає на розмір зерна: її занадто низьке значення на верхніх шарах для режимів  $t = 0$  с і  $t = 5$  с, що виникає через вище описаний ефект

надмірного накопичення тепла на верхніх шарах, призводить до занадто великого розміру зерна на верхніх шарах наплавлення, при чому збільшення розміру зерна йде «скачком», починаючи з шару на якому відбувається даний ефект при наплавленні.

Механічні властивості матеріалу в свою чергу, залежить від розміру зерна. Як видно на рисунку, чим більший час затримки, а отже і менший розмір зерна, тим вища границя текучості матеріалу - що особливо помітно на верхніх шарах зразку, де має місце ефект більш рівномірного розподілу тепла при збільшенні часу затримки. Але, з іншого боку, більші швидкості охолодження на верхніх шарах негативно впливають на відносне видовження матеріалу через включення у ньому  $\alpha''$  мікроструктури, що особливо помітно для режиму з часом затримки  $t = 60$  с.

Отже, з отриманих результатів оптимізації часу затримки між наплавленням шарів, будемо вважати оптимальним режим з  $t = 24$  с, адже він призводить до значно вищої (завдяки більш стаціонарному відведенню тепла) границі текучості матеріалу на верхніх шарах, ніж режимами  $t = 0$  с і  $t = 5$  с, і вищого значення відносного видовження матеріалу, ніж режим  $t = 60$  с.

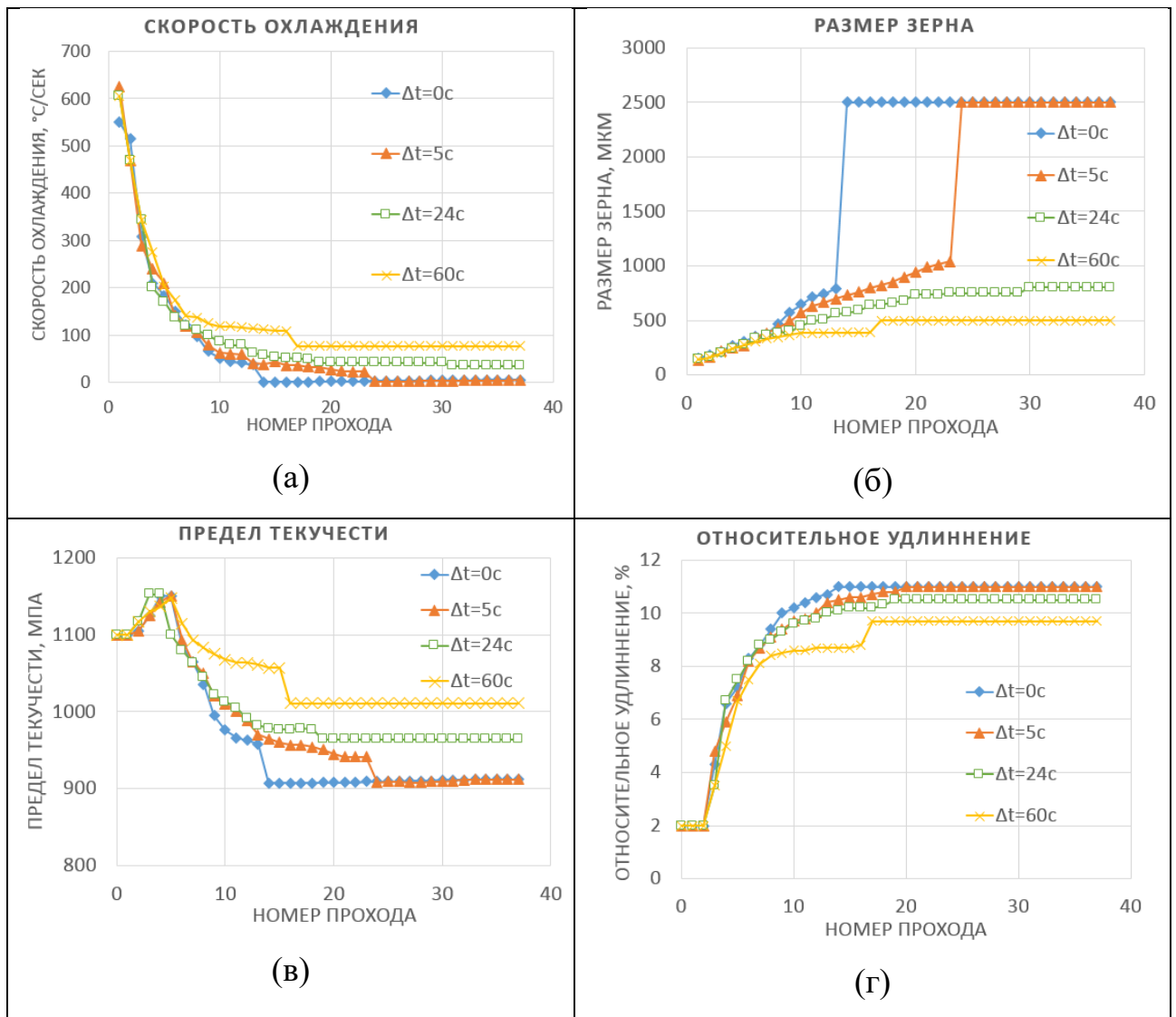
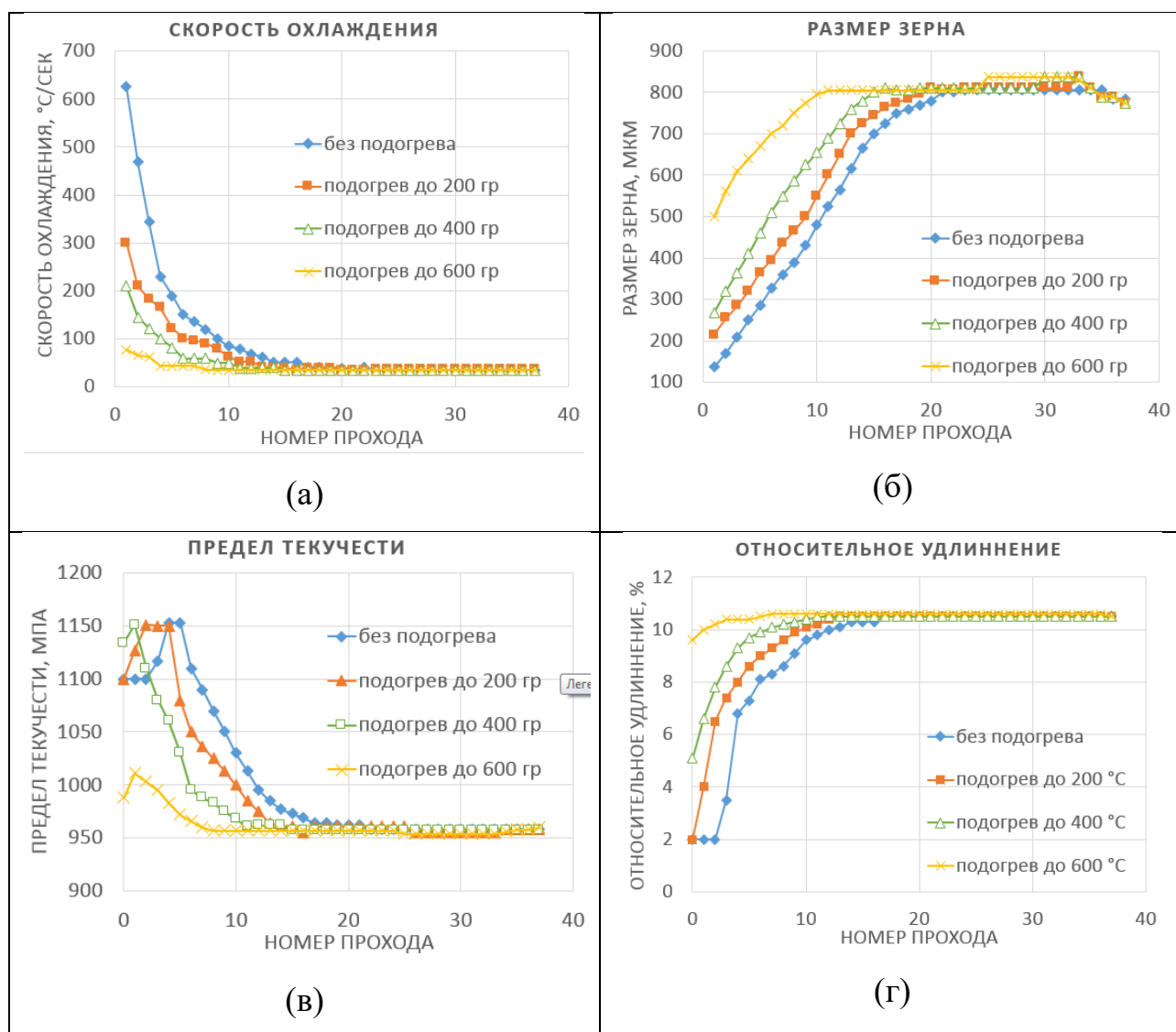


Рис. 17. Залежність швидкості охолодження (а), розміру зерна (б), межі текучості (в) і відносного подовження (г) від номера проходу (по висоті зразка) для різного часу затримки  $\Delta t = 0, 5, 24, 60$  сек між проходами.

Попередній підігрів підкладки є також одним з параметрів процесу наплавлення, яким можна оперувати для отримання оптимальної мікроструктури. Тому раціональним є комплексний підхід, що передбачає певний рівномірний підігрів підкладки перед наплавленням стінки і оптимізацію часу затримки для отримання регулярного температурного поля. Проаналізуємо вплив попереднього підігріву підкладки до різних температур при режимі з часом затримки між наплавленням валиків  $t = 24$  с. Попередній підігрів має вплинути на мікроструктуру на нижніх шарах наплавлення, адже тоді швидкості охолодження на них будуть розподілені більш рівномірно, через стаціонарний режим відведення тепла від наплавляємих шарів до підкладки. Як видно з



рисунку 18, підігрів підкладки до вищих температур, аж до температури 600 °С, близької до нижньої границі поліморфних перетворень, рис. 5 (підігрів вище температури поліморфних перетворень не має сенсу, адже тоді буде мати місце вище зазначений ефект надмірного накопичення тепла) призводить до значного зниження швидкостей охолодження на нижніх шарах, адже у такому разі тепло розподіляється більш рівномірно, і відразу виходить на стаціонарний режим. Відповідно, розмір зерна на нижніх шарах збільшується при підвищенні температури підігріву, а отже границя текучості зменшується. Але при цьому, через значно нижчі швидкості охолодження, спостерігається значне (в декілька разів) зменшення  $\alpha''$  мікроструктури на нижчих шарах, що призводить до істотного підвищення відносного видовження матеріалу при підвищенні температури попереднього підігріву підкладки.

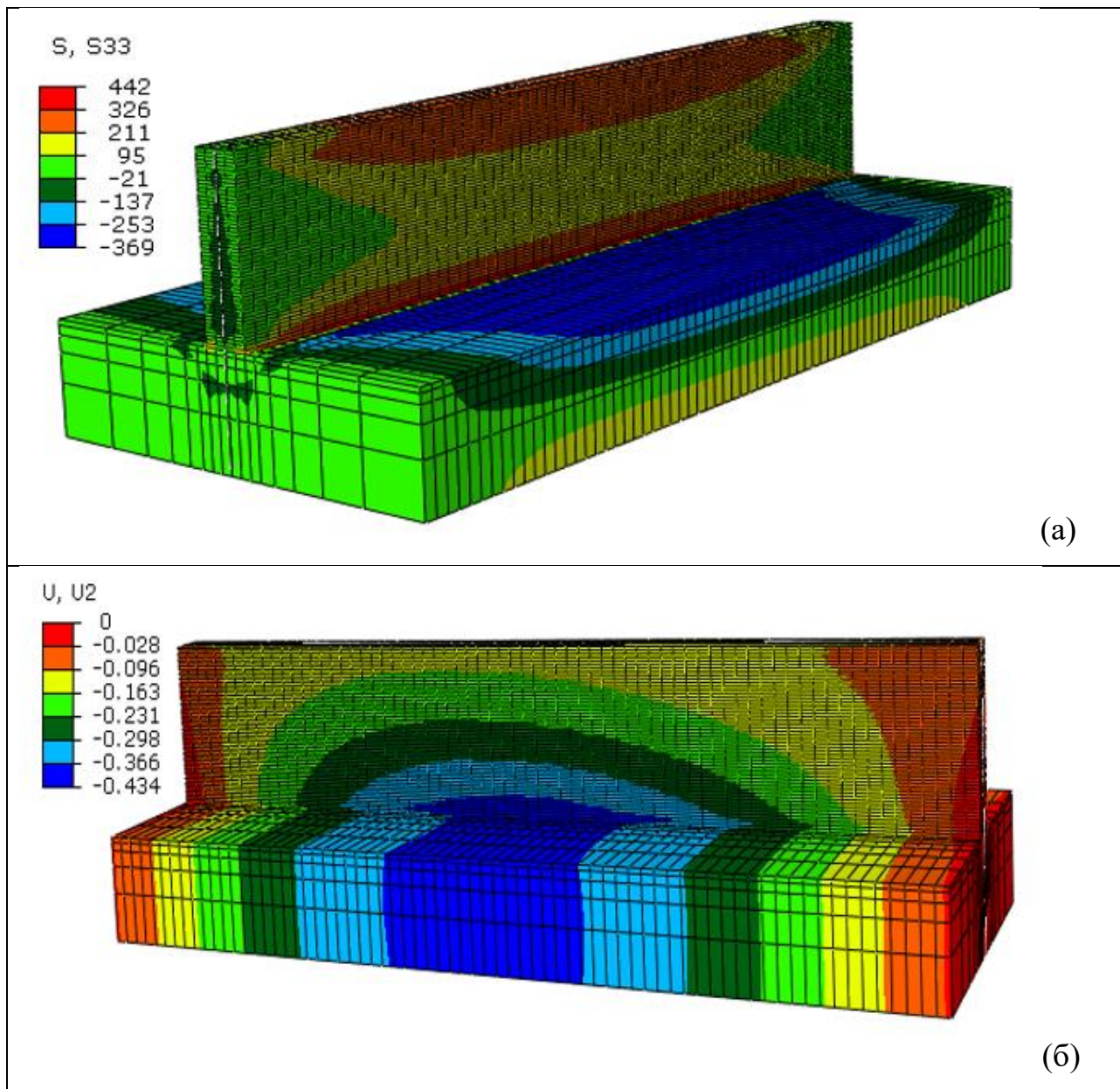


**Рис. 18. Залежність швидкості охолодження (а), розміру зерна (б), границі текучості (в) і відносного видовження (г) матеріалу від номера проходу (висоти зразка) для попереднього підігріву підкладки до різних температур, при режиму наплавлення з часом затримки  $\Delta t=24$  с.**

Отже, можна зробити висновок що оптимальним є підігрів підкладки до  $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ , задля отримання вищого значення відносного видовження матеріалу на нижніх шарах, та часу затримки між наплавленими шарами  $24$  с, задля отримання вищої границі текучості матеріалу на вищих шарах.

Слід зазначити, що оптимізація наплавлення шляхом контролю часу охолодження матеріалу несуттєво впливає на залишкові деформації та прогин розглянутої конструкції.

Очевидно, що залишкові напруження та прогини змінюються при нових параметрах наплавлення, таких як час затримки  $t$  між наплавленнями валиків. Тож було проведено математичне моделювання процесів наплавлення зразків з великою та малою підкладками, при різному часі затримки  $t$  між наплавленнями валиків, і порівняний їх залишковий напружено-деформований стан. На рисунку 19 приведені результати отриманих залишкових напружень та прогину при часі затримки  $t = 24$  с, при наплавленні на велику підкладку.



**Рис. 19. Повздовжня компонента залишкових напружень (а), зразка з великою підкладкою, після його повного охолодження, МПа; та його залишковий прогин у вертикальному напрямі (б).**

У таблиці 2 приведені результати моделювання залишкових напружень і прогинів на велику і малу підкладки, при різних параметрах часу затримки між наплавленням валиків  $t$ .

**Таблиця 2. Змодельований залишковий НДС для зразків з великою і маленькою підкладками, при різному параметрі часу затримки між наплавленням валиків.**

	Час затримки, с.	Зал. прогин, мм.	Залишкові напруження, МПа			
			Мізес	Поздовжні	Поперечні	По висоті
Мала підкладка	5	3.07	302	258/-166	83/-115	87/-102
	24	3.81	622	472/-245	98/-142	91/-94
	60	4.11	844	642/-410	149/-222	117/-98
Велика підкладка	5	0.39	778	483/-325	350/-189	175/-180
	24	0.43	875	505/-364	360/-286	193/-183
	60	0.48	872	423/-411	420/-288	190/-160

Видно, що при наплавленні на велику підкладку час затримки не має впливу на залишкові НДС. Тоді як при наплавленні на малу підкладку, більший час затримки негативно впливає як на залишковий прогин, так і на залишкові напруження виробу.

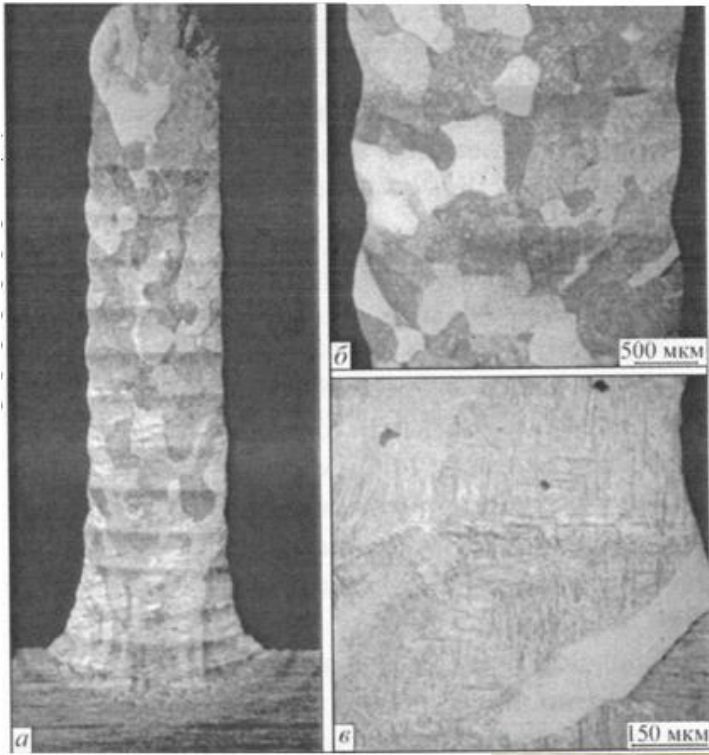
Треба відзначити, що залишкові напруження і деформації залежать від механічних властивостей матеріалу, в тому числі, від межі текучості. Якщо в результаті відмінності температурного циклу наплавлення різні шари помітно відрізняються по механічним властивостям, це може вплинути на результати моделювання напружено-деформованого стану при пошаровому наплавленні, що необхідно враховувати при розробці математичної моделі. Запропонований підхід прогнозування механічних властивостей матеріалу при пошаровому наплавленні дозволяє це робити при необхідності отримання результатів з підвищеною точністю.

**Висновок:** було проведено оптимізацію технологічних параметрів наплавлення, задля отримання рівномірної по висоті мікроструктури матеріалу, та виходу на стаціонарний режим. Підвищення часу затримки між наплавленням валиків до 24 с має позитивний ефект на розмір зерна, а отже і на межу текучості на верхніх шарах наплавлення. З іншого боку, надмірне підвищення часу, призводить до зменшення відносного видовження матеріалу. Підвищення температури попереднього підігріву підкладки, аж до значення нижньої границі поліморфного перетворення, впливає на підвищення розміру зерна і зменшення кількості  $\alpha$ " структури, на нижніх шарах виробу. Що позитивно впливає на відносне видовження матеріалу на нижніх шарах. Порівняний залишковий НДС для різних параметрів наплавлення.

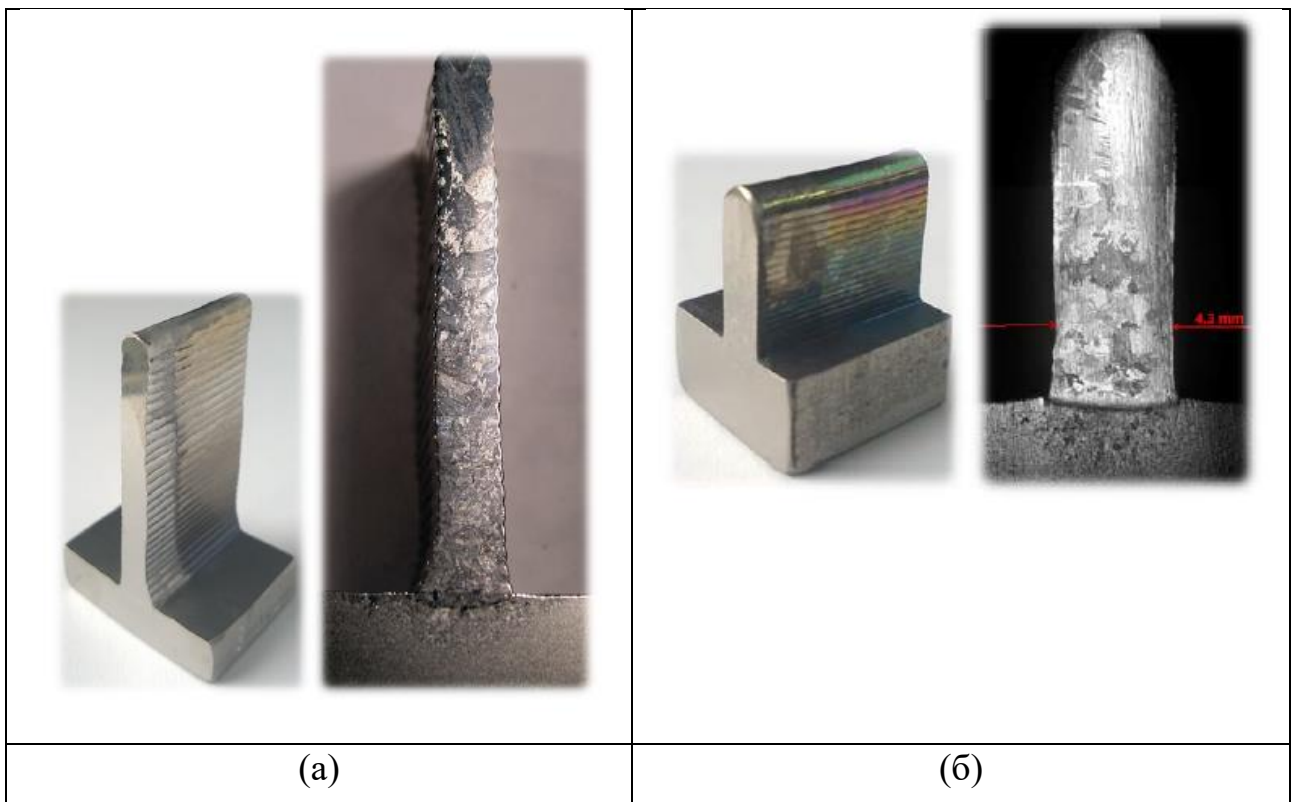
#### 4. ПОРІВНЯННЯ МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ З РЕЗУЛЬТАТОМ ЕКСПЕРИМЕНТУ

Була вироблена низка зразків за вище описаною технологією, проведені випробування на твердість отриманого металу, та зроблені макрошліфи зразка і знімки його мікроструктури на нижніх, середніх і верхніх шарах [6]. Порівняння розміру зерна проводилося на зразках з великою підкладкою. Використовувався початкові параметри технології пошарового наплавлення, тобто без додаткового часу затримки ( $t = 0$  с), і без попереднього підігріву підкладки. Знімки мікроструктури, та отримані з них висновки про розмір зерна матеріалу на нижніх, середніх і верхніх шарах були порівняні з результатом математичного моделювання для даного випадку. На рисунку 20 зображена мікроструктура експериментального зразку, з якої можна зробити висновок, що на нижніх шарах розмір зерна дорівнює 200-300 мкм, а на середніх шарах 400-600 мкм. На цьому рисунку важко зробити певні висновки, щодо мікроструктури на верхніх шарах, але на рисунках 21 (а, б), на яких зображені подібні вироби, зроблені при використанні аналогічної технології, можна зробити висновок, що на верхніх шарах мікроструктура спотворюється, а розмір зерна стає значно більшим. Результати моделювання розміру зерна, для виробів зроблених за даною технологією, зображені на рисунку 22. Отриманий розмір зерна при моделюванні, на нижніх шарах складає 150-250 мкм, на середніх шарах 400-700 мкм, а на верхніх шарах: 2500 мкм.

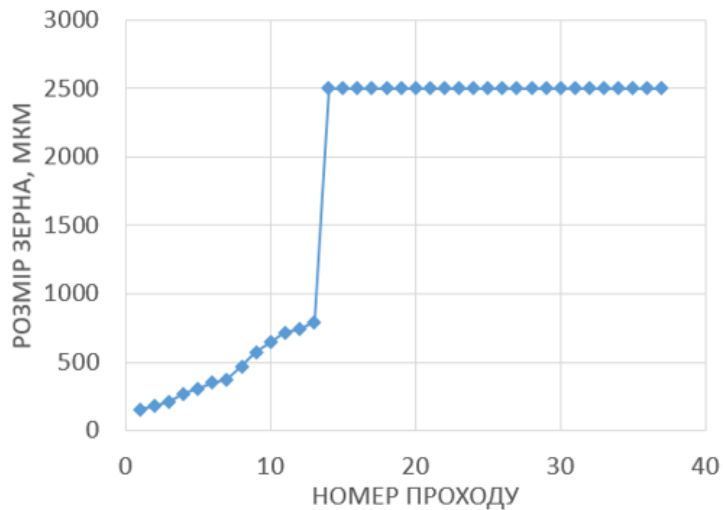
Таким чином результати моделювання розміру зерна показали задовільну точність в порівнянні з експериментом, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування мікроструктури і механічних властивостей виробів з титанових сплавів, отриманих за допомогою технології пошарового формування.



**Рис. 20.** Мікрошліф мікроструктури зразка, зробленого адитивним методом з титанового сплаву ВТ6 (а), з якого можна зробити висновки про розмір зерна на нижніх (в) і середніх (б) шарах.



**Рис. 21.** Мікроструктура зразків, виготовлених за адитивною технологією з титанового сплаву ВТ6.

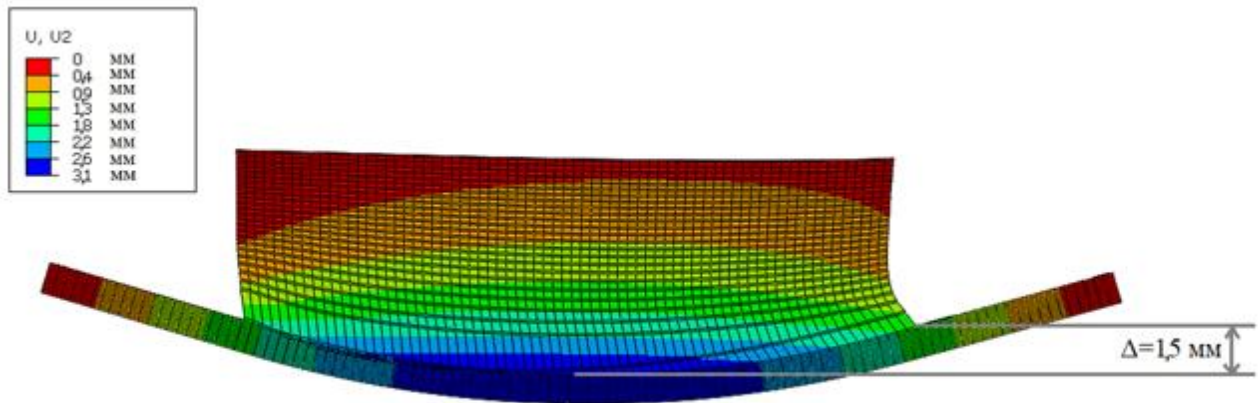


**Рис. 22. Змодельований розмір зерна на різних шарах (по висоті) виробу, з великою підкладкою.**

Також можна порівняти результати моделювання та експерименту, порівнявши залишковий прогин зразка, в результаті усадки матеріалу після наплавлення, із змодельованим залишковим прогином. Був оцінений залишковий прогин для виробу з маленькою підкладкою, виміряний по висоті, між точками початку і кінця наплавлення першого шару, та найбільш zdeформованій точці на першому шарі – середній по його довжині (рис. 23). Отриманий результат був порівняний із змодельованим прогином, між цими ж точками на тривимірній моделі (рис. 24).

Як бачимо, результат математичного моделювання залишкового прогину (1,5 мм) показує задовільну збіжність, у рамках похибки САЕ розрахунку, з отриманим прогином експериментального зразку (приблизно 2 мм), що дозволяє використовувати розроблену математичну модель вже для розрахунку залишкового НДС реальних деталей та конструкцій у машинобудуванні.





**Рис. 23.** Результат змодельованого залишкового прогину зразка з малою підкладкою, мм.



**Рис. 24.** Оцінений залишковий прогин експериментального зразка з малою підкладкою, мм.

Слід зазначити, що порівняння результатів мікроструктури у цілому збігається і з виробами, які отримані з використання такого ж титанового сплаву, і подібної технології пошарового формування, описаного у зарубіжній літературі, наприклад у статті «Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. Wu, Pan, Ding, Ciuri, Li» [15]. З результатів статті можна зробити висновки про подібний рівень залишкових напружень, а також про наявність зони перегріву на верхніх шарах матеріалу, що призводить до вище описаного ефекту надмірного накопичення тепла. Також, видно що зразки для випробувань, вирізані з нижніх шарів виробу зазнають крихкого руйнування, на відміну від зразків з середніх шарів, які руйнуються пластично, з чого можна зробити висновок, що відносне видовження матеріалу на нижніх шарах набагато нижче ніж на середніх.

## **Висновки:**

Результати моделювання розміру зерна показали задовільну точність в порівнянні з експериментом, в межах відносної похибки при математичному моделюванні, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування мікроструктури і механічних властивостей, та розрахунку залишкового НДС реальних деталей та конструкцій у машинобудуванні, отриманих за допомогою технології пошарового формування.

## 5. РОЗРОБЛЕННЯ СТАРТАП ПРОЕКТУ

### 5.1. Опис ідеї проекту

В розділі проведено маркетинговий аналіз стартап проекту, визначені можливості та доцільність його впровадження на ринок.

**Таблиця 3. Опис стартап-проекту**

Зміст проекту	Напрямки застосування	Вигоди для користувача
Оптимізація технології пошарового наплавлення виробів титановим сплавом ВТ6, на основі математичного моделювання процесу	Аерокосмічна галузь	1) Оптимізація технології
	Медична галузь	2) Отримання кращої мікроструктури зразка
	Машинобудівна галузь	3) Можливість прогнозування залишкового НДС виробу
	Одиничні деталі і вироби	

Запропоноване автором використання математичної моделі технології пошарового наплавлення дозволяє прогнозувати мікроструктуру виробу, і механічні властивості матеріалу, з метою їх оптимізації. Також можливо прогнозувати залишковий НДС виробу з різною геометрією.

Конкурентами в нашій роботі є: експериментальні методи дослідження залишкового НДС виробу, та його мікроструктури

## 5.2. Технологічний аудит

Реалізувати ідею проекту можна за допомогою проектних розрахунків.

В табл. 4 проведений аналіз потенційних техніко-економічних переваг даної ідеї у порівнянні з конкурентом №1

**Таблиця 4. Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик ідеї проекту**

№ п/п	Техніко-економічні характеристики ідеї	W	N	S
1.	Грошові витрати	Конкурент		Мій проект
2	Складність розрахунку	Мій проект	Конкурент	
3	Час розрахунку	Мій проект	Конкурент	
	Можливість удосконалення технології	Конкурент		Мій проект

Визначення технологічної здійсненності ідеї проекту наведено в табл. 5

**Таблиця 5. технологічна здійсненність ідеї проекту**

№ п/п	Ідея проекту	Технологія її реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Оптимізація технології пошарового наплавлення на основі математичного моделювання може бути використана для вироблення деталей з експлуатаційними характеристиками, задовольняючими технічним вимогам.	Теоретичний розрахунок	є	є
		Практичне використання		
Обрана технологія може бути реалізована				

По показникам характеристики стану ринку можна зробити висновок, що даний проект є рентабельним.

Визначення потенційних груп клієнтів.

Потенційні групи клієнтів можна умовно поділити на первинних та вторинних споживачів продукту. Первинною групою є компанії, що займаються виготовленням деталей на 3D принтері. Надалі визначимо потенційні групи клієнтів (табл. 6)

**Таблиця 6. Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту**

№ п/п	Потреба, що формує ринок	Цільова аудиторія	Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів	Вимоги споживачів до товару
1.	Отримання деталей, задовольняючими експлуатаційним характеристикам	Виробнича і аерокосмічна галузь	фінанси	Можливість використання оптимізації на деталях з різними вимогами до її геометрії та міцності

Після визначення потенційних груп клієнтів проводимо аналіз ринкового середовища, складаємо таблицю факторів, що допоможуть виходу проекту на ринок, та врахування факторів, що цьому можуть перешкодити (табл. 7)

**Таблиця 7. Фактори загроз**

№ п/п	Фактор	Зміст загрози	Можлива реакція компанії
1.	Час на розробку математичної моделі конкретного проєктованого виробу	Відмова від ідеї використання математичного моделювання	Використання експериментальних методів дослідження
2.	Розробка покращеної методики		Звернення до іншої інженерної компанії

**Таблиця 8. Фактори можливостей**

№ п/п	Фактор	Зміст можливості	Можлива реакція компанії
1.	Можливість отримання результатів у випадках, коли безсилі експериментальні методи	Розширення використання математичного моделювання	Додаткові заклази на розрахунки
2.	Не потребує великих затрат на використання	Економність	Достойна оплата праці

Надалі проведемо аналіз пропозиції, визначивши загальні риси конкуренції на ринку (табл. 9).

**Таблиця 9. Ступеневий аналіз конкуренції на ринку**

Особливості конкурентного середовища	В чому проявляється дана характеристика	Вплив на діяльність підприємства
Тип конкуренції чиста	Велика кількість подібних конкурентних компаній.	Потрібно завжди стежити за досягненнями конкурентів
Міжнародний рівень конкурентної боротьби	Даний ринок має аналогічні компанії в усіх частинах світу	Помітний вплив на удосконалення технології
Внутрішньогалузева ознака	Боротьба ведеться між точністю отриманих результатів розрахунків	Переведення коштів на більш точне моделювання
Товаро-родова конкуренція за видом методики	Здатність задовольнити потреби галузі	Не має великого впливу
Нецінова конкуренція	Точність результатів є первинною ціллю	Робота над постійним покращенням методики
Марочна інтенсивність	Розглядаємо в якості конкурентів схожі методики	Незалежність від ринку

Після аналізу конкуренції проводимо більш детальний аналіз умов конкуренції в галузі (табл. 10).

**Таблиця 10. Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером**

Складові аналізу	Прямі конкуренти в галузі	Потенційні конкуренти	Клієнти	Товари-замінники
	Є	Можуть з'явитися	Виробництва деталей на 3D принтері	Немає
Висновки:	Висока інтенсивність	При наявності кваліфікованої команди, можливо увійти в галузь	Диктують умови роботи на ринку. Такі, як критерій визначення точності результатів і час на розрахунок	Оптимізацію технології наплавлення неможливо замінити

З огляду на конкурентну ситуацію існує можливість виходу на ринок даної галузі. Щоб бути конкурентоспроможним на ринку даному проекту необхідно розробити математичну модель для точного і швидкого розрахунку виробів.

На основі аналізу конкуренції, проведеного в табл. 10, а також із урахуванням характеристик ідеї проекту табл. 3, вимог споживачів до товару табл. 6 та факторів маркетингового середовища табл. 7-8 визначаємо та обґрунтовуємо перелік факторів конкурентоспроможності. Аналіз оформлюється в табл. 11.



**Таблиця 11. Обґрунтування факторів конкурентоспроможності**

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння конкурентних проектів значущим)
1	Можливість удосконалення технології	Має широкий круг параметрів для їх подальшої оптимізації
2	Грошові витрати	Для математичного моделювання немає необхідність в великих затратах, таких як на експериментальні дослідження
3	Використання отриманих даних	Максимальне вичерпання ресурсу

За визначеними факторами конкурентоспроможності (табл. 11) проведемо аналіз сильних та слабких сторін стартап-проекту (табл. 12).

**Таблиця 12. Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін «Математичне моделювання пошарової технології наплавлення матеріалу»**

№ п/п	Фактор конкурентоспроможності	Бали 1-20	Рейтинг методи у порівнянні з проектом конкурента							
			-3	-2	-1	0	1	2	3	
1	Менша потреба у витратах	15							•	
2	Точність розрахунків	15			•					
3	Використання отриманих даних	20				•				
4	Можливість удосконалення технології	20								•

Фінальним етапом ринкового аналізу можливостей впровадження проекту є складання SWOT-аналізу (матриці аналізу сильних (Strength) та слабких (Weak) сторін, загроз (Troubles) та можливостей (Opportunities) (табл. 13) на основі виділених ринкових загроз та можливостей, та сильних і слабких сторін (табл. 12).

Перелік ринкових загроз та ринкових можливостей складається на основі аналізу факторів загроз та факторів можливостей маркетингового середовища. Ринкові загрози та ринкові можливості є наслідками впливу факторів, і, на відміну від них, ще не є реалізованими на ринку та мають певну ймовірність здійснення.

**Таблиця 13. SWOT - аналіз стартап-проекту**

Сильні сторони: Можливість удосконалення технології	Слабкі сторони: Час на впровадження технології
Можливості: Повна заміна експериментальних методів	Загрози: Відмова від мат. моделювання, через занадто довгий час її розроблення, і як наслідок, її неактуальність по закінченню впровадження

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

Визначені альтернативи аналізуються з точки зору строків та ймовірності отримання ресурсів (табл. 14).

**Таблиця 14. Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту**

№ п/п	Альтернатива ринкової поведінки	Ймовірність отримання ресурсів	Строки реалізації
1	Комбінування з експериментальними дослідженнями	Висока	4 місяці
2	Використання спеціалізованого комерційного ПО	Мала	6 місяців

Із зазначених альтернатив виберемо першу, бо отримання результатів вимагає набагато меншої кількості додаткових затрачених коштів, ніж придбання комерційного ПО.

### 5.3. Розроблення ринкової стратегії проекту

Розроблення ринкової стратегії першим кроком передбачає визначення стратегії охоплення ринку: опис цільових груп потенційних споживачів (табл. 15).

**Таблиця 15. Вибір цільових груп потенційних споживачів**

№ п/п	Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів	Готовність споживачів сприйняти продукт	Орієнтовний попит в межах цільової групи	Інтенсивність конкуренції в сегменті	Простота входу у сегмент
1	X Beam 3D Metal Print	Готові	Середній	Висока	Просто
2	Інші компанії 3D принтер технології	Готові	Низький	Надзвичайно висока	Просто

Для роботи в обраному сегменті ринку необхідно сформувати базову стратегію розвитку (табл. 16).

**Таблиця 16. Визначення базової стратегії розвитку**

Обрана альтернатива розвитку проекту	Стратегія охоплення ринку	Ключові конкурентоспроможні позиції відповідно до обраної альтернативи	Базова стратегія розвитку
Комбінування з експериментальним і дослідженнями	Концентрований маркетинг	Об'єднання з виробничою компанією	Спеціалізація

Далі виберемо стратегію конкурентної поведінки (табл. 17).

**Таблиця 17. Визначення базової стратегії конкурентної поведінки**

Чи є проект «першопроходьцем» на ринку?	Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?	Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?	Стратегія конкурентної поведінки
Ні	Так	Не буде	Стратегія заняття конкурентної ніші

Результатом даного підрозділу є узгоджена система рішень щодо ринкової поведінки стартап-компанії, яка визначатиме напрями роботи стартап-компанії на ринку:

- використання в проекті сучасних технологій;
- напрям роботи лише у заданій ніші ринку.

#### 5.4. Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Першим кроком є формування маркетингової концепції товару, який отримає споживач. Для цього у табл. 18 підсумуємо результати попереднього аналізу конкурентоспроможності товару.

**Таблиця 18. Визначення ключових переваг концепції потенційного товару**

№ п/п	Потреба	Вигода, яку пропонує товар	Ключові переваги перед конкурентами
1	Можливість удосконалення технології	Експлуатаційні характеристики виробів, що задовольняють технологічним вимогам	Серійне виробництво деталей вищої якості, ніж у конкурентів
2	Не потребує великих затрат на розрахунки	Менші затрати на одиницю виробу	Менша собівартість продукції

Далі визначаємо оптимальну систему збуту, в межах якого приймається рішення (табл. 19).

**Таблиця 19. Формування системи збуту**

Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів	Функції збуту, які має виконувати постачальник товару	Глибина каналу збуту	Оптимальна система збуту
Покупка, з подальшою можливістю дозакупівлі додаткових технологій	Розповсюдження	Вузька	Власна система збуту

Останньою складовою маркетингової програми є розроблення концепції маркетингових комунікацій, що спирається на попередньо обрану основу для позиціонування, визначену специфіку поведінки клієнтів (табл. 20).

**Таблиця 20. Концепція маркетингових комунікацій**

Специфіка поведінки цільових клієнтів	Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти	Ключові позиції, обрані для позиціонування	Завдання рекламного повідомлення	Концепція рекламного звернення
Комунікабельні	Мережа інтернет, приватне спілкування, конференції	Реклама методики на у мережі інтернет на конференціях	Пошук нових клієнтів	Інноваційні методи дослідження, та кардинально нові отримані результати

**Результати маркетингового дослідження:**

- даний стартап-проект є актуальним, тому що попит на нові технології пошарового наплавлення дуже високий, ринок зростає
- існує велика потенційна група клієнтів, особливо за границею, можливо знайти нових клієнтів, середня кількість конкурентів, висока конкурентоспроможність проекту
- альтернативна ідея полягає в об'єднанні з виробничими компаніями, та виготовлення дослідних зразків, та їх тестування
- доцільною є подальша імплементація проекту

## **Висновки за результатами дипломної роботи:**

1. Механічні властивості, а отже і експлуатаційні характеристики деталей з титанових сплавів, отриманих за допомогою адитивної технології пошарового формування на основі присадкових дротів, значно залежать від режимів охолодження матеріалу в процесі виготовлення. Для їх прогнозування можуть використовуватися експериментальні дані щодо залежності величини розміру зерна, фазового складу мікроструктури і механічних властивостей матеріалу від швидкості охолодження матеріалу в діапазоні поліморфних перетворень.

2. На основі розробленої математичної моделі нестационарної теплопровідності таврового зразка із сплаву ВТ6 (Ti-6Al-4V), при його пошаровому формуванні за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення xBeam 3D Metal Printer, отримано відмінність мікроструктури матеріалу виробу по його висоті, її фазовий склад, розмір зерна і механічні властивості.

3. На основі математичного моделювання кінетики температурних полів під час пошарового формування, і напружено-деформованого стану після повного охолодження таврових зразків з малою і великою підкладками, показано суттєвий вплив геометрії наплавленої деталі на кінетику температурного розподілу при їх виготовленні і на рівень залишкових напружень і деформацій.

4. Розроблені математичні моделі кінетики розподілення температурних полів, та прогнозування мікроструктури і механічних властивостей матеріалу у двовимірній і тривимірній постановках. Були порівняні переваги та недоліки використання моделей, та отриманих результатів. Було вирішено використовувати двовимірну постановку температурної задачі для оптимізації технологічних параметрів наплавлення, через на порядок скорочення часу на розрахунки.

5. Проведена оптимізація технології пошарового наплавлення титановим прутком із сплаву ВТ6 таврової геометрії виробу. Запропоновані оптимальні параметри технології, такі як час затримки між наплавленням валиків, та



попередній підігрів підкладки. Отримано покращені механічні характеристики матеріалу і більш рівномірний розмір зерна, по висоті зразка. Порівняний напружено-деформований стан зразків з великою та малою підкладками, виготовлених з різними параметрами технології.

б. Порівняння математичного моделювання і результатів експериментального дослідження мікроструктури і залишкового прогину зразка показало задовільну, у межах розрахункової похибки, точність зіставлення, що дозволяє застосовувати розроблену математичну модель для прогнозування структури, механічних властивостей матеріалу та залишкового НДС виробів, отриманих за допомогою адитивної технології пошарового формування.

### *Література:*

1. Ding, D., Pan, Z., Cuiuri, D. & Li, H. Wire-feed additive manufacturing of metal components: technologies, developments and future interests. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2015, 81 (1), 465-481.
2. E. Brandl et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications. *Physics Procedia*, December 2010, 595-606.
3. P. Edwards et al. (2013). Electron Beam Additive Manufacturing of Titanium Components: Properties and Performance. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, Vol.135, Issue 6, December 2013, p. 061016/1-061016/7.
4. Оценка возможности применения технологии послойного формирования способом плазменной наплавки деталей из титановых сплавов узлов вертолетов и ГТД / Петрик И. А., Чигилейчик С. Л., Митина Т. А., Марченко Ю. А., Гнатенко М. О. / Современная электрометаллургия №3 (132). Киев, 2018. С. 45-51.
5. Моделирование температурных полей для различных типов трехмерных образцов при их послойном формировании на оборудовании электронно-лучевой наплавки xBeam 3D Metal Printer / Махненко О.В., Миленин А.С., Великоиваненко Е.А., Розынка Г.Ф., Пивторак Н.И., Козлитина С.С., Дзюбак Л.И. / Сб. докл. VIII Межд.конф. «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов» Одесса, Украина, 10-16 сентября 2017 г.
6. Д.В. Ковальчук, В.И. Мельник, И.В. Мельник. Новые возможности аддитивного производства с технологией xBeam 3D Metal Printing. Сборник трудов восьмой международной конференции «Лучевые технологии в сварке и обработке материалов». Киев, 2017. С. 51.
7. G. Lutjering, J.C. Williams. Microstructure and mechanical properties of titanium alloys. *Microstructure and properties of materials V.2*. 2000. P. 26-29
8. И.С. Полькин. Повышение свойств металлических материалов за счет применения новых технологических процессов. Перспективные технологии легких и специальных сплавов. Москва, Физматлит, 2006. С. 66-73

9. J. Sieniawski, W. Ziaja, K. Kubiak. *Microstructure and Mechanical Properties of High Strength Two-Phase Titanium Alloys*. Titanium alloys. 2013. P. 69-79
10. S. Patil, S. Kekade, K. Phapale. Effect of  $\alpha$  and  $\beta$  phase volume fraction on machining characteristics of titanium alloy Ti6Al4V. 16th Machining Innovations Conference for Aerospace Industry. 2016. P.65.
11. В.Ф. Грабин. Структура и свойства сварных соединений из титановых сплавов. Киев, Наукова думка, 1964. С. 59.
12. Binta Wu, Zengxi Pan, Donghong Ding, Dominic Cuiuri, Huijun Li. Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. *Additive Manufacturing* 23 (2018) pp.151-160.
13. Махненко В.И. Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. Киев, Наукова думка, 1976, 320 с.17.Шор Я. Б.
14. Liu, Shin. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy: a review. *Materials and design* 164. Pp. 1-23
15. Wu, Pan, Ding, Ciuri, Li. Effects of heat accumulation on microstructure and mechanical properties of Ti6Al4V alloy deposited by wire arc additive manufacturing. *Additive manufacturing* 23. Pp. 151-160.