

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МАТЕМАТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра комп'ютерних наук

**КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА МАГІСТРА**

на тему: «РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ І ПРОГРАМ  
АДИТИВНОГО 3D ДРУКУ ЗАГОТІВОК ДЕТАЛЕЙ  
АВІАДВИГУНІВ НА РОБОТИЗОВАНОМУ КОМПЛЕКСІ  
«FANUC»»

Виконав(ла): студент(ка) 2 курсу, групи 8.1220-з  
спеціальності 122 комп'ютерні науки  
(шифр і назва спеціальності)  
освітньої програми комп'ютерні науки  
(назва освітньої програми)  
Белінський І. О.  
(ініціали та прізвище)

Керівник Доцент кафедри комп'ютерних наук,  
доцент, к.ф. - м.н. Єрмолаєв В.А.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Рецензент Завідувач кафедри прикладної  
математики, доцент, д.т.н. Гребенюк С.М.  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ЗАПОРІЗЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Факультет математичний

Кафедра комп'ютерних наук

Рівень вищої освіти магістр

Спеціальність 122 комп'ютерні науки

(шифр і назва)

Освітня програма комп'ютерні науки

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

Завідувач кафедри  
 комп'ютерних наук,  
 к.т.н., доцент

Борю С.Ю.

(підпис)

« 14 » 06 2021 р.

**З А В Д А Н Н Я**

**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ СТУДЕНТОВІ (СТУДЕНТЦІ)**

Белінському Ігорю Олеговичу

(прізвище, ім'я та по батькові)

1. Тема роботи Розробка алгоритмів і програм адитивного 3D друку  
заготівки деталей авіадвигунів на роботизованому комплексі "Fanuc".

керівник роботи Єрмолаєв Вадим Анатолійович, к.ф.-м.н., доцент

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

затверджені наказом ЗНУ від « 09 » червня 2021 року № 850-с

2. Строк подання студентом роботи 19.11.2021.

3. Вихідні дані до роботи 1. Постановка задачі.

2. Перелік літератури.

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

1. Постановка задачі, аналіз предметної області

2. Розробка алгоритмів і програм

3. Реалізація програмного коду для комплексу 3D друку "Fanuc"

4. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень) \_\_\_\_\_

Презентація

## 6. Консультанти розділів роботи

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

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

**КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН**

№	Назва етапів кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1.	Розробка плану роботи.	15.06.2021	
2.	Збір вихідних даних.	20.06.2021	
3.	Обробка методичних та теоретичних джерел.	01.07.2021	
4.	Розробка першого та другого розділу.	23.09.2021	
5.	Розробка третього розділу.	19.11.2021	
6.	Розробка четвертого розділу.	20.11.2021	
7.	Оформлення та нормоконтроль кваліфікаційної роботи магістра	22.11.2021	
8.	Захист кваліфікаційної роботи магістра	08.12.2021	

Студент

\_\_\_\_\_

(підпис)

І.О. Белінський

\_\_\_\_\_

(ініціали та прізвище)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_

(підпис)

В.А. Єрмолаєв

\_\_\_\_\_

(ініціали та прізвище)

**Нормоконтроль пройдено**

Нормоконтролер

\_\_\_\_\_

(підпис)

О.Г. Спиця

\_\_\_\_\_

(ініціали та прізвище)

## РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна робота магістра «Розробка алгоритмів і програм адитивного 3D друку заготовок деталей авіадвигунів на роботизованому комплексі "Fanuc"»: 77 с., 37 рис., 7 таблиць, 60 джерел.

Ключові слова: адитивні технології, друк, промисловий робот, пошарове наплавлення.

Об'єкт дослідження – розробка алгоритмів та програм адитивного 3D друку на роботизованому комплексі "Fanuc".

Предмет дослідження – алгоритми та програми адитивного 3D друку на роботизованому комплексі "Fanuc".

Мета роботи – проаналізувати та дослідити економічну, технічну, технологічну, та програмну складову адитивного 3D друку заготовок роботизованому комплексі "Fanuc" в порівнянні з ливарним методом поковки.

Методи дослідження: у роботі застосовувались теоретичні методи (теоретично порівняльний аналіз технічної літератури з досліджуваної області) емпіричні (експериментальні завдання, спостереження а також контент-аналіз).

Наукова новизна: перше в Україні активне використання 3D-друку в масовому виробництві – і це питання часу коли дозволять об'єднати новітні наукові розробки в галузях техніки, технології, матеріалознавства, з виготовленням заготовок адитивним 3D друком на програмованому роботизованому комплексі "Fanuc" самих складних деталей в будь який промисловості. Результати досліджень та висновки які отримані експериментальним шляхом можуть бути використаними як інженер – програмістами так і інженер технологіями а також викладачами які працюють у вищих навчальних закладах для більш ефективного процесу формування знань щодо адитивних технологій у масовому виробництві та їх програмування.

## SUMMARY

Qualification work of the master «Development of the Algorithms and Software for Additive 3D Printing of Semi-Finished Aircraft Engine Parts using the "Fanuc" Robotic Complex»: 77 pages, 37 figures, 7 tables, 60 sources.

Keywords: algorithm, additive technologies, printing, shallow surfacing, industrial robot.

The object of the study is the development of algorithms and programs for additive 3D printing on the robotic complex "Fanuc".

The aim of the study is algorithms and programs of additive 3D printing on the robotic complex "Fanuc".

The methods of research are the paper used theoretical methods (theoretical comparative analysis of technical literature in the field) empirical (experimental tasks, observations and content analysis).

Scientific novelty: The first active use of 3D-printing in mass production in Ukraine is a matter of time when the latest scientific developments in the fields of engineering, technology, materials science will be combined with the production of blanks by additive 3D printing on the Fanuc complex of the most complex parts in any industry. The results of research and conclusions obtained experimentally can be used by both software engineers and engineer technologists, as well as teachers working in higher education institutions for a more effective process of knowledge formation on additive technologies in mass production and their programming.

## ЗМІСТ

Завдання на кваліфікаційну роботу.....	2
Реферат.....	4
Summary.....	6
Вступ.....	8
1 Адитивний 3D друк, його історія та основи роботизовано програмної автоматизації у виробництві.....	10
1.1 Історія адитивного 3D друку та сутність автоматизації у промисловості .....	10
1.2 Сутність адитивного 3D наплавлення роботизованим комплексом «Fanuc».....	12
1.3 Математичні алгоритми автоматизації роботизованого комплексу «Fanuc».....	20
2 Аналіз економічної ефективності адитивного 3D друку заготовки та її порівняння з ливарною технологією поковки.....	20
2.1 Тенденції економічного розвитку адитивної технології наплавлення у металургійній промисловості у світі.....	20
2.2 Особливості економічної ефективності на промисловому виробництві.....	24
2.3 Порівняння готової заготовки між поковкою та адитивним наплавленням на роботизованому комплексі «Fanuc».....	26
3 Аналіз технічного і технологічного порядку дій в написання алгоритму і програм для налагодження виробництва адитивним методом наплавлення.....	28
3.1 Технічна частина виробництва на роботизованому комплексі «Fanuc».....	28
3.2 Технологічна частина виробництва заготовок деталі авіадвигунів на роботизованому комплексі «Fanuc».....	32

3.3 Розробка алгоритму та написання програми для 3D друку заготовки на роботизованому комплексі «Fanuc».....	45
4 Дослідження якості матеріалу заготовки отриманої методом адитивного 3D друку на роботизованому комплексі «Fanuc».....	49
4.1 Проведення експерименту з оцінки якості результату отриманого за 3D друком.....	49
4.2 Макроструктурний аналіз зразків.....	50
4.3 Мікроструктурний аналіз зразків до термообробки.....	51
4.4 Мікроструктурний аналіз зразка після термообробки.....	54
4.5 Перевірка механічних властивостей.....	60
4.6 Перевірка якості матеріалу заготовки.....	67
Висновки.....	70
Перелік посилань.....	72

## ВСТУП

### **Актуальність дослідження.**

В сучасному світі автоматизація виробництва є головною умовою для поліпшення та вдосконалення масового виробництва, особливо при виготовленні деталей авіадвигунів які робляться с інженерно – конструкторською точністю. За допомогою розроблення програмованих алгоритмів для адитивного 3D друку на універсальних роботизованому комплексів «Fanuc» можливо досягти економічної ефективності та зменшити вплив на екологічне середовище, і отримувати вироби які ні в чому не уступатимуть деталям авіадвигунів вироблених традиційно ливарними методами за рахунок зменшення ресурсів як людських так і інших, при тій самій кількості, а навіть і більшим випуском деталей.

В цей час в Україні на АТ «Мотор Січ» налагоджується перше повноцінне серійне виробництво металевих заготовок зроблених адитивним методами 3D друку на адаптивному роботизованому комплексі «Fanuc». Як порошковим наплавлення у захисному від кисню приміщенні так і на відкритому повітрі наплавленням дротом. Тому як робітник який працює інженер – програмістом на даному комплексі в АТ «Мотор Січ» і виконую експериментально – технічні впровадження різноманітних авіаційних деталей розроблюючи під них алгоритми і програми, та складаю технологію наплавлення адитивним методом, на основі аналізу отриманої інформації від усіх можливих джерел, і бачивши дійсні результати та велику зацікавленість керівництвом на відмову від ливарного методу поковки в користь адитивних технологій можу сказати що актуальність як на даному виробництві так і в Україні дуже велика. Насамперед компанія «Fanuc» має свій офіс у Києві де працюють українські працівники які поставляють адаптивні роботизовані комплекси на самі різноманітні українськи виробництва. А це є ознака перспективного розвитку у даній галузі як економічного так і наукового.



Виготовлення деталей традиційними ливарними методами, такими як поковка або лиття мають певні недоліки. Основні з них трудомісткість і вартість виробів: необхідність виготовлення великої кількості оснастки: моделей, кокілів прес-форм. Крім того, при одиничному та експериментальному виробництві, для реалізації конструкторського проекту деталь потрібно отримати в за найкоротший час. У виробництві ще залишаються ливарні методи виготовлення ливарного оснащення з використанням різноманітного механообробного обладнання, інколи ЧПУ.

Пов'язано це зі змінами в інженер – конструкторській роботі на етапі проектування, для досягнення поставленої мети та результату. Коли конструкція виробу може змінитися, для виготовлення зразкового процесу. Недоцільно розробляти оснащення та витратити ресурси на одноразовий процес. В таких умовах ливарне оснащення, використовується, один раз і далі стає не потрібним металом, і в подальшому з виробом не застосовується. Тому, актуальним питання є зниження частки оснастки, яка потребується впровадження технології. Вирішувати поставлені задачі можна за допомогою адитивного 3D друку.

При виготовленні деталей з алюмінієвих сплавів наплавленням дозволяє виключити з технологічного процесу етапи виготовлення моделей і прес-форм, і таким чином, реалізувати конструкторський проект в найкоротші терміни.

При ремонті, чи усуненні дефектів лиття та штампування використовують традиційні методи зварювання і наплавлення, однак дані методи не завжди можуть бути ефективними, особливо у випадках, коли необхідно відновити сегмент деталі з максимальною точністю.

А написання програмних алгоритмів дає можливість досягнути потрібної точності, корегувати процесом під час наплавлення та наладити серійне виробництво.

# 1 АДИТИВНИЙ 3D ДРУК, ЙОГО ІСТОРІЯ ТА ОСНОВИ РОБОТИЗОВАНО.ПРОГРАМНОЇ.АВТОМАТИЗАЦІЇ.У.ВИРОБНИЦТІ

## 1.1 Історія адитивного 3D друку та сутність автоматизації у промисловості

Початок тривимірного друку бере с 1980-хроків у Японії. Один з інженерів а саме Хідео Кодама шукав спосіб розробити швидку систему створення прототипів. Його підхід пошарового наплавлення з різних матеріалів міг змінити промислове виробництво. Йому дали лабораторію з командою але через низьке фінансування його патент так і не ввійшов у світ [8].

Тим не менш, задум «пристроїв швидкого прототипування» продовжував розвиватися, і наступними відомими особистостями, які вплинули на цю ідею, були Жан-Клод Андре, Олів'є де Вітте та Ален ле Мехо з Франції. Мехо працював в Alcatel, досліджуючи деталі фрактальної геометрії, та як робити такі складні деталі. Попрацювавши з лазерами, де Вітте знав про рідкі мономери, які можна перевести в твердий стан за допомогою лазера. Це відкрило шлях створення пристрою швидкого прототипування. У Французькому національному центрі наукових досліджень (CNRS), не схвалили отриманих даних трьох дослідників, вони стверджували, що для цього просто не було достатньо сфер застосування. І також без фінансової підтримки припинили свої дослідження у цій області але їм все ще приписують розробку системи [7].

Патент моделювання плавленого осадження (FDM) значиться 1984-1986 Автором Скоттом Крампо. У 1984–1988 винахід стерео літографії Чарльз Чак Халла, який заснував власну компанію у Валенсії, штат Каліфорнія: 3D Systems. Вони випустили комерційний продукт, SLA-1 в 1988 році. Сьогодні 3D Systems – одна з найбільших компаній у сфері 3D-друку та,

звичайно, один з лідерів на ринку інновацій у 3D-друку. Стереолітографія започаткувала індустрію 3D-друку [9].

Для забезпечення подібних технологій успішною моделі виробництва, потрібні промислові роботизовано програмовані установки за для розвитку машинного виробництва [6].

**Промисловий робот** – Це установка яка призначена для виконання рухових і керуючих функцій у виробничому процесі маніпуляційних автоматичних робіт, що складається з двох частин це маніпулятор і перепрограмованій пристрій керування, що задає рух виконавчих органів маніпулятора. Застосовується для переміщення предметів виробництва та виконання різних технологічних операцій [38].

Також є визначення з ГОСТ 25686-85 – Пересувна або стаціонарна автоматична машина яка складається з виконавчого пристрою у вигляді маніпулятора, має визначені ступені рухомості які відповідають дійсним осям, і перепрограмованого пристрою програмного управління для виконання керуючих функцій у виробництві [10].

**Автоматизація виробництва** – це процес переходу від виконання людиною до виконання автоматичним пристроєм, при якому функції управління передаються приладам. Автоматизації на виробництві дозволяє підвищити продуктивність праці, забезпечити стабільну якість продукції, уникнути помилок з боку людського фактору, переробити робочі групи за рахунок зменшення працівників, в тій чи іншій сфері виробництва [39].

Відпиляють 3 покоління промислових роботів:

I покоління – промислові роботи (ПР). Являють собою автоматичні програмні пристрої, оснащені однією або кількома «руками». Керування руху руки ПР здійснюється за зазначеними координатами які залежать від кількості осей (від двох до десяти). Виставленої в програмі швидкістю з потрібними командами і необхідною точністю. Сама рука складається з кісті з необхідним адитивним органом, переміщення якого зазначено технічною та програмованою зоною обслуговування. Головна риса таких роботів це

відсутність будь яких датчиків зворотного зв'язку. В основному методом навчання здійснюється програмування рухів в, а програма вже передбачає всі рухи маніпулятора.

II покоління – адаптивні роботи. Роботи які гуртуються на керуванні пристроєм адаптивного управління, тобто реагувати на зовнішнє середовище та його зміни за рахунок датчиків зворотного зв'язку або так званими сенсорними пристроями. Це головна ознака відмінностей с ПР першого покоління.

III покоління – роботи зі штучним інтелектом. Роботи III покоління або інтегральні мають складну но більш досконалу технічно числову систему. Але зараз у світі вони ще на стадії розробки у експериментальному вигляді, в не багатьох екземплярів. І робота в промисловості тільки розпочинатися, їх риса та головна відмінність від першого та другого покоління це штучній інтелект, Також вони вже мають колісне або гусеничне обладнання. Інтегральні роботи оснащуються ЕОМ який опереджає усі покоління до цього але і стоять теж більше. До цифрової пам'яті робота заносять структурну математичну модель яка аналізую зовнішнє середовище по створює шлях пересування [15].

## **1.2 Сутність адитивного 3D наплавлення роботизованим комплексом «Fanuc»**

У світі спостерігається стійке зростання інтересу до процесів адитивного виробництва (технологіям 3D друку). Очікується, що застосування цих процесів принципово змінить промислове виробництво. І доручення до таких можливостей технології адитивного виробництва, як реалізація автоматичного проектування деталей, гнучкість і швидкість їх виготовлення, перерозподіл виробництва від великих підприємств до

найменших, та виготовлення деталей у споживача економлячи на логістиці. [50].

Адитивні технології мають колосальний потенціал у напрямі зниження енергетичних та матеріальних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. На сьогодні спостерігається підвищення частки зварювальних технологій в адитивному виробництві об'ємних металевих виробів. Це пов'язано в першу чергу з високою продуктивністю дугового зварювання (наплавлення), так і з досить вигідною вартістю. Технології 3D друку дозволяють вирощувати вироби будь-якої складності з мінімальними витратами. При цьому практично відсутні відходи виробництва та скорочується кількість обслуговуючого персоналу [35].

Для повного використання можливостей тривимірної друку потрібна наявність технологій отримання високоміцних об'ємних виробів з металів, сплавів, зокрема з високою твердістю. Використання металевих матеріалів веде до отримання заготівлі і навіть до вже готової продукції, що кардинально змінює систему виробництва. Актуальним стає створення технологій адитивного виробництва готових металевих об'ємних виробів. До таких технологій насамперед відносяться зварювальні процеси (наприклад, наплавлення) [51].

Найбільш перспективним з отриманням тривимірних металевих виробів з потрібною якістю є процеси електронно-променевого плавлення (Electron-Beam Melting – EBM) та виборчого лазерного плавлення (Selective Laser Melting – SLM). В останні роки SLM процес спостерігатися в промисловим виробництві багатьох країн світу, завдання якого є виготовлення високоміцних об'ємних металевих виробів [41].

Цей процес забезпечує можливість одержання виробів шляхом сплавлення порошків різних металів та сплавів лазерним випромінюванням. Перевагами є високий ступінь деталізації елементів, висока щільність (до 99 %), а також точність  $\pm 5$  мм. Разом з тим, при всій його ефективності та гнучкості [52].

Процес SLM також має ряд обмежень, що звужують його застосування:

- необхідність використання дорогого та енергетично витратного обладнання з високою вартістю обслуговування, що обумовлює високу собівартість процесу тривимірного друку та призводить до високої вартості виробів, що виготовляються;

- відносно низька продуктивність тривимірного друку (зазвичай для найбільш поширених машин не більше 10 см<sup>3</sup>/год металу, що нарощується) але при добре налагодженому адитивному виробництві;

- обмеження за матеріалом, бо для SLM використовуються дорогі порошки з жорсткими вимогами щодо гранулометричного та хімічного складу, плинності та інших характеристик.

Дані обмеження не є основоположними факторами у відмові від переходу з поковки, або оброблення під тиском на адитивні технології наплавлення, тому що і в ливарному ремеслі є велика кількість проблемних факторів і це говорить що треба підходити технологічно та експериментально до будь-якого варіанту виробництва навіть якщо воно прогресивне [3].

Великий промисловий інтерес для виготовлення об'ємних металевих виробів становить застосування дугових та плазмових зварювальних технологій (наприклад, наплавлення) через їх технічну та економічну доступність. Групи дослідників з індійського інституту технологій (Бомбей, Індія) та інституту технології виробництва та автоматизації Фраунгофера (Німеччина) представили свої концептуальні ідеї об'єднання зварювання з фрезеруванням. розроблялися шляхи усунення характерних дефектів формування об'ємних виробів зварювальними засобами [42].

Експериментально на установці «Fanuc» була виявлена необхідність контролю температури шарів, що нарощуються. І це є одна з концептуальних проблем, так би мовити сапустуючий момент коли потрібно вимірювати кожні два-три сантиметри вирощеного матеріалу для усунення можливого температурного зміщення. Під вішення частки зварювальних технологій в адитивному виробництві металевих об'ємних виробів. Це пов'язано як із

високою продуктивністю дугового зварювання (наплавлення), так і з її невисокою вартістю. тому інтерес представляє розробка автоматизованого комплексу для тривимірного друкування металевих виробів за допомогою таких технологій, а також детальне вивчення їх особливостей та перспектив подальшого промислового застосування [40].

Автоматизований комплекс адитивного мікро плазмового наплавлення об'ємних металевих виробів має два джерела живлення, що є перетворювачами інвентарного типу. один з них розрахований на реалізацію адитивних технологій плазмового наплавлення дротом (діаметром 0,8/1,2 мм) на зварювальних струмах до 120а та порошковий мікро- плазмового наплавлення на зварювальних струмах до 50 а [13].

У робочій зоні позиціонера розміщується технологічний майданчик для виготовлення об'ємної металевої деталі. Щоб легко переходити від одного процесу наплавлення до іншого, використовують переваги майданчика для наплавлення та його збільшення за рахунок встановлення на позиціонер різних планшайб які можуть бути оснащені спеціальними конструкціями під великий діаметр заготівок [4]. Так, при необхідності нарощування великих обсягів металу доцільно використовувати велику планшайбу, а при необхідності підвищення точності, зменшення товщини стінки, що наплавляється, і зниження шорсткості — мікро плазмове наплавлення [5].

### **1.3 Математичні алгоритми автоматизації роботизованого комплексу «Fanuc»**

**Алгоритм** – це чіткий програмний код де є кінцева сукупність послідовних дій, умов та математичних наборів інструкцій, ціллю яких є досягнення поставленої мети чи вирішення технічно математичного завдання.

В промисловості розвиток системи управління роботів виділяється два напрямки. Перший це системи управління верстатами та маніпуляторами. Другий під контролем людиною оператором вилився в інтерактивні та напівавтоматичні біо-технічні системи [20].

Оператори та команди в алгоритмах записують рядок за рядком. Виконуються вони в залежності від математичної та технічної вимоги.

- лінійні алгоритми;
- алгоритми із повторенням.
- алгоритми із розгалуженням.

**Лінійний алгоритм** – це той в якому програмний код та всі його оператори виконується послідовно, с першого рядка по кінцевий один раз і тим самим виконує поставлену ціль [25].

Приклад в програмуванні коду на РБ комплексу «Fanuc»

```

1:L P[1] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[1] ;
2:L P[2] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[1] ;
3:L P[3] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[2] ;
4:L P[4] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[2] ;
5:L P[5] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[3] ;
6:L P[6] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[3] ;
7:L P[7] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[4] ;
8:L P[8] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[4] ;
9: R1:X = 100
10: PR[GP1:1,1] = PR[GP1:1,1] – R[1:x] ;
11: PR[GP1:2,1] = PR[GP1:2,1] + R[1:x] ;
12: PR[GP1:3,1] = PR[GP1:3,1] + R[1:x] ;
13: PR[GP1:4,1] = PR[GP1:4,1] + R[1:x] ;
14: PR[GP1:4,1] = PR[GP1:1,1] + R[1:x] ;

```

Тут повинні дублюватися усі вісім точок після того як були зміннені позиційні регістри.

```

15: PR[1]=LPOS-LPOS ;

```



16: PR[2]=LPOS-LPOS ;

17: PR[3]=LPOS-LPOS ;

18: PR[4]=LPOS-LPOS ;

В даному прикладі показано послідовне лінійне переміщення по восьми точках (1-8 рядок), координаті яких записана в систему XYZ. Далі йде присвоєння регістру з назвою X ( 9 строка. Назву теж можна давати та можна редагувати) число яке в даному разі 100 (розрахунок ведеться в мм). Послідовно за ним йдуть позиційні регістри (10 – 14 рядок) які зміщують усі точки за якими закріплено Offset,PR полюбій координаті, в даному випадку це координата X. Далі йде обнуління чотирьох позиційних регістрів (15-18 рядок) в вигляді LPOS – LPOS що повертає зміщенні координати в початкові позиції. І при кожному повторенні роботи програми буде робити дві однакові послідовні фігури наприклад восьмикутник.

**Алгоритм з повторенням** – це багаторазове повторення програмного коду для здійснення потрібних цілей та спрощення написання самої операції. В серійному виробництві потрібно постійно робити багато однакових деталей, і вміння закріплювати програму вирішує багато проблем [26].

Візьмемо простий приклад.

1: LBL[1] ;

2:L P[1] 100mm/sec CNT5 ;

3:L P[2] 100mm/sec CNT5 ;

4:L P[3] 100mm/sec CNT5 ;

5: JMP LBL[2] ;

На прикладі ми бачимо (1 та 5 рядок) як за рахунок команди JMP (Стрибок) и LBL (Мітка) можна досягти простішого повторення без дублювання в зворотному порядку трьох точок (2 -4 рядок).

**Алгоритм з розгалуженням** – це той в якому один і той самий програмний код може дійти до потрібного оператора та за рахунок математичної умови виконати певний набір команд. Застосовують цей метод

коли потрібно додати вибір після виконання циклу, наприклад піднятися в гору по координаті Z [27].

Візьмемо перший приклад та добавимо нових рядків.

```

1: R4:zm = 0 ;
2: LBL[1] ;
3: L P[1] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[1] ;
4: L P[2] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[1] ;
5: L P[3] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[2] ;
6: L P[4] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[2] ;
7: L P[5] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[3] ;
8: L P[6] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[3] ;
9: L P[7] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[4] ;
10: L P[8] 100mm/sec CNT5 Offset,PR[4] ;
11: R[4:up]=R[4:up]+1
12: R5:zm = 5 ;
13: IF R[4:zm]<R[5:all up],JMP LBL[1] ;
14: IF R[4:zm]>=R[5:all up],JMP LBL[2] ;
15: LBL[2] ;
16: R1:X = 100 ;
17: PR[GP1:1,1] = PR[GP1:1,1] - R[1:x] ;
18: PR[GP1:2,1] = PR[GP1:2,1] + R[1:x] ;
19: PR[GP1:3,1] = PR[GP1:3,1] + R[1:x] ;
20: PR[GP1:4,1] = PR[GP1:4,1] + R[1:x] ;
21: PR[GP1:4,1] = PR[GP1:1,1] + R[1:x] ;

```

Тут повинні дублюватися усі вісім точок після того як були зміненні позиційні регістри.

```

22: PR[1]=LPOS-LPOS ;
23: PR[2]=LPOS-LPOS ;
24: PR[3]=LPOS-LPOS ;
22: PR[4]=LPOS-LPOS ;

```

У цьому прикладі стоять дві умови (13 и 14), в першій якщо одне число менше іншого, стрибнути в першу мітку (2 рядок), в другій якщо число більше або рівно, перейти до другої мітки (15 рядок). Обидві умови виконуються за рахунок лічильника (11 рядок) який є головним чинником для переходу від однієї умови до іншої. І за допомогою вибраних нами умовними числами(1 та 12 рядок) ми можемо математично вибрати скільки нам потрібно циклічних повторень.

**Висновки.** Цей розділ показує як світ історично та технологічно прийшов до адитивного програмованого виробництва в будь який технічній промисловості. Отримані данні з різних світових джерел показують що адитивні технології мають колосальний потенціал у напрямі зниження енергетичних та матеріальних витрат на створення найрізноманітніших видів продукції. Великий промисловий інтерес для виготовлення об'ємних металевих виробів становить застосування дугових та плазмових зварювальних технологій на адаптивному комплексі «Fanuc», який в певному обсязі дозволяє як технічно та програмно адаптувати алгоритми для технології адитивного 3D друку високо точних авіаційних заготівок.

## **2 АНАЛІЗ ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ АДИТИВНОГО 3D ДРУКУ ЗАГОТІВКИ ТА ЇЇ ПОРІВНЯННЯ З ЛИВАРНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ПОКОВКИ**

### **2.1 Тенденції економічного розвитку адитивної технології направлення у металургійній промисловості у світі**

Ще в 2013 весь промисловий ринок світу металургійного направлення склав майже 2,6 млрд. доларів. В порівнянні з подібним періодом двадцятого року було отримано 667 млн доларів. Валовий дохід для промисловості адитивного направлення, що є 0,01% від загального обсягу світового виробництва. Відсоткова частка джерел доходів для адитивної технології для ринку авіаційної промисловості із загальної суми 2,6 млрд доларів. становила 46,5% для систем і послуг, 30,3% для запчастин, 18,6% для матеріалів. Вісім років тому на металопродукцію, адитивні технології припадали близько 10% глобальної бізнес-системи світу [49,8].

Компанія «Wohler Associates» у 2016 звітувала, що на адитивні технології у всій світовій економіці припало майже 80 трильйонів доларів США, або десь 16% від загального обсягу світової промисловості, показник всієї авіаційної промисловості близько 5,2 млрд доларів що складає майже 0,04% всього обсягу виробництва у 2015 році [46].

При одиночному та експериментальному виробництві, застосування адитивних технологій економічно ефективніше, це можна побачити в порівнянні витрат деталі авіаційної промисловості між адитивним направленням та поковкою, оскільки обидва методи є формотворчими з алюмінієвих сплавів [56].

У промисловості одним з значущих чинників є споживання енергії та аналізу втрат енергетичних ресурсів [45]. У процесів адитивних технологій було визначено питоме споживання енергії в глобальній промисловості в 100

разів вище, ніж у традиційних методів ливарного виробництва, але шліфування та механічна обробка мають майже однакову частину (рисунок 1.1).

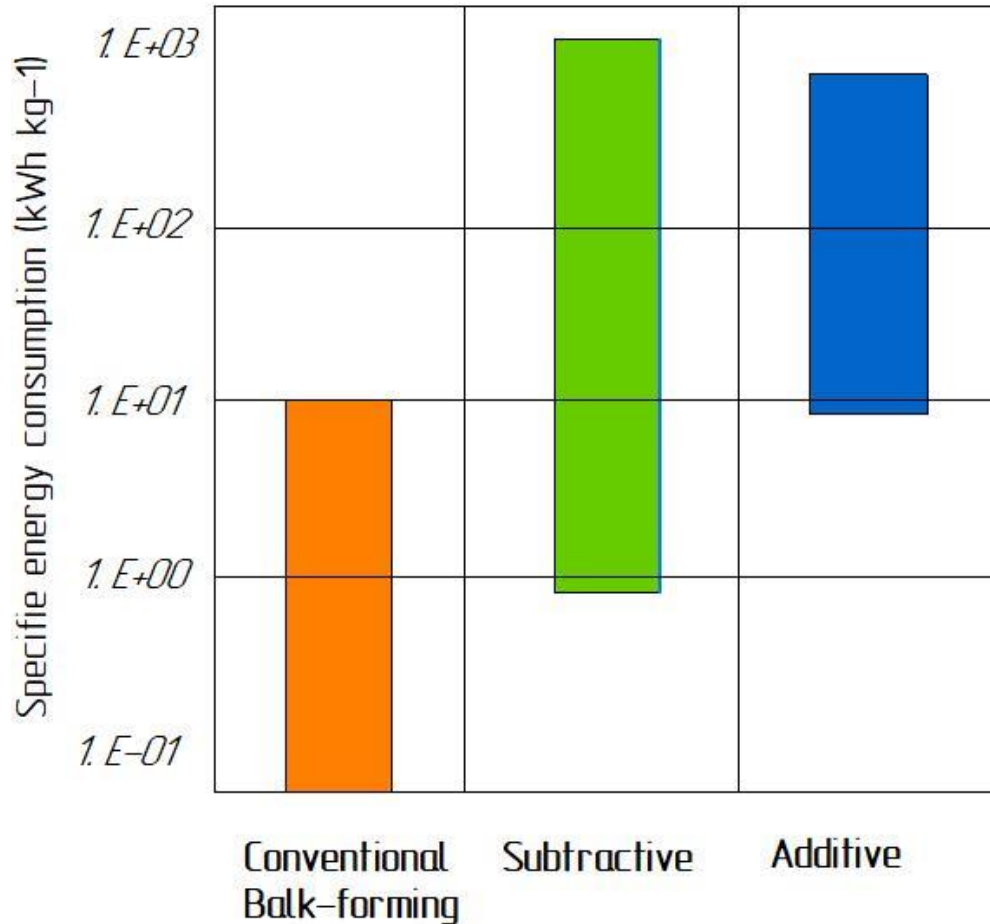


Рисунок 1.1 – Питоме споживання енергії для формотворних, субтрактив і процесів шарового наплавлення. (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

Такі показники говорять що заміна природних ресурсів на енергію веде до зменшення впливу від всіх хімічних шкідливих відходів які потрапляють до атмосфери у місті в якому є ливарна промисловість що є дуже корисним до екології.

Авіаційне підприємство націлене на швидке виготовлення деталей за рахунок мінімальної втрати ресурсів. За рахунок чого збільшується потенціал виробництва на замовлення окремих авіаційних деталей, завдяки можливості

отримувати вироби різноманітної форми та з специфічною геометрією. Аналіз котирувань постачальників послуг для компонентів PBF на 2014 рік показав, що вартість на см<sup>3</sup> алюмінієвих частин SLA і SLM є залежною від обсягу деталей і зменшується до порогового значення після приблизно 100 см<sup>3</sup> на (рисунок 1.2) [43].

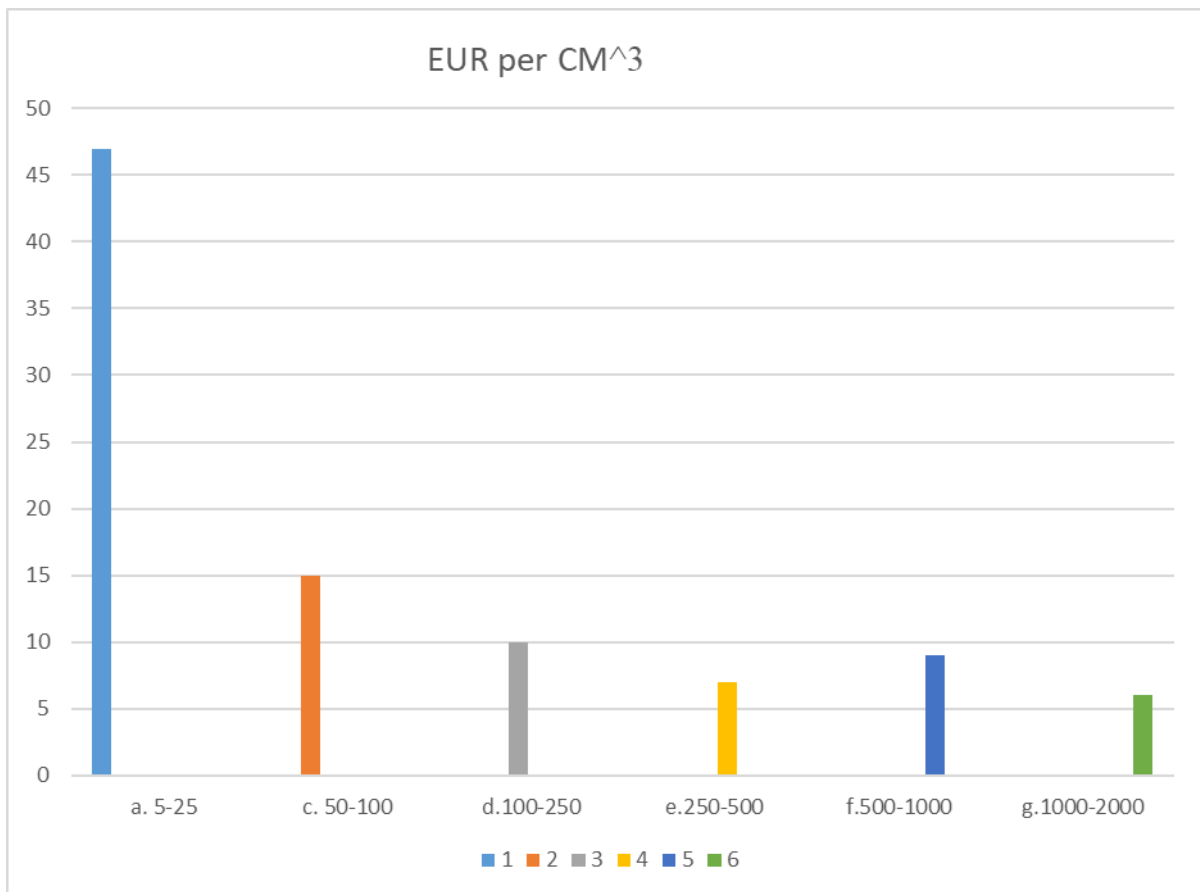


Рисунок 1.2 – Відношення загального об'єму та вартості алюмінієвих деталей отриманих адитивними методами для постачальників послуг. (Зроблено в Microsoft Office)

Аналіз виробництва показує суттєве зростання адитивних технологій, яке буде збільшуватися кожним роком по всьому світі. (рисунок. 1.3) [57]. Компанія Wohlers звітувала в 2017 році, де у світі налічували 98 виробників, котрі розробляли та випускали системи автоматичного виробництва. Де не менше половини були виробники металевої продукції [47].



Рисунок 1.3 – Ринок адитивних технологій в постійному розвитку в космічних, автомобільних та медичної галузі в 2009 році за Credit–Suisse в тенденції до 2020 р. (Зроблено Microsoft Office)

Ці данні говорять що підвищується доцільність виготовлення поковок адитивними методами, що веде скорочення витрати матеріалу. Вирощенні заготовки далі підуть на механічну обробку. Отже з точки зору економічної ефективності, адитивні технології у промисловості світу показують істотні переважання над стандартними методами ливарного виробництва, бо виключав такі чинники як виготовлення оснащення, зменшення припуску на механічну обробку, та економії всіх ресурсів як людських та матеріальних [60,53,54].

## **2.2 Особливості економічної ефективності на промисловому виробництві**

На кожному виробництві, економічна ефективність та економічне поступове зростання є запорукою успішного процвітання промисловості.

Почнемо з **економічного зростання** – це децентралізований розвиток економіки усієї виробничої структури протягом певного періоду. Яка зазначена в налагодження стабільного випуску своєї продукції та її подальшому збільшенні при тій самій траті ресурсів. У світі завжди прагнули вдосконалювати промисловість, де від ручної праці переходили на полу-автомат для покращення точності роботи, а потім і зовсім на повністю автоматичне виробництві що призводить до виробничої економічної ефективності [14].

**Ефективність виробництва** – це співвідношення між ресурсами яка характеризує віддачу, певну економічну результативність. Що дає висновок про обсяг продукції її приріст, випуск та які ресурси були витрачені і в якому об'ємі. Це показує якісні характеристики економічного зростання. Та характеризує якість економічного зростання.

Процес виробництва на підприємстві працює за рахунок взаємодії трьох основних факторів: робітників, технологічність праці й інструментів праці. Весь персонал виробляю для суспільства корисну продукцію й різноманітні побутові послуги. Все це приводить до системи витрати людських та матеріальних ресурсів щоб отримати результати виробництва які впливають на економічне сферу як самого підприємства так і місто в якому во є. Яке залежить від масштабів застосовуваних ресурсів, засобів, технологій, кадрового потенціалу і вмілого їхнього використання [22].

**Економічна ефективність** – це досягнення на підприємстві результатів найвищих можливих показників або зменшення витрат різноманітних ресурсів за таку ж кількість виробленої продукції. Це дозволяє з часом виходити меншу витрату ресурсів за також саму кількість



продукції. Що дає можливість експериментувати з новим обладнанням та новими проектами в адитивному тривимірному друку.

**Матеріаловіддача** – показує ефективність предметів праці як технологічну так і в використанні предметів праці, кількість зробленої продукції з одиниці витрачених матеріальних ресурсів а це ( палива, сировина, електроенергії, певних матеріалів. Характеризує ефективність використаних предметів праці, тобто показує, скільки вироблено продукції з одиниці витрачених матеріальних ресурсів (сировини, матеріалів, палива, електроенергії та ін.). Розраховується в вартості витрачених матеріальних ресурсів відношення до вартості виробленої продукції.

**Матеріаломісткість** – це зворотний показник матеріаловіддачі, який характеризує вартість витрат матеріальних ресурсів на одиницю виробленої продукції.

**Трудомісткість** – це зворотний показник продуктивності праці, який відображає об'єм затраченої людських ресурсів, їхню працю на виробництво одиниці продукції.

**Продуктивність праці на мікрорівні** – це обсяг виробленої продукції на кількість працюючих робітників, зайнятих у її виробництві, або до кількість людино-годин відпрацьованих за певний проміжок часу.

**Продуктивність праці на макрорівні** – визначають як відношення національного доходу до середньої чисельності працівників, зайнятих у його створенні.

Керування багатьма роботизованими комплексами «Fanuc» одною людиною, дає колосальний приріст у зменшенні обслуговування даної техніки а також зниження помилок від людського фактору. Оскільки рівень замученості до діяльності буде порядком вищим

Усе це потрібно для налагодження стабільної виробничої сили. І отриманні дані експериментальним шляхом доказують можливість вдосконалювати економічну ефективність на серійному виробництві.

### **2.3 Порівняння готової заготівки між поковкою та адитивним наплавленням на роботизованому комплексі «Fanuc».**

Порівняння вирощування заготівки зі сплаву ВЖ98ВИ, методом мікро плазмового порошкового наплавлення і плазмового наплавлення металевим дротом на роботизованому комплексі «Fanuc» показують такі дані:

- час вирощування заготівлі порошком – 62 години;
- час вирощування заготівлі дротом – 45 годин;
- вага за мінімальними припусками 14.950 грам;
- вага за максимальними припусками 17250 грам;
- вага за відпрацьованим технічним. процесом у середньому показнику 15 800.

Розрахунок вартості заготівлі зроблену методом мікро плазмового порошкового наплавлення:

- коефіцієнт використання порошку – 0.8;
- витрати порошку – 18 кг;
- вартість порошку ВЖ98ВИ з ПДВ – 6065 грн.;
- загальна вартість порошку на одну деталь – 109170 грн.

Розрахунок вартості заготівлі зроблену методом плазмового наплавлення дротом:

- коефіцієнт використання дроту – 0.6;
- витрата дроту – 15 кг;
- вартість дроту діаметром 1 мм за 1 кг з ПДВ – 3320 грн;
- загальна вартість дроту на одну деталь – 49 800 грн.

Розрахунок вартості готової заготівки ливарним методом поковки:

- матеріал: ВЖ98ВИ;
- D прутка –  $\varnothing$ 120 мм;
- маса проволочки яка складається з двох частин;
- перша частина 4500301001-6601 – 21,970 кг;

- друга частина 4500301001-6602 – 43,842 кг;
- загальна маса готової заготовки: 65,812 кг;
- вартість прутка мм, за 1 кг з ПДВ – 3168 грн.;
- загальна вартість матеріалу на одну деталь – 208 512 грн.

Отже вартість ливарної поковки у два рази дорожче в порівнянні з порошком та в чотири рази в порівнянні з дротом.

**Висновки.** В цьому розділі аналіз виробництва показує суттєве зростання адитивних технологій, яке буде збільшуватися кожним роком по всьому світі. З точки зору економічної ефективності адитивні технології у промисловості світу показують істотні переважання над стандартними методами ливарного виробництва як в економії ресурсів так і вихідній продукції а це означає зміну усієї світової технічної промисловості де автоматизація та більш швидке виготовлення технічної продукції стане невід'ємним судженням що до адитивного 3D друку.

### **3 АНАЛІЗ ТЕХНІЧНОГО І ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПОРЯДКУ ДІЙ В НАПИСАННЯ АЛГОРИТМУ І ПРОГРАМ ДЛЯ НАЛАГОДЖЕННЯ ВІРИБНИЦТВА АДТИВНИМ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ**

#### **3.1 Технічна частина виробництва на роботизованому комплексі «Fanuc»**

Підготовлення виробництва на адаптивному РБ комплексу «Fanuc» є технологією адитивного 3D друку, є складовою до якісного технологічного продукту. Програміст відповідає за всю технічну і програму роботу на донному комплексі, а тому йому потрібно кожного дня перевіряти заданні параметри характеристик на маніпуляторі. Також перевіряти який програмний код виставлено та за якими алгоритмом він працює, тобто які виставленні математичні значення в реєстрах щоб програмний алгоритм міг виконати поставлену операцію по наплавленню заготівлі. Програмісту необхідно також виконати певні дії які складаються за таких етапів.

**Етап 1** Перевірка (TCP, tool center point) Налаштування РБ комплексу «Fanuc» у відповідності з базовими осями [28].

Стабільна робота на РБ комплексу «Fanuc» починається з правильно виставлених осей, які зображені на (рисунку 3.1) Даний комплекс має шість осей де кожна відповідає за переміщення до потрібної точки [29].

Точку TCP можна виставити за трьома точками, коли треба змінити область, але якщо були скинуті базові налаштування через розрядження внутрішньої батареї, то налаштування має бути за шістьма осями TCP [30].

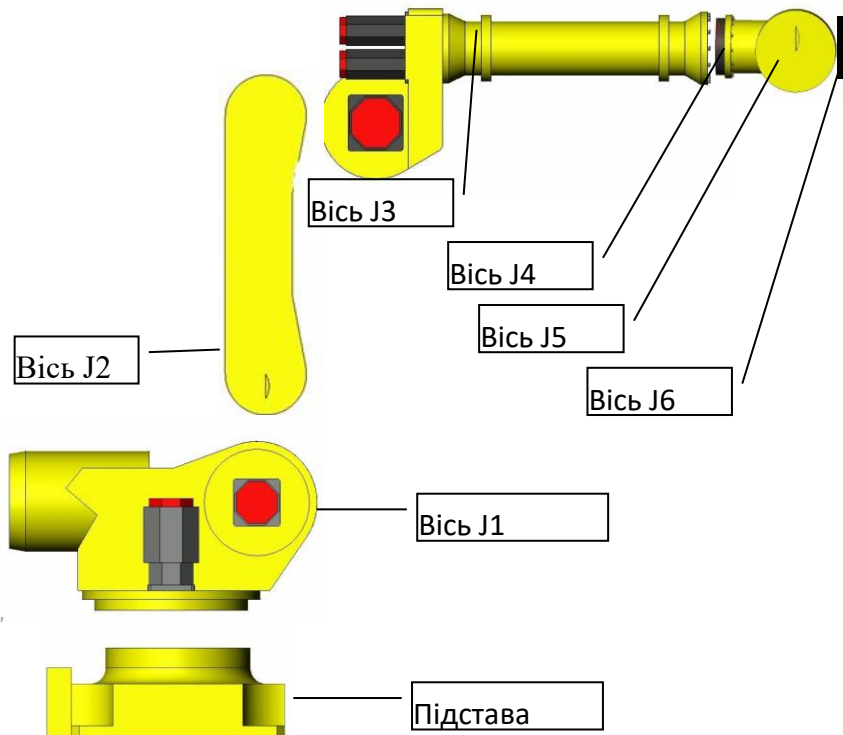


Рисунок 3.1 – Шість осей роботизованого комплексу «Fanuc» (Зроблено в SprutCAM)

**Етап 2** Вибрати систему координат: Joint; world; Tool; User Frame на маніпуляторі перед запуском програми. В РБ комплексу «Fanuc» зроблені чотири системи координат: Перша мирова (WORLD FRAME), (рисунок 3.3) друга вільна (JOINT FRAME), (рисунок 3.2), третя інструментальна (TOOL FRAME), (рисунок 3.4) користувальницька (USER FRAME) (рисунок 3.5). В програмному коді за рахунок трьох команд (Операторів) можна виставити автоматичне переключення [17].

Приклад рядків для автоматичного вибору потрібної системи координат та положення точок інструмента який налаштований для даної заготівлі:

- 1: PAYLOAD [1] ;
- 2: UFRAME\_NUM=1 ;
- 3: UTOOL\_NUM=10 ;

При написанні програмного коду для будь якої цілі, додавання цих рядків полегшить програмісту роботу. Так як при створенні нової програми на маніпуляторі, UFRAME\_NUM и UTOOL\_NUM прив'язуються самостійні ті які вибрані, без можливості зміни. Їхня кількість дорівнює десяти [18].



Рисунок 3.2 – Система управління осей «Joint» (Зроблено в SprutCAM)

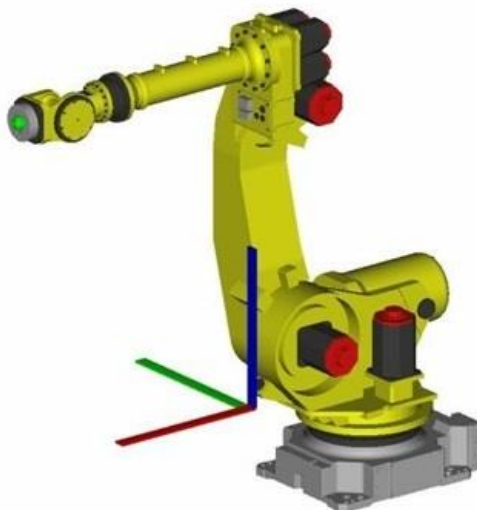


Рисунок 3.3 – Світові координати «World» (Зроблено в SprutCAM)

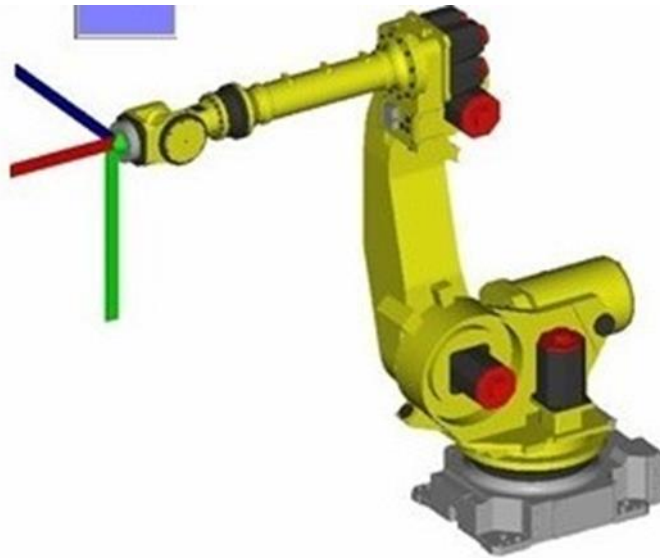


Рисунок 3.4 – Система координат Інструментом «Tool» (Зроблено в SprutCAM)

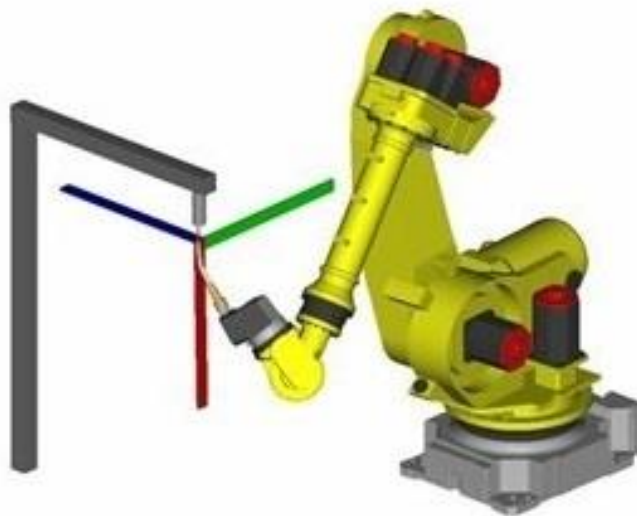


Рисунок 3.5 – Користувацька система координат «User Frame» (Зроблено в SprutCAM)

Система координат «Tool» – аналог декартової системи координат, у якому кінцева точка інструмента вже визначена. (TCP або TOOL CENTER POINT) Від чого формується і саме положенні даного інструмент [19].

### 3.2 Технологічна частина виробництва заготовок деталі авіадвигунів на роботизованому комплексі «Fanuc»

Перед тим як почати розробляти алгоритм програмного коду, програміст повинен вивчити креслення на (рисунок 3.6), а так як це експериментальне впровадження то розробити технологію яку формує спочатку сам програміст. Для виконання заготівлі в серійному виробництві необхідна побудована технологія, що складається з таких етапів.

**Етап 1** Встановити підкладку на планшайбу яка закріплена на позиціонері. Виміряти вимірювальним приладом радіальне биття яке не більше 0.5 мм і закріпити притисками. Протерти поверхню підкладки під адитивне наплавлення серветкою змоченою в ацетоні. Виставити режими зварювального приладу:

- $I_{CB} = 70 - 90$  Ампер;
- $I$  (імпульсу) – 70%;
- $I$  (паузи) – 30%;
- частота імпульсу – 0.8 Hz;
- швидкість подачі дроту = 0.75 мм/хв.;
- витрата Аг. плазми = 1.10 л/хв.;
- витрата Аг. зах. Дуги. = 14 – 18 л/хв.;
- електрод фальфрам = 3.2 Ø мм.;
- пластикове саплю = 2.6 Ø мм.;
- дріт ВЖ 98 Ø 1 мм.

Всі ці режими наплавлення на РБ комплексі «Fanuc» експериментально виявленні під деталь 4500301001. Програміст повинен контролювати які саме режими стоять, бо вони впливають на розрахунок часу для певних команд (Операторів), при розробленні алгоритму в програмному коді.



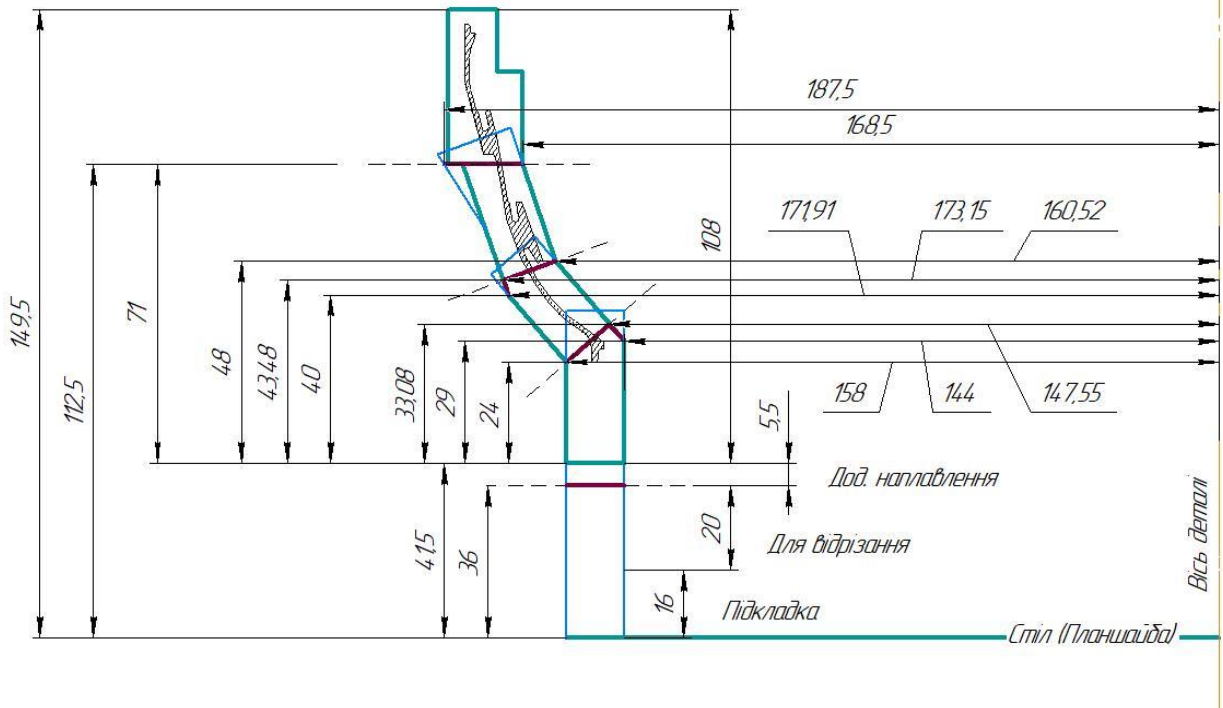


Рисунок 3.6 – Загальне креслення заготівлі 4500301001 (зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 2** Скоригувати готову програмовану програму для даної оснастки, а саме розрахувати ширину наплавлення та виставити дві позиційні точки наплавлення, враховуючи необхідний діаметр деталі з урахуванням розростання матеріалу за такими формулами [15]:

$$\frac{D * J}{3.14} = N$$

де  $J$  – дорівнює кроку наплавлення для даної заготівлі

$N$  – дорівнює кількість валиків

$D$  – діаметр заготівки

$$\frac{360}{N} = S$$

де  $S$  – дорівнює діапазон повороту столу

Розтікання матеріалу в цеховій середній температурі десь 2 – 3 мм.

**Етап 3** Необхідно наростити методом 3D наплавлення базу розміром 20 мм за висотою (рисунок 3.7), для подальшого використання даної оснастки. Також наплавити додатково 5.5 мм матеріалу для токарної операції з відрізування заготовки від оснастки.

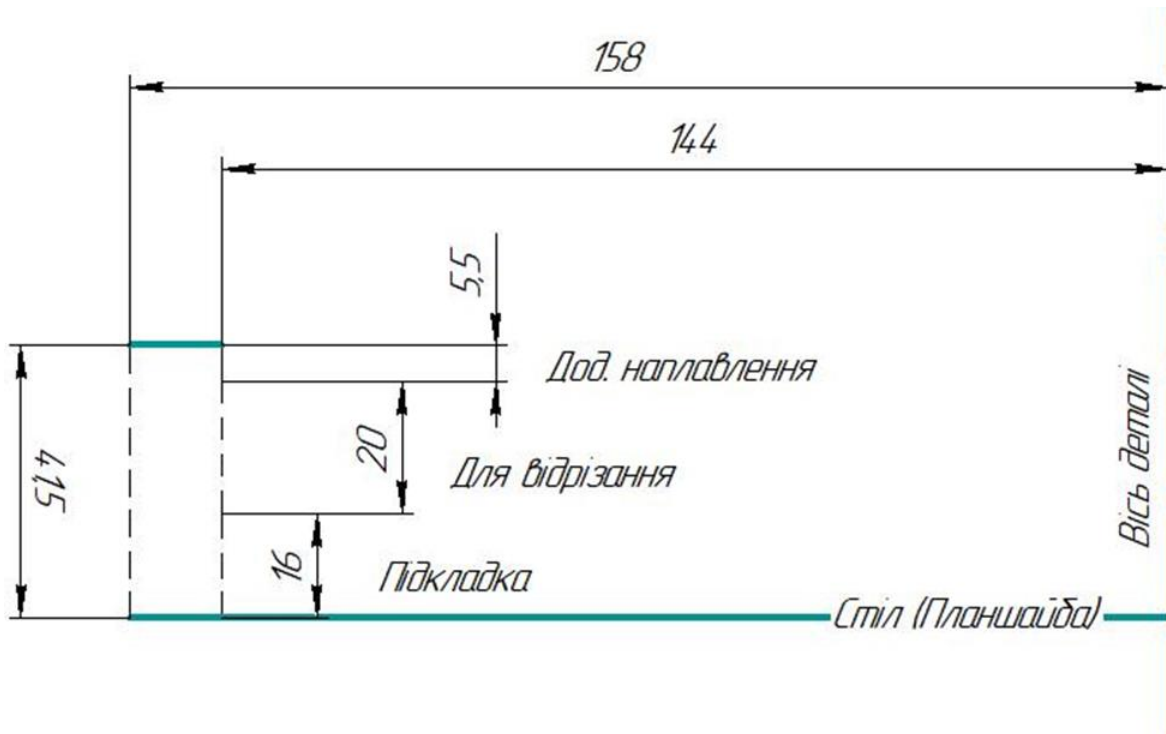


Рисунок 3.7 – Креслення майданчика для заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 4** В даний етап входить вимірювання ваги оснастки та витраченого матеріалу після пройденого етапу 3, а також вимірювання таких розмірів як висота, діаметр, та розтікання матеріалу для контролю допустимих розмірів та подальшого коригування позиційних реєстрів програмного коду, якщо буде треба. Після всіх перерахованих дій, продовжуємо нарощувати вже саму деталь за ескізом (рисунок 3.8), витримуючи задану товщину наплавлення. Після кожних двох проходів міряти внутрішній та зовнішній діаметр та висоту для кожного з них. Та вносити отримані розміри до компасу для перевірки під яким кутом йде вирощування заготівлі. Таким чином програміст РБ комплексу «Fanuc» може

контролювати правильне наплавлення складної деталі, а деталь 4500301001 з трьома зміщеннями кутів є складною авіаційною деталлю і вимагає до себе увагу та контроль.

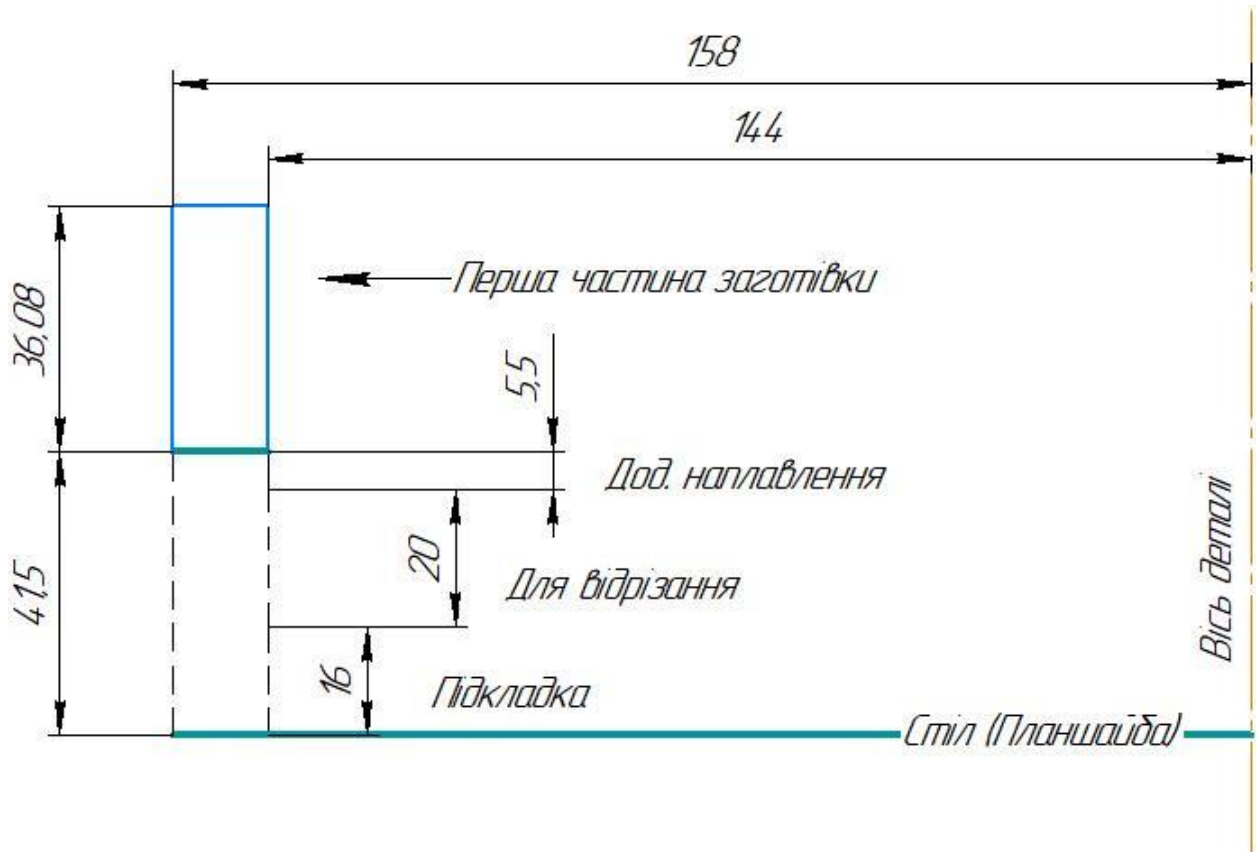


Рисунок 3.8 – Креслення першої частини заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 5** Отримавши необхідні розміри за (рисунок 3.8), провести першу токарну операцію на універсальному верстаті для нарощування зміщення на кут, яка зображена (рисунок 3.9). В позиційних регістрах на кожній точці в програмному коді змінюємо в GP MASK 2 кут нахилу на той який нам потрібен, в даному випадку це кут  $41^\circ$ . Дана група GP MASK 2 відповідає за контроль столом (позиціонером) в якому є дві осі пересування. При написанні алгоритму треба вказувати в присвоєним точкам позиційних

регістрів який компонент даного комплексу «Fanuc» ми змінюємо, перший (Робот) чи другий (позиціонер).

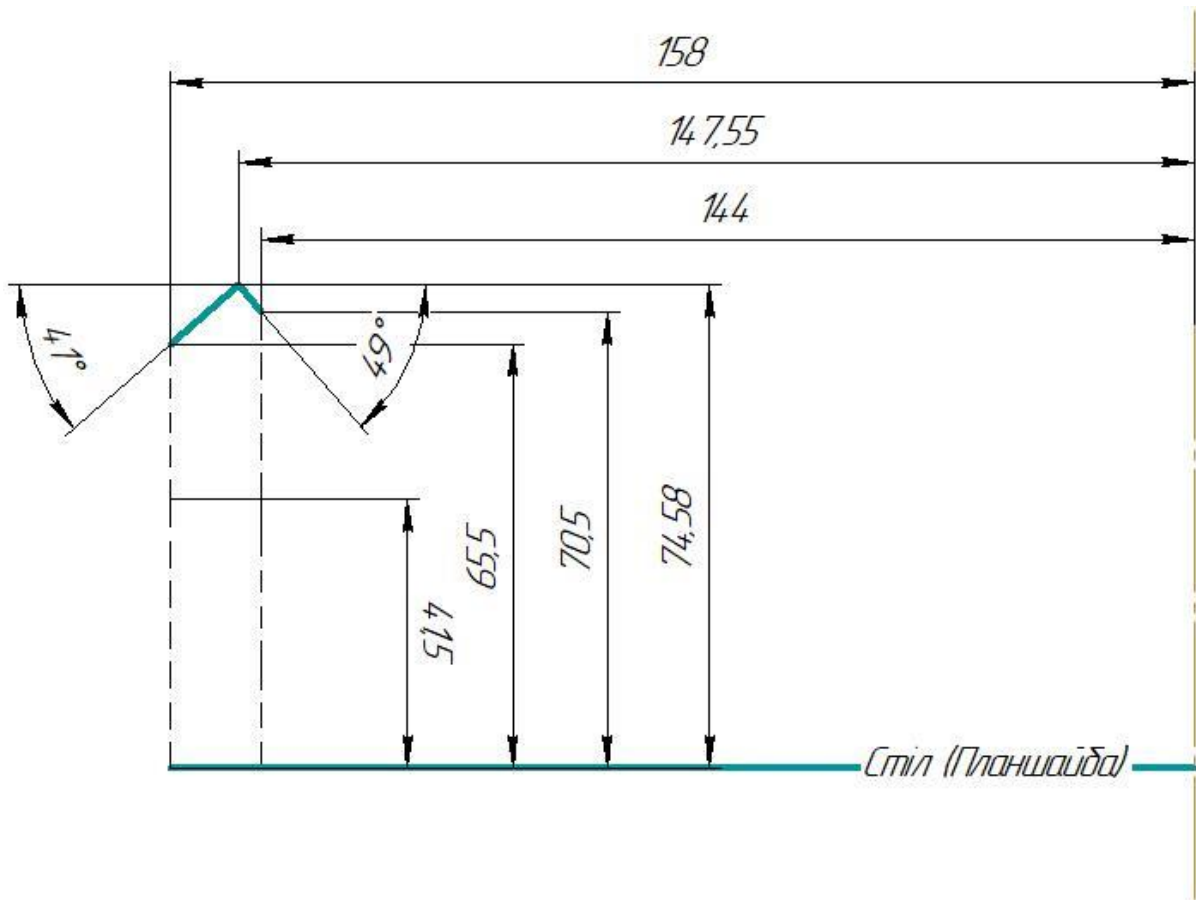


Рисунок 3.9 – Креслення першої операції на універсальному верстаті деталі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 6** Після першої токарної операції, виміряти вимірювальним приладом кутоміром внутрішній і зовнішній кути яким відповідає (рисунок 3.9). Встановити деталь на планшайбу, виставити радіальне биття підкладки у допуску 0.5 мм і закріпити притисками. Повернути позиціонер на  $41^\circ$  в позиціономих регістрах GP MASK 2. Виставити дві позиційні точки наплавлення и тим самим отримати майданчик для зварювального наплавлення під кутом  $90^\circ$ . Далі йде нарощування деталі під кутом до наступного зміщення на кут за (рисунок 3.10)

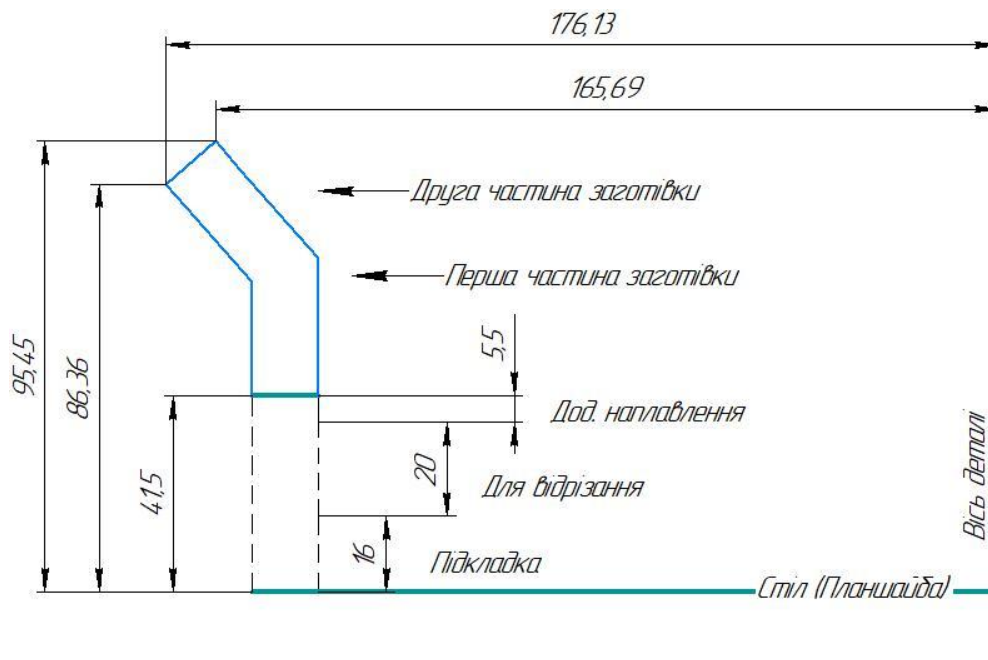


Рисунок 3.10 – Креслення другої частини заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 7** Отримавши необхідні розміри за (рисунок 3.10), провести другу операцію для зміщення на кут  $19,69^\circ$  який зображено на (рисунок 3.11).

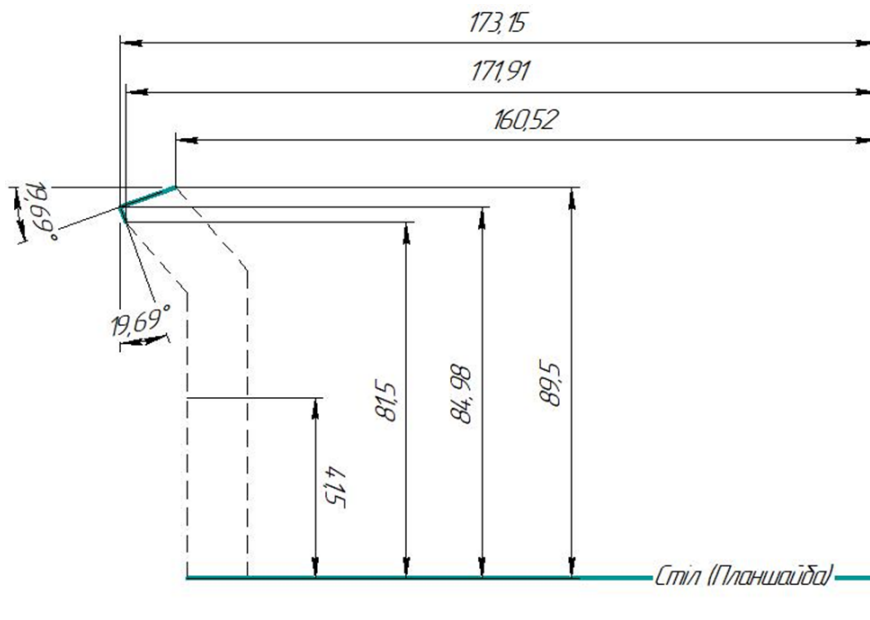


Рисунок 3.11 – Креслення другої операції на універсальному верстаті деталі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 8** Після другої токарної операції виміряти вимірювальним приладом кут внутрішній і зовнішній кути яким відповідає (рисунку 3.11). Встановити деталь на планшайбу, виставити радіальне биття підкладки у допуску 0.5 мм і закріпити притисками. Повернути позиціонер на  $19.69^\circ$  в позиційних реєстрах GP MASK 2. Виставити дві позиційні точки наплавлення и тим самим отримати майданчик для зварювального вирощування під кутом  $90^\circ$ . Нарощувати деталь під кутом до наступного зміщення на кут за кресленням (рисунок 3.12).

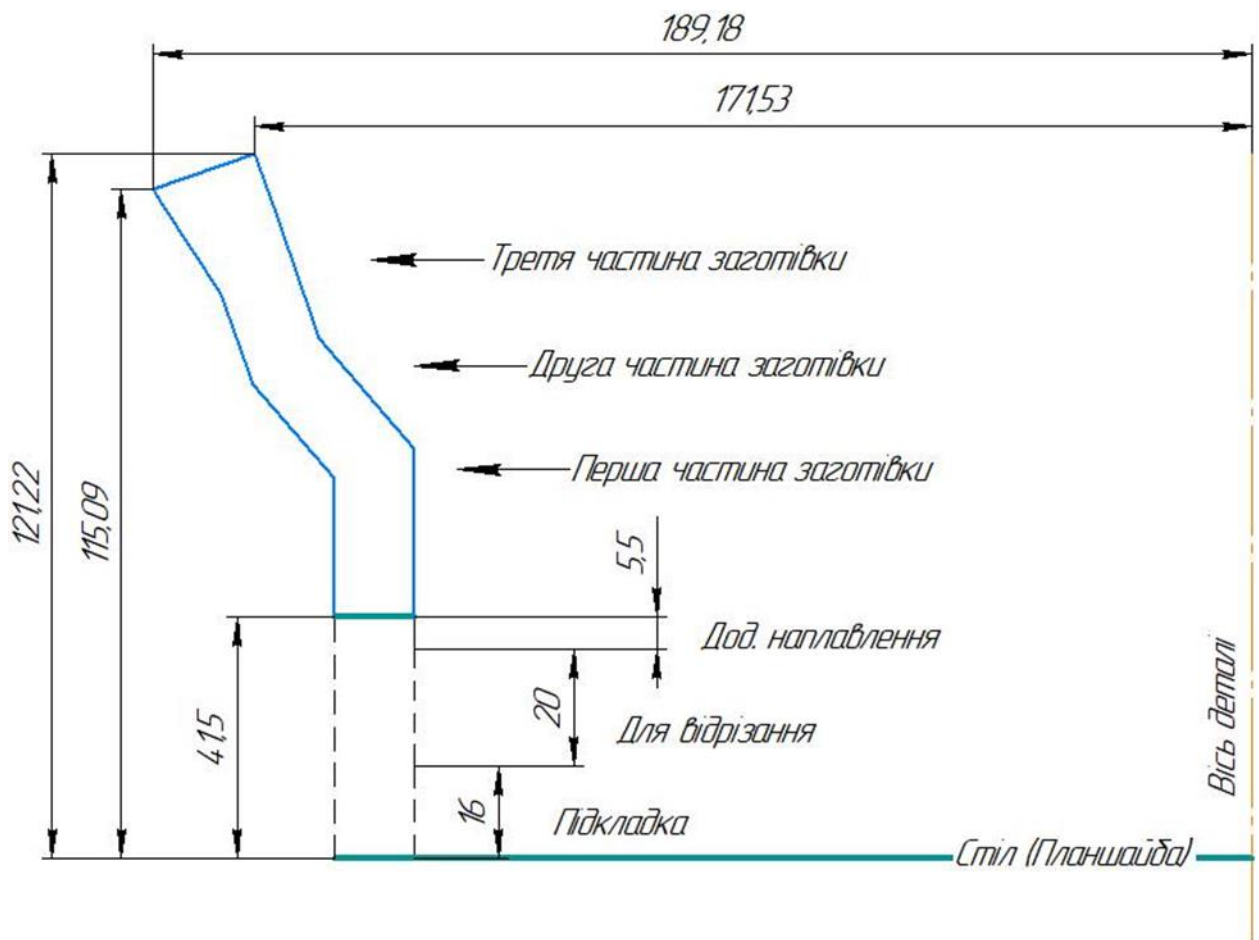


Рисунок 3.12 – Креслення третьої частини заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 9** Отримавши необхідні розміри за (рисунок 3.12), провести третю токарну операцію, суть якої полягає в забіленні під  $90^\circ$  за (рисунок 3.13).

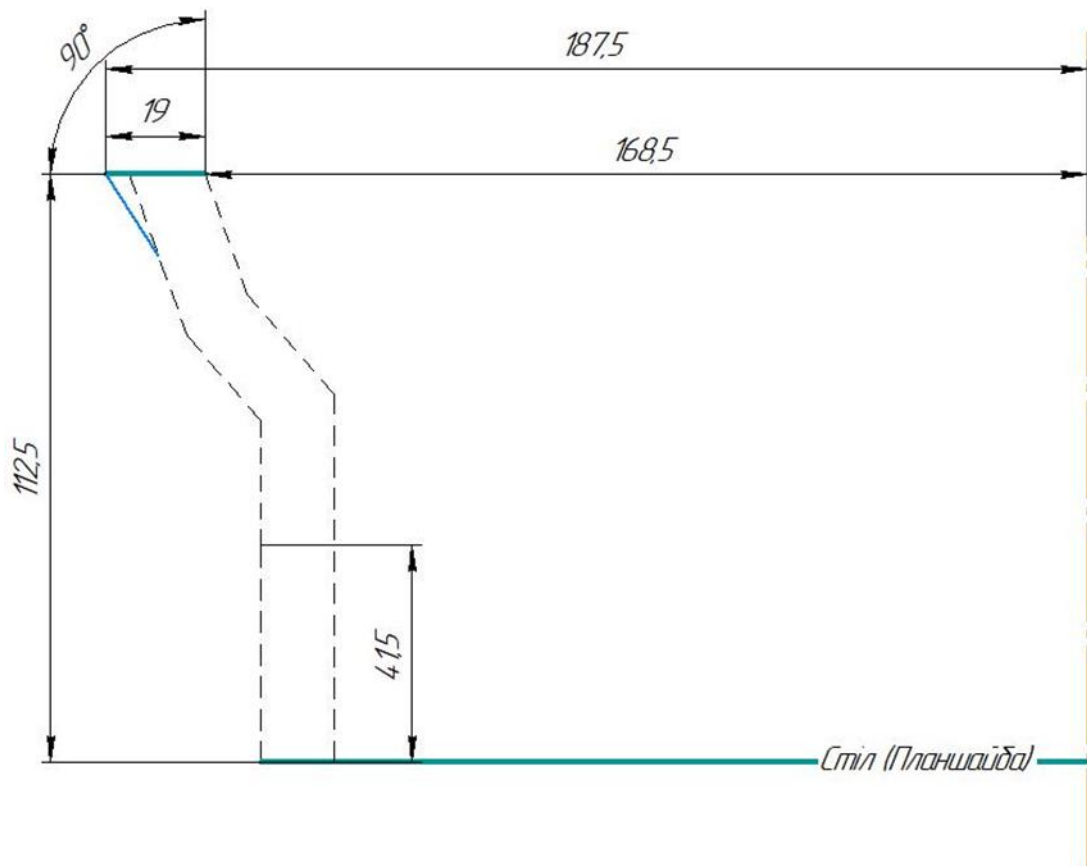


Рисунок 3.13 – Креслення третьої операції на універсальному верстаті деталі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 10** Після третьої токарної операції виміряти вимірювальним приладом висоту, зовнішній та внутрішній діаметр якому відповідає схема 8. Встановити деталь на планшайбу, виставити радіальне биття підкладки у допуску 0.5 мм і закріпити притисками. Повернути позиціонер на  $0^\circ$  в позиційних реєстрах GP MASK 2. Виставити дві позиційні точки [16] наплавлення і тим самим отримати майданчик для зварювального наплавлення під кутом  $90^\circ$ . Нарощувати деталь до потрібного зміщення на діаметр за (рисунком 3.14).

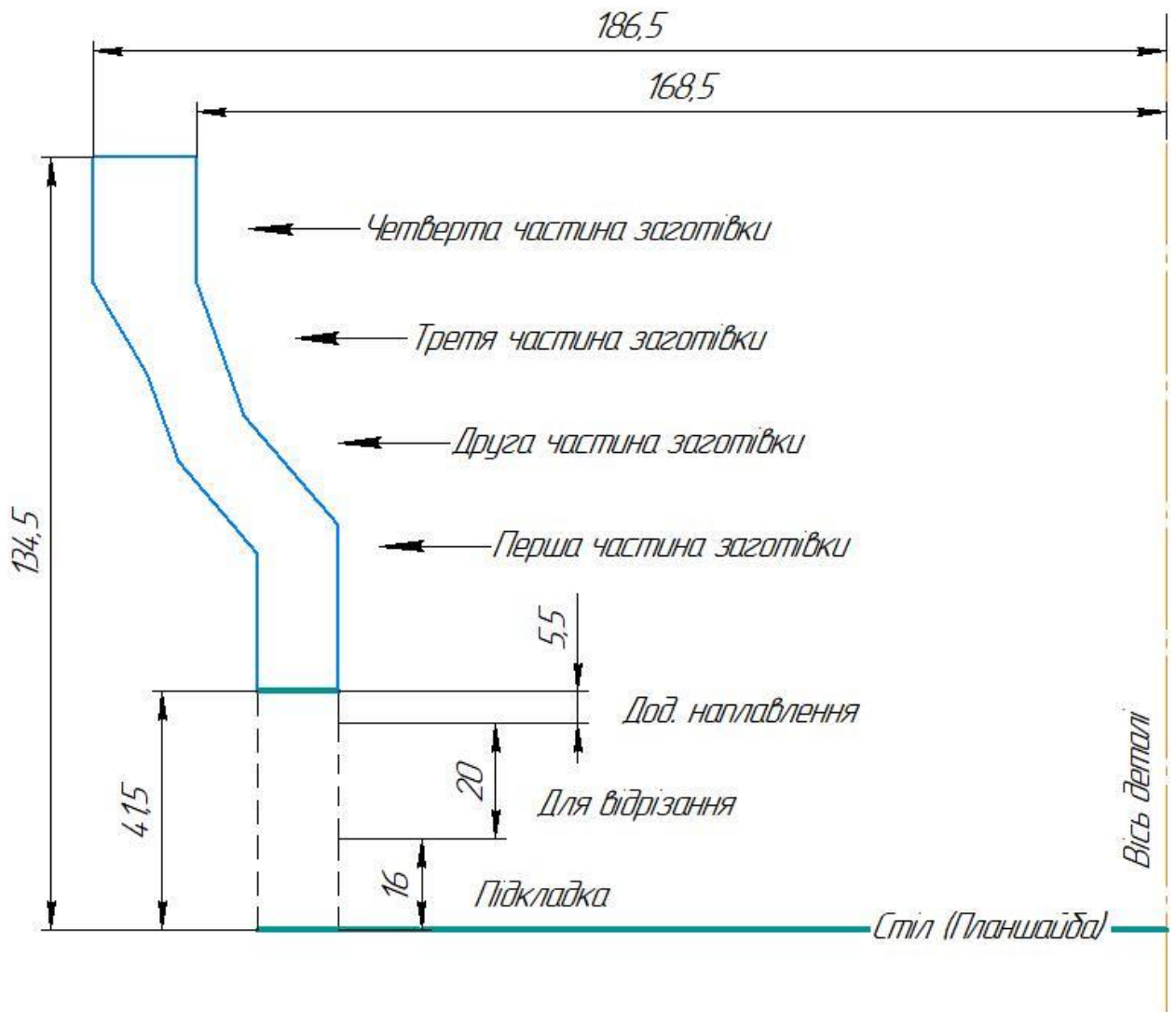


Рисунок 3.14 – Креслення четвертої частини заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 11** Отримавши необхідні розміри за (рисунком 3.14), скоригувати програму на зміну загальної ширини деталі роблячи її меншою, збільшуючи внутрішній діаметр наплавлення за кресленням (рисунок 3.15) та продовжити нарощування заготівки до потрібних розмірів за висотою та шириною. В процесі наплавлення РБ комплексом «Fanuc» коригувати на маніпуляторі позиційні реєстри для отримання рівних стінок потрібного розміру, так як наплавлення ширшого елемента може бути не стійким та мати підвищене розтікання матеріалу.



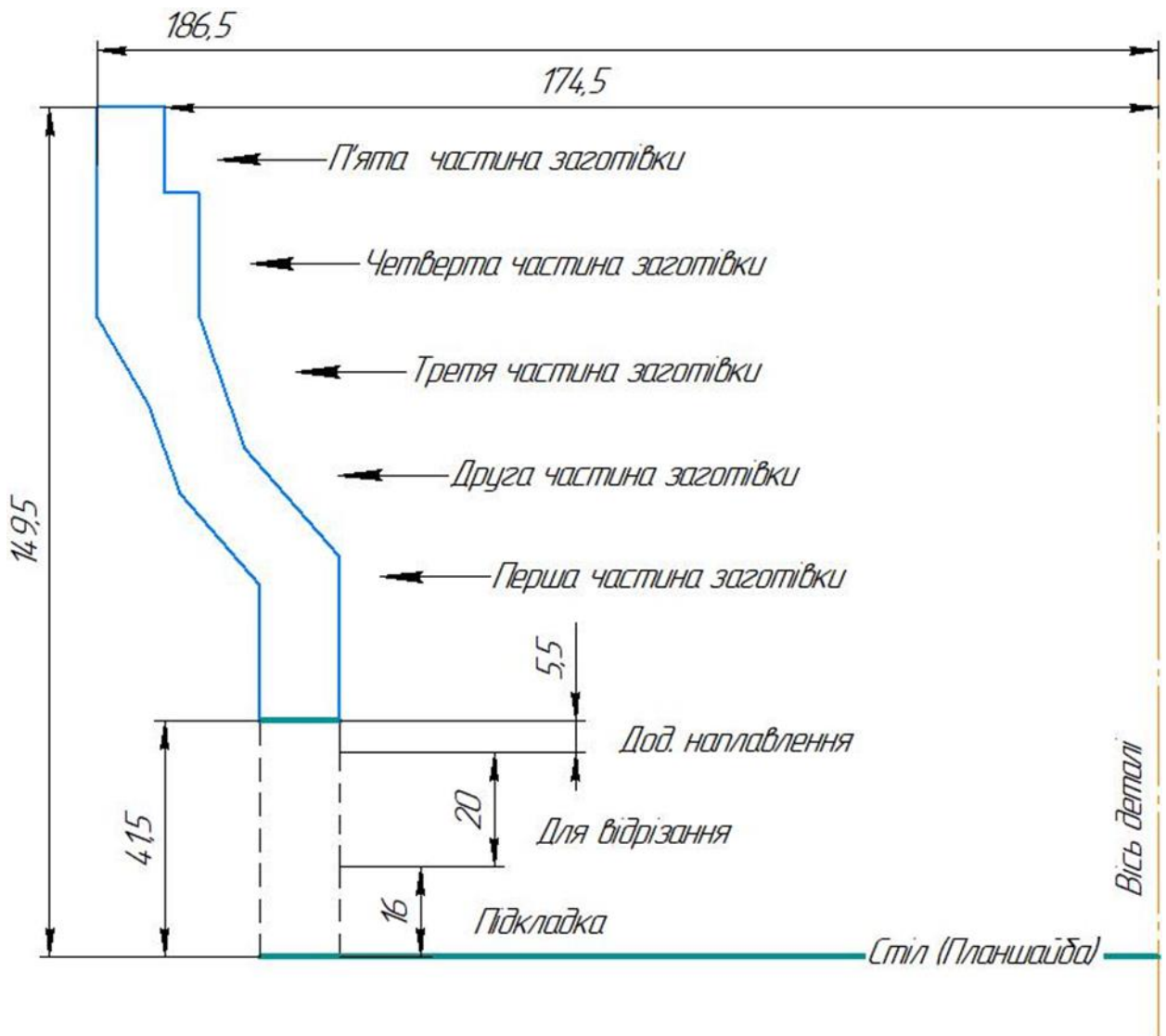


Рисунок 3.15 – Креслення п'ятої частини заготівлі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

**Етап 12** Отримавши необхідні розміри за (рисунок 3.15), провести четверту токарну операцію на універсальному стані для відділення оснастки та напавленої початкової бази від деталі за (рисунок 3.16). Скориставшись технологічними розрахунками різання металу (ВЖ98ВИ) та підібраним ріжучим інструментом, зменшити витрату матеріалу при розточуванні даної заготівлі. Що зробить більш вигідно економічну віддачу.

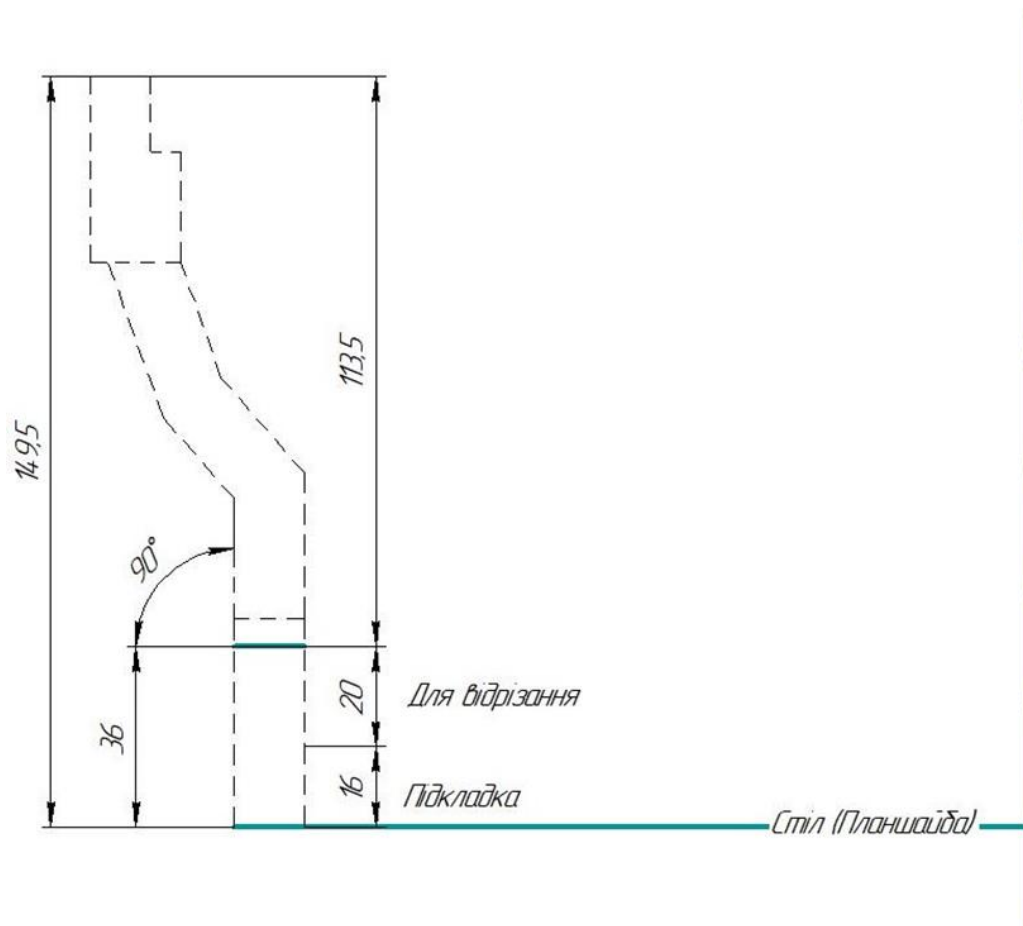


Рисунок 3.16 – Креслення четвертої операції на універсальному верстаті деталі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

Дані етапи показують весь процес наплавлення даної заготовки та необхідні дії для її реалізації. Де інженер – програміст контролює усі моменти на кожному етапі, і якщо необхідно коригує програмний код та змінює алгоритм програми для вирішування різних проблем чи задач що з'явилися у певному ході виконання даної роботи. Також у технологічну карту входять такі креслення [59].

Креслення контрольних точок наплавлення (рисунок 3.17), показує мінімально необхідні розміри для проведення чотирьох токарних операцій. А саме розмірність припусків для отримання розмірів, необхідних для виконання етапів наплавлення.

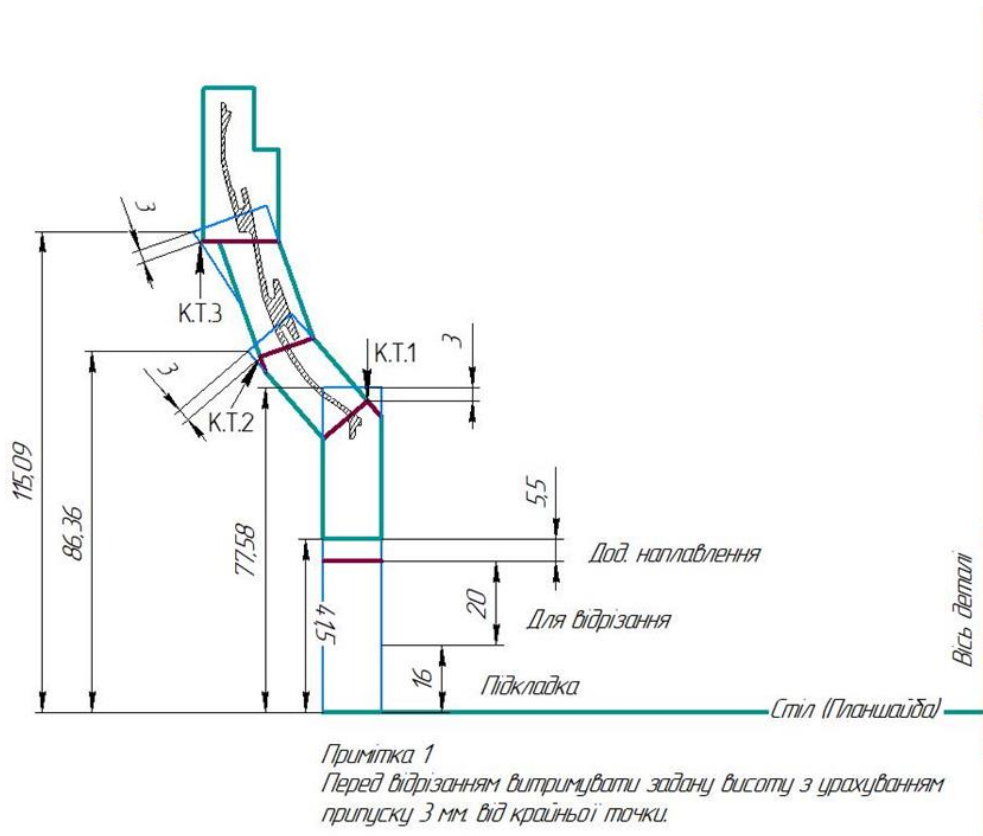


Рисунок 3.17 – Креслення контрольних точок наплавлення деталі 4500301001  
(Зроблено в КОМПАС-3D v17)

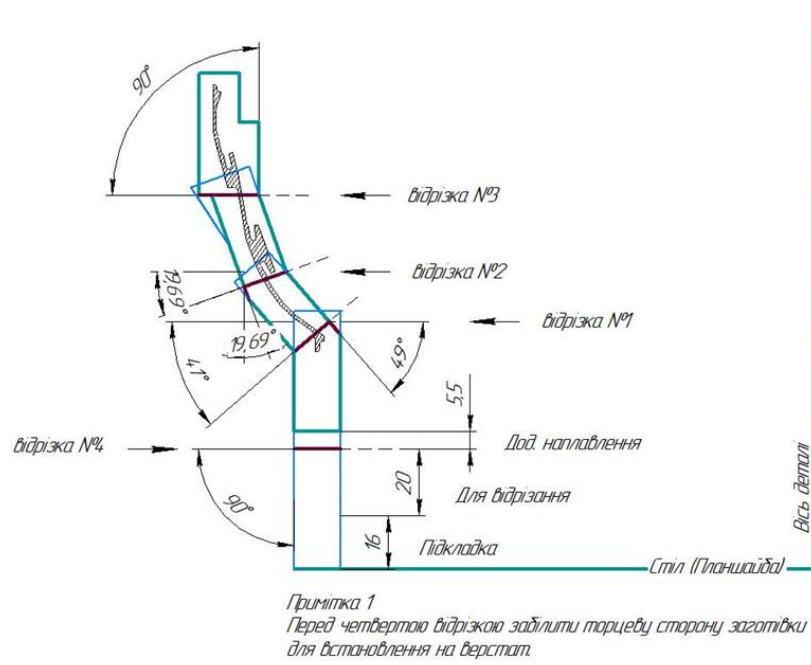


Рисунок 3.18 – Креслення чотирьох токарних операцій наплавлення деталі  
4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17)

Загальне креслення чотирьох токарних операцій (рисунок 3.18), три з яких виконують зміщення на кут для наплавлення під кутом  $90^\circ$ , перпендикулярно до зони нарощування. А четверта операція необхідна для відділення готової заготовки від оснащення.

Загальна схема всіх необхідних поворотів позиціонера на кут після перших трьох токарних операцій (3.19) для реалізації поставленого технічного завдання даної заготівлі. Показує послідовність токарних операцій та напрямок у який бік необхідно регулювати стіл нарощування цієї заготовки [58].

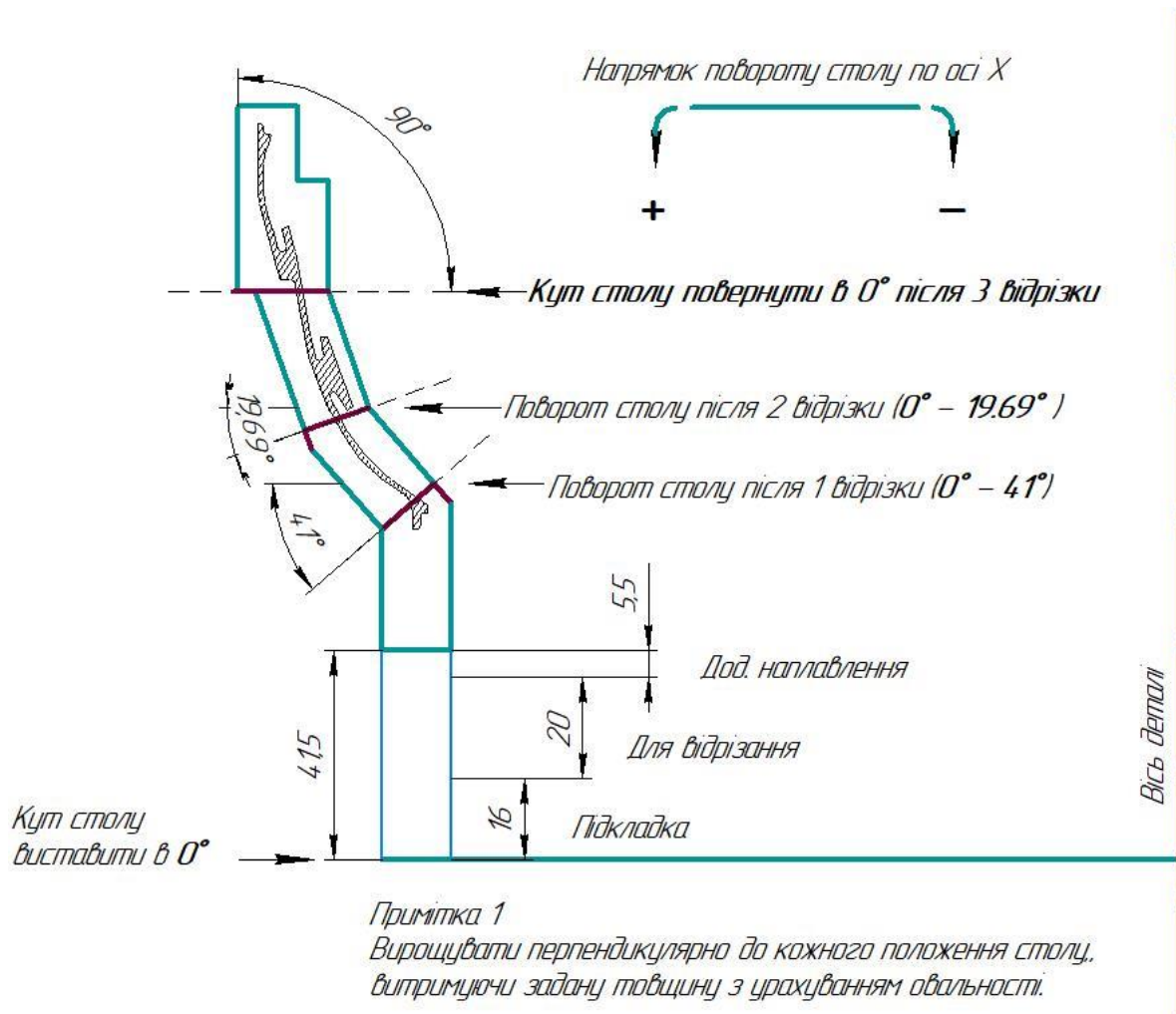


Рисунок 3.19 – Креслення повороту столу для наплавлення деталі 4500301001 (Зроблено в КОМПАС-3D v17).

### 3.3 Розробка алгоритму та написання програми для 3D друку заготовки на роботизованому комплексі «Fanuc».

Виведенні регістри на головний екран маніпулятора для швидкого редагування під час наплавлення заготовлі деталі 4500301001. Так як під час автоматичної роботи 3D комплексу «Fanuc» редагувати саму програму не можна, тому є вікно с регістрами (таблиця 3.1) та позиційними регістрами які мають прямий зв'язок с алгоритмом та координатами точок в програмному коді.

Таблиця 3.1 – Дані регістрів

R1:X	=0
R2:Y	= 2.5
R3:Z	= 3
R4:Speed 1	= 1.5
R5:Speed 2	= 2.0
R6:Shift	= 0
R7:All shift	= (D:R2*3.14)
R8:Up	= 0
R9:All up	= 10
R10:Qvality	=(360:R7)

Програмний код для наплавлення заготовки деталі 4500301001 який складається з тридцяти восьми рядків (таблиця 3.2) В ній повна робота всього комплексу 3D друку авіаційної деталі складної конструкції з трьома змінними кутами да різним розміром стінок. Яка просуваються по всім координатам.

Таблиця 3.2 – Програмний код деталі 4500301001

1: ;	Пропуск
2: ;	Пропуск
3: J P[1] 15% FINE Offset,PR[2]	Домашня точка
4: DO[114:pump ]=ON	Увімкнення охолодження
5: DO[109:pilot on/off]=ON	Увімкнення пілотної дуги
6: WAIT DI[81:pilot active]=ON	Перевірка пілотної дуги
7: L P[2] 100mm/sec FINE Offset,PR[2]	Початкова точка
8: WAIT 1.50(sec)	Очікування для оператора
9: DO[110:arc on/off]=ON	Увімкнення основної дуги
10: WAIT DI[83:plasma active]=ON	Перевірка основної дуги плазми
11: WAIT 1.50(sec)	Очікування наплавлення
12: DO[111:wire forward]=ON	Увімкнення подачі проволочки
13: WAIT 1.00(sec)	Очікування заповнення ванни
14: LBL[1]	Мітка першого циклу
15: L P[2] 250mm/sec CNT20 Offset,PR[2]	Дублювання другої точки для зміни швидкості обороту столу
16: L P[2] R[4:Speed 1]mm/sec CNT20 Offset,PR[2]	Зафіксованою швидкістю робота.
17: L P[3] R[4:Speed 1]mm/sec CNT20 Offset,PR[3]	Кінцева точка для робота
18: R[6:Shift]=R[6:Shift]+1	Лічильник оборотів
19: PR[GP2:2,2]=PR[GP2:2,2]+R[10:quality]	Крок столу в градусах для
20: PR[GP2:3,2]=PR[GP2:3,2]+R[10:quality]	Крок столу в градусах для
21: L P[3] 250mm/sec CNT20 Offset,PR[3]	Зміни швидкості столу.
22: L P[2] R[4:Speed 1]mm/sec CNT20 Offset,PR[2]	Перехід робота до другої точки
23: R[6:Shift]=R[6:Shift]+1	Лічильник оборотів столу

## Продовження таблиці 3.2

24: PR[GP2:2,2]=PR[GP2:2,2]+R[10:quality]	Крок столу в градусах
25: PR[GP2:3,2]=PR[GP2:3,2]+R[10:quality]	Крок столу в градусах
26: IF R[6:Shift]<=R[7:All shift],JMP LBL[1]	Умова для першого циклу
27: IF R[6:Shift]>R[7:All shift],JMP LBL[2]	Умова для другого циклу
28: LBL[2]	Мітка другого циклу
29: PR[GP1:2,3]=PR[GP1:2,3]+R[3:Z]	Підйом по координаті Z
30: PR[GP1:3,3]=PR[GP1:3,3]+R[3:Z]	Підйом по координаті Z
31: R[6:Shift]=0	Обнуління лічильника
32: R[8:Up]=R[8:Up]+1	Лічильник для рахування
33: IF R[8:Up]<R[9:All up],JMP LBL[1]	Умова для підйомів по Z
34: DO[111:wire forvard]=OFF	Вимкнення подачі дроту
35: WAIT 1.50(sec)	Допоміжне очікування
36: DO[110:arc on/off]=OFF	Вимкнення дуги
37: WAIT 4.00(sec)	Очікування
38: J P[1] 15% FINE Offset,PR[2]	Перехд до домашньої точки

В даному програмному коді присутні три типи алгоритмів, тому ту є послідовне виконання від початку до кінця, повторення циклу за певних умов та три шляхи виконання програмного коду [24].

**Висновки.** В цьому розділі присутні всі дії програміста щодо виготовлення годної авіаційної продукції на РБ комплексі «Fanuc». Технічна частина полягає в виборі системи координат на маніпуляторі для всього комплексу та закріпленому інструменту перед запуском програми. Технологічна частина відповідає на вимоги для виконання поставленого завдання та наплавлення годної заготовки. Для виконання заготовки в серійному виробництві необхідна побудована технологія яка експериментальним шляхом при впровадженні отримала дійсні

характеристики, та на її основі змогли повністю повторити процес та отримати довільну заготовку. Підрозділ розробки алгоритму та написання програмного коду на основі перших двох підрозділів показує весь математичний алгоритм програмного коду, який дозволяє повністю виконати поставлену задачу щодо виготовлення заготовки авіаційної деталі 4500301001 з дроту матеріалу ВЖ98ВІ. Даний програмний код є універсальним і може виготовлювати заготовки інших круглих форм та з будь-якими кутами.



## 4 ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ МАТЕРІАЛУ ЗАГОТІВКИ ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ АДИТИВНОГО 3D ДРУКУ НА РОБОТИЗОВАНОМУ КОМПЛЕКСІ «FANUC»

### 4.1 Проведення експерименту з оцінки якості результату отриманого за 3D друком

Для дослідження якості та властивостей матеріалу в бюро досліджень були відправлені зразки отриманої заготовки розміром 140x80x14 мм із сплаву EI868 (ВЖ98ВИ), одержані методом прямого вирощування плазмовим наплавленням дротом (ПНП). Режими вирощування зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ) представлені (таблиці 4.1).

Таблиця 4.1 – Режими вирощування зразків зі сплаву ВЖ98ВИ

Параметри режиму	Значення
Діаметр присадного дроту $d_{п.п.}$ , мм	1
Діаметр вольфрамового електрода $d_w$ , мм	3,2
Сила струму $I_{св}$ , А	85-90
Швидкість зварювання $V_{св}$ , мм/с	0,7
Швидкість подачі дроту $V_{п.п.}$ , м/хв	0,74
Діаметр плазми. сопла, мм	2,6
Витрати плазм. газу $Q_{Ar}$ , л/хв	0,9
Витрата захисного газу $Q_{Ar}$ , л/хв	12
Параметри коливань	
– частота, Hz	0,3
– затримка, с	0,7
– амплітуда, мм	7
Параметри імпульсу	
– частота, Hz	2,5
– ток паузи $I_{п}$ , А	30% $I_{св}$

Ця робота проводилася згідно з паспортом №П.АІ-222.043.2019 "Відпрацювання технології отримання кільцевих заготовок адитивним вирощуванням".

Зразки були вирощені на дослідно-експериментальній ділянці адитивного вирощування УГМет на роботизованій установці, до складу якої входить: робот FANUC M-710iC (Японія) та плазмове джерело живлення SBI PMI-350 AC/DC TL (Австрія).

Дослідження якості матеріалу зразків, отриманих методом прямого вирощування ПНП проводилося макро- та мікроструктурним аналізом шліфів до, та після термообробки (ТО) виконаної за серійним режимом.

Застосовуваного для сплаву ЭИ868 (ВЖ98ВИ) для підприємства: загартування з  $T=1200^{\circ}\text{C}$  витримка 1 годину, охолодження повітря. Зовнішній вигляд одного з вирощених зразків, що надійшли на дослідження, подано на (рисунок 4.1).



Рисунок 4.1 – Зовнішній вигляд вирощеного зразка

## 4.2 Макроструктурний аналіз зразків

Макроструктурний аналіз проводився на шліфах, виготовлених з вирощених зразків у поздовжньому та поперечному напрямку після

травлення у реактиві ФРІ. Макроструктура зразків до та після термообробки шарувата характерна для багат шарового наплавлення (рисунку 4.2).



а – поздовжній напрямок



б – поперечний напрямок

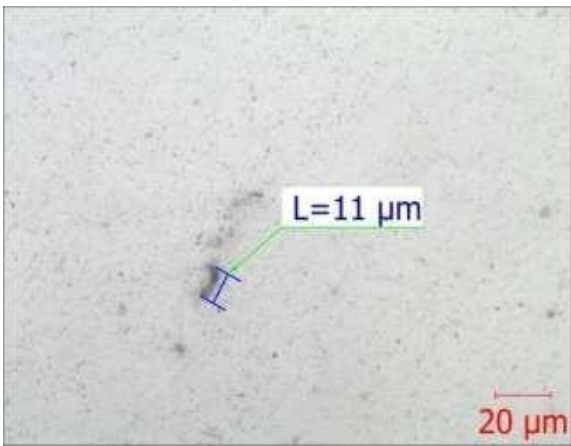
Рисунок 4.2 – Макроструктура зразків

Шарувата будова структури з зонами сплавлення, що рівномірно чергуються, спостерігається як у вертикальному (рисунку 4.2), а, так і в горизонтальному напрямку (рисунку 4.2), що пов'язано з коливальним рухом плазмотрона при наплавленні.

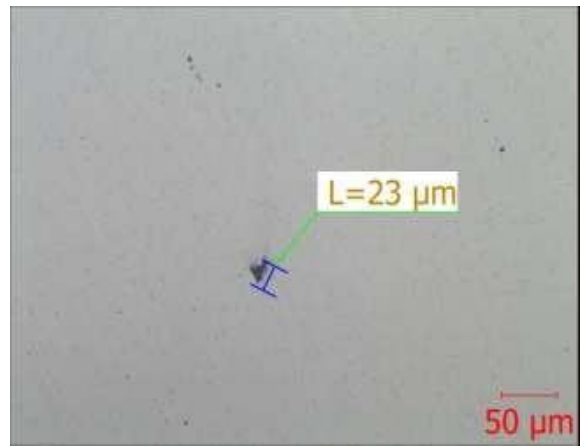
### 4.3 Мікроструктурний аналіз зразків до термообробки

Мікроструктурний аналіз проводився на шліфах, виготовлених у поздовжньому та поперечному напрямку.

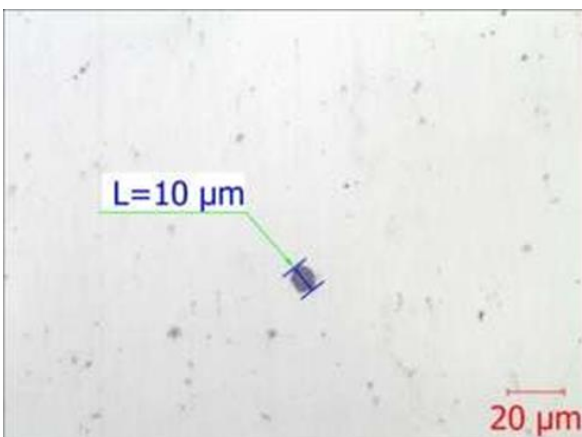
Металографічне дослідження нетравлених шліфів показало, що метал зразків щільний, у полі зору виявлено наявність поодиноких мікропор та раковин розміром до 29 мкм (рисунку 4.3). Дефектів металургійного характеру як несплавлене і тріщини не виявлено.



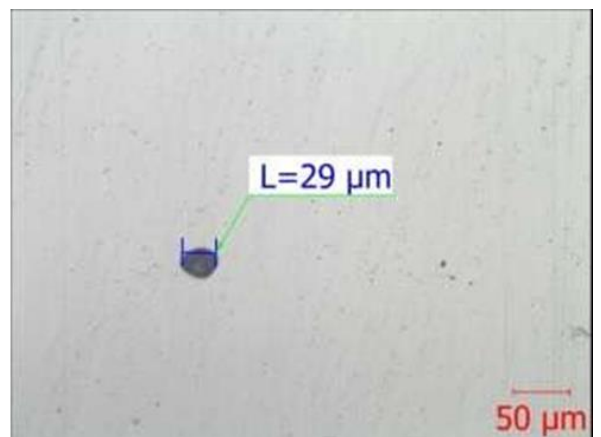
а – раковина, зб. х200



б – раковина, зб. х500



в – час, зб. х500



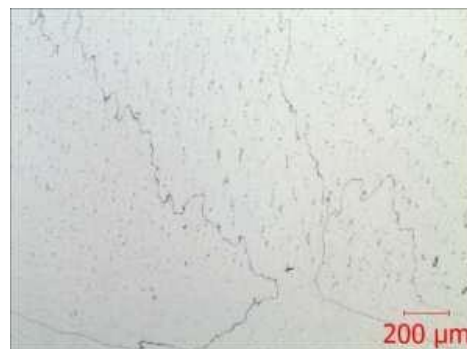
г – час, зб. х200

Рисунок 4.3 – Шліфи не травленні (зроблені під мікроскопом)

Дослідження травлених шліфів у реактиві «Царська горілка» ( $\text{HNO}_3$  – 10 мл,  $\text{HCl}$  – 30 мл), показало, що мікроструктура вихідних зразків (до термообробки) дендритної будови з витягнутими зернами у напрямку відведення тепла (рисунку 4.4), є  $\gamma$ - твердий розчин з наявністю нітридів, карбонітридів та карбідів, розташованих упорядковано у напрямку відведення тепла в процесі вирощування (поперек шарів), перегріву не виявлено (рисунку 4.4), У мікроструктурі лінії сплавлення не проглядаються, структура є однорідною із взаємним проростанням зерен між шарами [36].



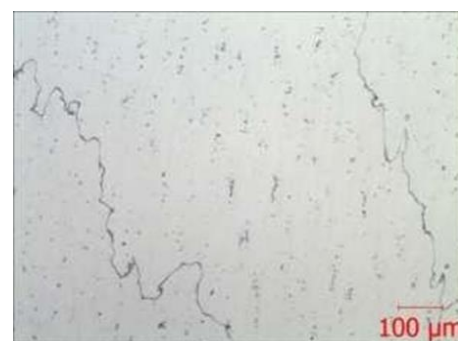
а – Поперечний, зб. x50



б – Поздовжній, зб. x50



в – Поперечний, зб. x100



г – Поздовжній, зб. x100



д – Поперечний, зб. x200



е – Поздовжній, зб. x200



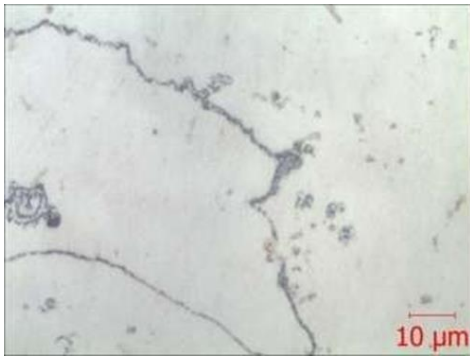
ж – Поперечний, зб. x500



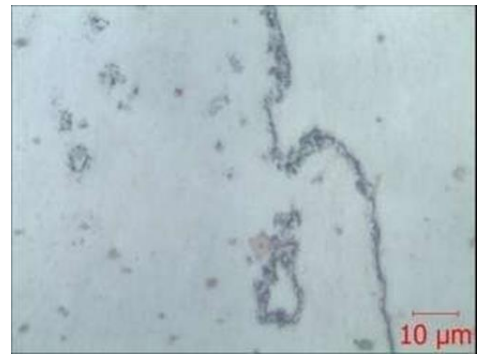
з – Поздовжній, зб. x500

Рисунок 4.4 – Структура зразків до термообробки (зроблені під мікроскопом)

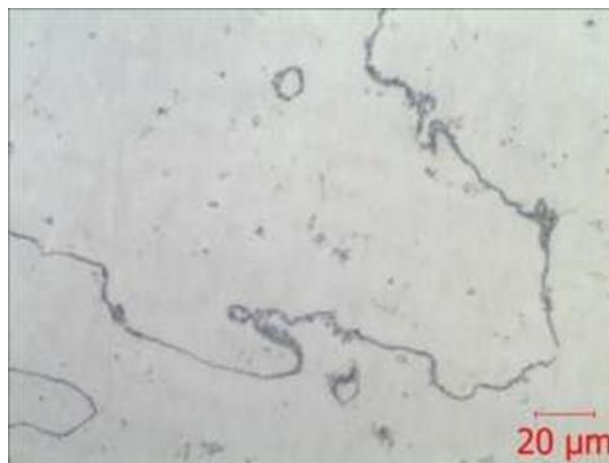
У мікроструктурі матеріалу зразків є скупчення карбідів по межах зерен (рисунку 4.5).



а – Поздовжній, зб. x1000



б – Поперечний, зб. x1000



в – поздовжній, зб. x500

Рисунок 4.5 – Скупчення карбідів по межах зерен (зроблені під мікроскопом)

#### 4.4 Мікроструктурний аналіз зразка після термообробки

Дослідження травлених шліфів у реактиві «Царська горілка» ( $\text{HNO}_3$  – 10 мл,  $\text{HCl}$  – 30 мл), виготовлених у поздовжньому та поперечному напрямку, показало, що мікроструктура зразків після термообробки



дендритної будови з витягнутими зернами у напрямку відведення тепла (рис. б), являє собою  $\gamma$ -твердий розчин з наявністю нітридів, карбонітридів та карбідів. Присутня та ж спрямованість їх розташування у напрямку відведення тепла у процесі вирощування (поперек шарів) як і до термообробки. У мікроструктурі лінії сплавлення не проглядаються, структура є однорідною із взаємним проростанням зерен між шарами. Мікроструктура відповідає нормальному термообробленому стану сплаву EI868 (ВЖ98ВИ), перегріву не виявлено (рисунок 4.6).

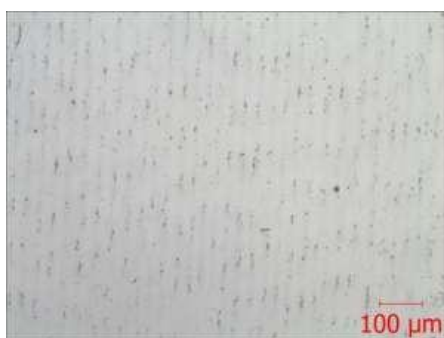
Результати рентгеноспектрального мікроаналізу (РСМА) виконаного на растровому електронному мікроскопі JEOL JSM-IT300LV із зазначенням хімічного складу фаз наведено у додатку. У мікроструктурі матеріалу зразків присутня полосчастість у напрямку відведення тепла (поперек шарів), пов'язана з невеликою (до 2%) ліквіацією по хрому та вольфраму (рисунок 4.6) [37].



а – Поперечний, зб. X50



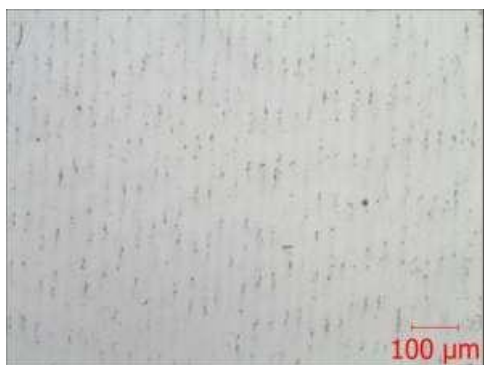
б – Поздовжній, зб. X50



в – Поперечний, зб. X100



г – Поздовжній, зб. X100



д – Поперечний, зб. X100



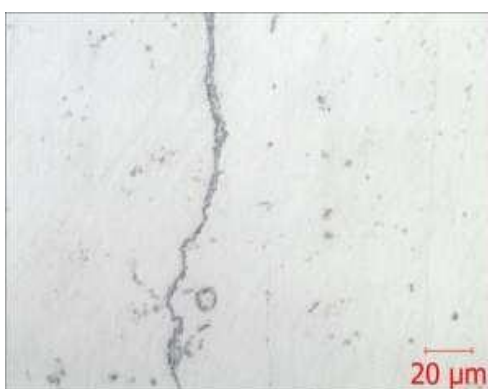
е – Поздовжній, зб. X100



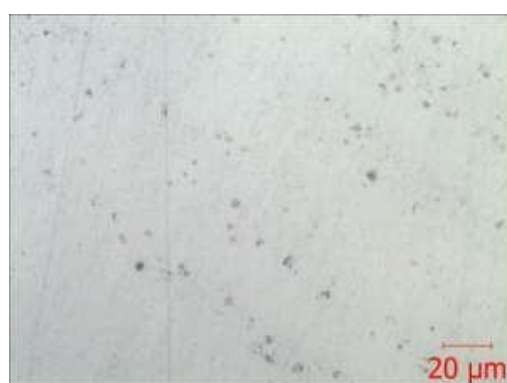
є – Поперечний, зб. X200



ж – Поздовжній, зб. X200



з – Поперечний, зб. X500



и – Поздовжній, зб. X500

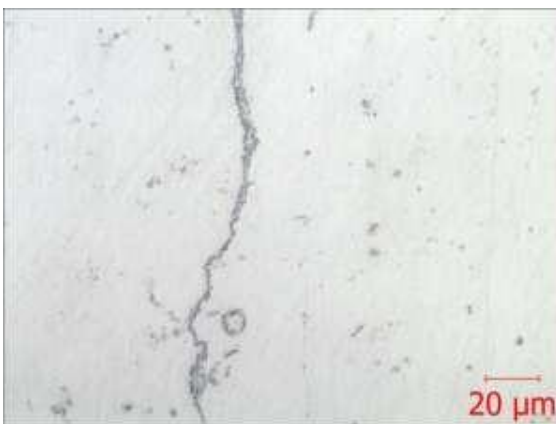




а – Поперечний, зб. X200



б – Поздовжній, зб. X200



в – Поперечний, зб. X500

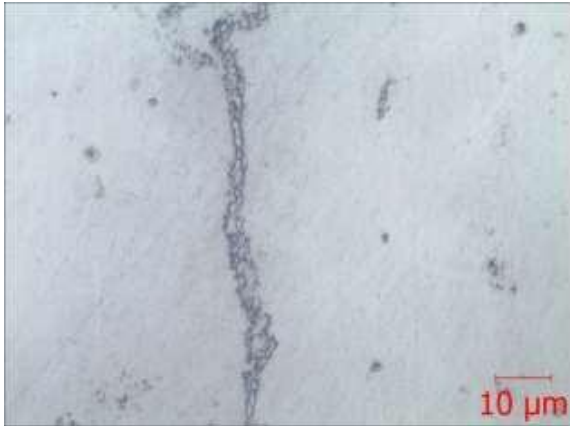


г – Поздовжній, зб. X500

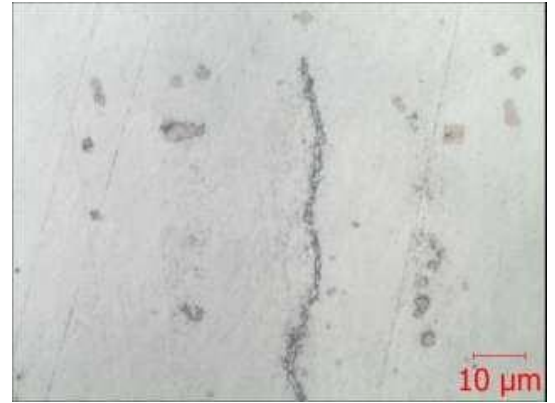
Рисунок 4.6 – Структура зразків після термообробки. (Зроблені під мікроскопом)

Так само, як і до термообробки на зразках присутні скупчення карбідів за межами зерен (рисунок 4.7), що характерно для нікелевих сплавів.

Згідно з авторами роботи [33] в нікелевих сплавах карбіди  $Me_{23}C_6$  виділяються переважно за межами зерен. Таке їх розташування значно впливає на збільшення межі тривалої міцності, мабуть, внаслідок утруднення прослизання по межах зерен.



а – Поперечний, зб. x1000



б – повздовжний, зб. x1000

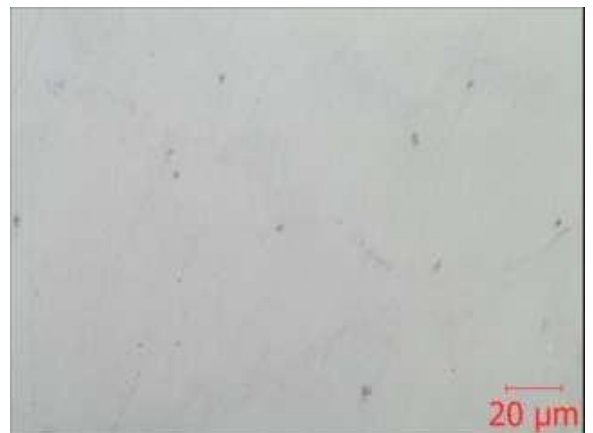
Рисунок 4.7 – Скупчення карбідів по межах зерен. (Зроблені під мікроскопом)

Порівняльним аналізом мікроструктури вирощених зразків до та після термообробки, суттєвих відмінностей у структурі матеріалу не виявлено. Це з тим, що сплав ЭИ868 (ВЖ98ВИ) є гомогенним і за термічної обробці у ньому виділяються зміцнюючі фази.

При порівняльному аналізі мікроструктури вирощених зразків з мікроструктурою литого матеріалу встановлено, що структура вирощених зразків, отриманих методом ПНП, відрізняється від литої, збільшеною кількістю нітридів і карбонітридів (рисунку 4.8), а також більшими скупченнями карбідів по межах зерен (рисунку 4.7), та (рисунку 4.9).



а – лиття, зб. x200



б – лиття, зб. x500



в – вирощений зразок, зб. x200



г – вирощений зразок, зб. x500

Рисунок 4.8 – Нітриди та карбонітриди, шліфи не травлені. (Зроблені під мікроскопом)



а – зб. x500

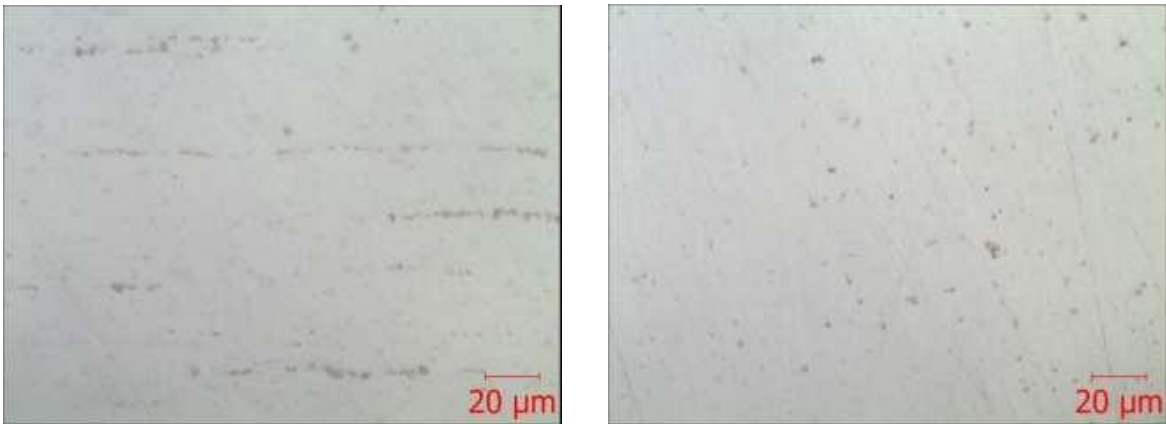


б – зб. x1000

Рисунок 4.9 – Скупчення карбідів в зернах у литій структурі. (Зроблені під мікроскопом)

Для встановлення причини утворення великої кількості нітридів і карбонітридів у зразках, вирощених методом ПНП, були зроблені мікрошліфи зварювального дроту в поздовжньому і поперечному напрямку. Мікроструктура зварювального дроту являє собою  $\gamma$ -твердий розчин з наявністю великої кількості нітридів та карбонітридів, витягнутих у напрямку протяжки (рисунок 4.10). Отже, збільшена кількість нітридів та

карбонітридів у вирощених зразках пояснюється їх переходом із зварювального дроту у процесі вирощування [34].



а – Поздовжній

б – Поперечний

Рисунок 4.10 – Структура зварювального дроту, шліфи нетравлені, зб. х500

#### 4.5 Перевірка механічних властивостей

Механічні властивості сплаву EI868 (XH60VT) отриманого методом адитивного вирощування плазмовим наплавленням дротом визначали на стандартних циліндричних зразках за ГОСТ 1497-84 Метали. Методи випробувань на розтяг», «ГОСТ 9651-84 Метали. Методи випробувань на розтяг при підвищених температурах», «ГОСТ 10145-81 Метали. Методи випробування тривалу міцність». Зразки вирізали в поздовжньому та поперечному напрямку щодо шарів вирощування рисунок 5.2, після термічної обробки за вказаним вище режимом [21].

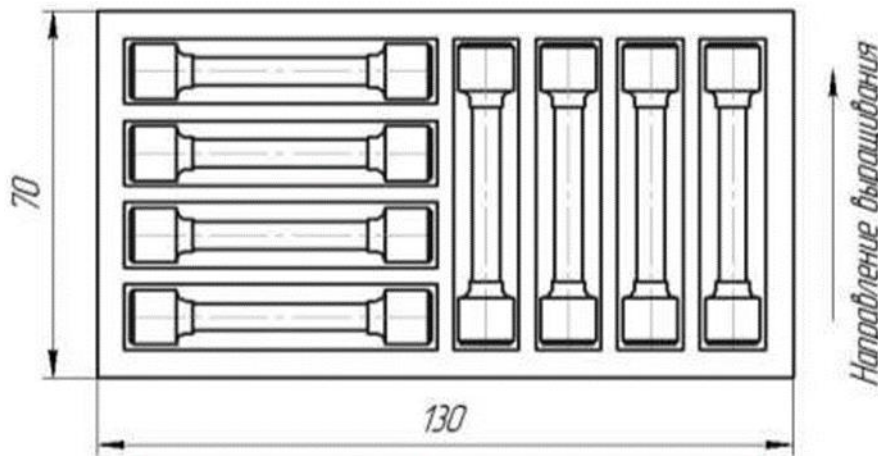


Рисунок 4.11 – Схема вирізки зразків для механічних випробувань (зроблені під мікроскопом)

На виготовлених зразках визначалися механічні властивості ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_0$ ,  $2$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) при кімнатній температурі, механічні властивості ( $\sigma_b$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) при температурі  $900^{\circ}\text{C}$  тривала міцність.

Результати механічних випробувань при кімнатній температурі (Протокол лаб. хутро. випробувань №74 від 26.05.20 р.) опрацьовано та подано в (таблиці 4.2).

Для порівняння в таблиці 4.2 наведено норми ТУ та режими термообробки серійного напівфабрикату, що виготовляється у вигляді листів, та лиття зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ).

Примітка: Жирний шрифт таблиці містить середні значення.

З даних, поданих у таблиці 2 видно, що:

Механічні властивості зразків за кімнатної температури відповідають вимогам ТУ 14-1-1747-76 (Лист холоднокатаний), ТУ 1-809-45-2011 (Лиття), ТУ 14-1-4296-87 (Аркуш гарячекатаний);

Міцнісні властивості ( $\sigma_b$ ,  $\sigma_0$ ,  $2$ ) зразків у поздовжньому та поперечному напрямку знаходяться приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність ( $\sim 5\text{...}7\%$ ). При цьому спостерігається більша ( $\sim 8\text{...}28\%$ ) відмінність пластичних властивостей ( $\delta$ ,  $\psi$ ) у поздовжньому і поперечному напрямку.

Таблиця 4.2 – Механічні властивості вирощених зразків при 20°C

ТУ (Вигляд напівфабрикату)	Режими ТО	$\sigma_B$ , кгс/мм <sup>2</sup>	$\sigma_{0,2k}$ гс/мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Вирощений зразок плазмовим наплавленням дротом (ПНП)	Загартування з T=1200°C, охолодження на повітрі	Поздовжній напрямок			
		65,2	31,5	53,2	56,4
		55,1	28,8	40,0	41,7
		57,6	30,3	45,6	50,9
		<b>59,3</b>	<b>30,2</b>	<b>46,3</b>	<b>49,7</b>
		Поперечний напрямок			
		53,6	26,7	62,4	47,9
		58,4	28,9	57,2	50,7
		58,3	28,3	74,0	56,6
		55,4	27,6	64,0	58,9
		<b>56,4</b>	<b>27,9</b>	<b>64,4</b>	<b>53,8</b>
Норми ТУ 14-1-1747-76 (аркуш холоднокатаний)	Загартування з T = 1150 ... 1200 ° С, охолодження у воді або на повітря.	≤105	-	≥40	-
Норми ТУ 1-809-45-2011 (Лиття)	Загартування з T=1190±10°C, охолодження в повітрі.	≥50	-	≥35	-
Норми ТУ 14-1-4296-87 (аркуш гарячекатаний)	Загартування з T = 1150 ... 1200 ° С, охолодження у воді чи повітрі.	≤100	-	≥40	-
Норми ОСТ 1 90396-91 (Кільце цільнокатане)	Загартування з T=1140±20°C охолодження повітря.	≥71	-	≥30	-

Міцнісні властивості ( $\sigma_B$ ) вирощених зразків нижче (~12...15%) вимог ОСТ 1 90396-91 (Кільце цельнокатане), при цьому пластичні властивості відповідають.

Занижені властивості міцності ( $\sigma_B$ ) вирощених зразків щодо вимог ОСТ 1 90396-91 (Кільце цельнокатане), ймовірно пов'язано зі збільшеною кількістю нітридів і карбонітридів у вирощених зразках, які згідно даних автора роботи [31] знижує міцнісні властивості сплаву ЕІ6 температури, але підвищують їх за високих температур [11].

Результати механічних випробувань при температурі 900°C (Протокол жаромічної лабораторії №739 від 07.07.20 р.) оброблені та представлені в (таблиці 4.3).

Для порівняння в таблиці 3 наведено норми ТУ та режими термообробки серійного напівфабрикату, що виготовляється у вигляді листів та поковок зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ).

Таблиця 4.3 – Механічні властивості вирощених зразків при  $T$  900 °C

ТУ (Вигляд напівфабрикату)	Режими ТО	$\sigma_B$ , кгс/ мм <sup>2</sup>	$\delta$ , %	$\psi$ , %
Вирощений зразок плазмовим наплавленням дротом (ПНП)	Загартування з $T=1200^\circ\text{C}$ , охолодження на повітрі	Поздовжній напрямок		
		34,9	47,1	48,1
		34,1	48,2	59,0
		<b>34,5</b>	<b>47,7</b>	<b>53,6</b>
		Поперечний напрямок		
		32,6	43,2	64,0
		30,6	52,6	66,3
		<b>31,6</b>	<b>47,9</b>	<b>65,2</b>
Норми ТУ 14-1-1747-76 (аркуш холоднокатаний)	Загартування з $T = 1150 \dots 1200^\circ\text{C}$ , охолодження у воді чи повітрі.	$\geq 18$	$\geq 30$	-
Норми ТУ 14-1-4296-87 (аркуш гарячекатаний)	Загартування з $T = 1150 \dots 1200^\circ\text{C}$ , охолодження у воді або на повітрі.	$\geq 20$	$\geq 40$	-
Норми ТУ 27.1-00190414-038:2007 (Поковка)	Загартування з $T = 1150 \dots 1200^\circ\text{C}$ , охолодження у воді чи повітрі.	$\geq 22$	$\geq 45$	$\geq 50$

Примітка: Жирний шрифт таблиці містить середні значення.

З даних, поданих у таблиці 3 видно, що:

Механічні властивості зразків за температури 900°C відповідають вимогам ТУ 14-1-1747-76 (Лист холоднокатаний), ТУ 14-1-4296-87 (Аркуш гарячекатаний), ТУ 27.1-00190414-038:2007 (Поковка);

Міцності ( $\sigma_b$ ) зразків у поздовжньому і поперечному напрямку знаходяться приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність (~8%). При цьому спостерігається більша (~10...18%) відмінність пластичних властивостей ( $\delta$ ,  $\psi$ ) у поздовжньому та поперечному напрямку [32].

За рекомендацією ДП «Івченко-Прогрес» було проведено випробування на тривалу міцність за температури 800°C. Навантаження та тривалість випробувань бралися з довідника ВІАМ [1]. Результати випробувань на тривалу міцність (Протокол жароміцної лабораторії №761 від 16.06.20 р.) опрацьовано та подано в (таблиці 4.4)

Таблиця 4.4 – Результати випробувань на тривалу міцність вирощених зразків.

Зразок	Температура випробувань, °C	Навантаження кгс/мм <sup>2</sup>	Витримав годинника	Примітка
Поздовжній	800	11	18430	Зруйнувався
Поздовжній	800	11	12700	Зруйнувався
Поперечний	800	11	12530	Зруйнувався
Поперечний	800	11	11730	Зруйнувався
<b>Згідно з даними ВІАМ</b>	<b>800</b>	<b>11</b>	<b>100</b>	-

Тривала міцність вирощених зразків у поздовжньому та поперечному напрямку відповідає вимогам довідника ВІАМ [2].



Візуальний огляд зразків після випробування за кімнатної температури показав, що поверхня всіх зразків у процесі пластичної деформації змінилася, стала хвилястою з різним ступенем поконання. Зразки зруйновані з утворенням шийки, що свідчить про пластичну руйнацію. Зовнішній вигляд зразків після механічних випробувань представлений (рисунок 4.12).



Рисунок 4.12 – Зовнішній вигляд зразків після випробувань за кімнатної температури

Під час огляду зламів розривних зразків за допомогою бінокулярного мікроскопа дефектів металургійного характеру не виявлено (рисунок 4.13), злами мають ямковий характер.



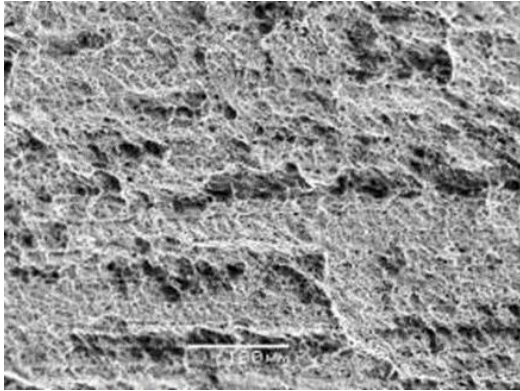
а – зб. х8



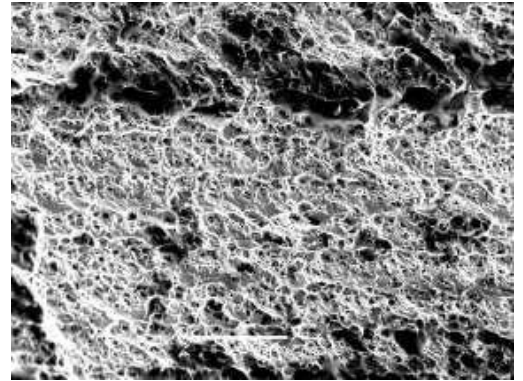
б – зб. х8

Рисунок 4.13 – Зовнішній вигляд зламів розривних зразків

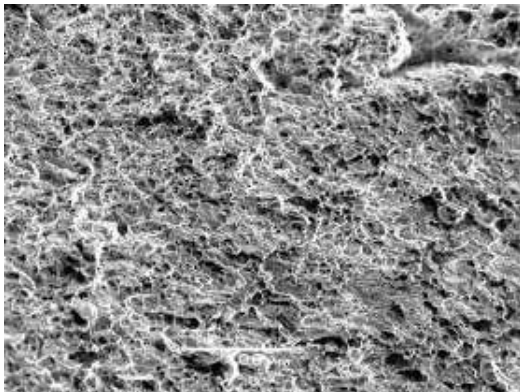
На фрактограмах зламів розривних зразків, отриманих на електронному мікроскопі видно, пориста структура поверхні зламів (рисунок 4.14), характерна для пластичних матеріалів.



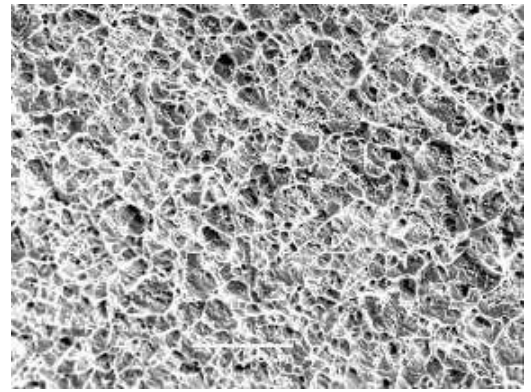
а – зб. х250



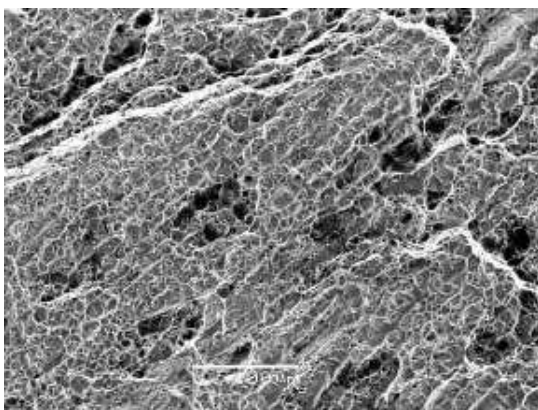
б – зб. х500



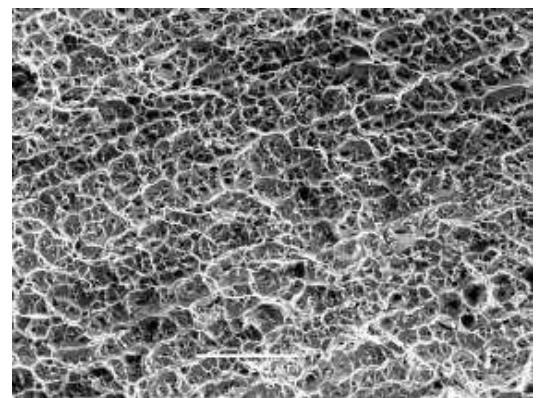
в – зб. х250



г – зб. х500



д – зб. х250



е – зб. х500

Рисунок 4.14 – Фрактограми зламів розривних поперечний (а, б, в, г) та поздовжніх (д, е) зразків.



#### 4.6 Перевірка якості матеріалу заготовки

Рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) показав рівномірний розподіл хімічних елементів та міцніючої фази нітрид титану (TiN) та карбідів у матеріалі термооброблених зразків (рисунок 4.15).

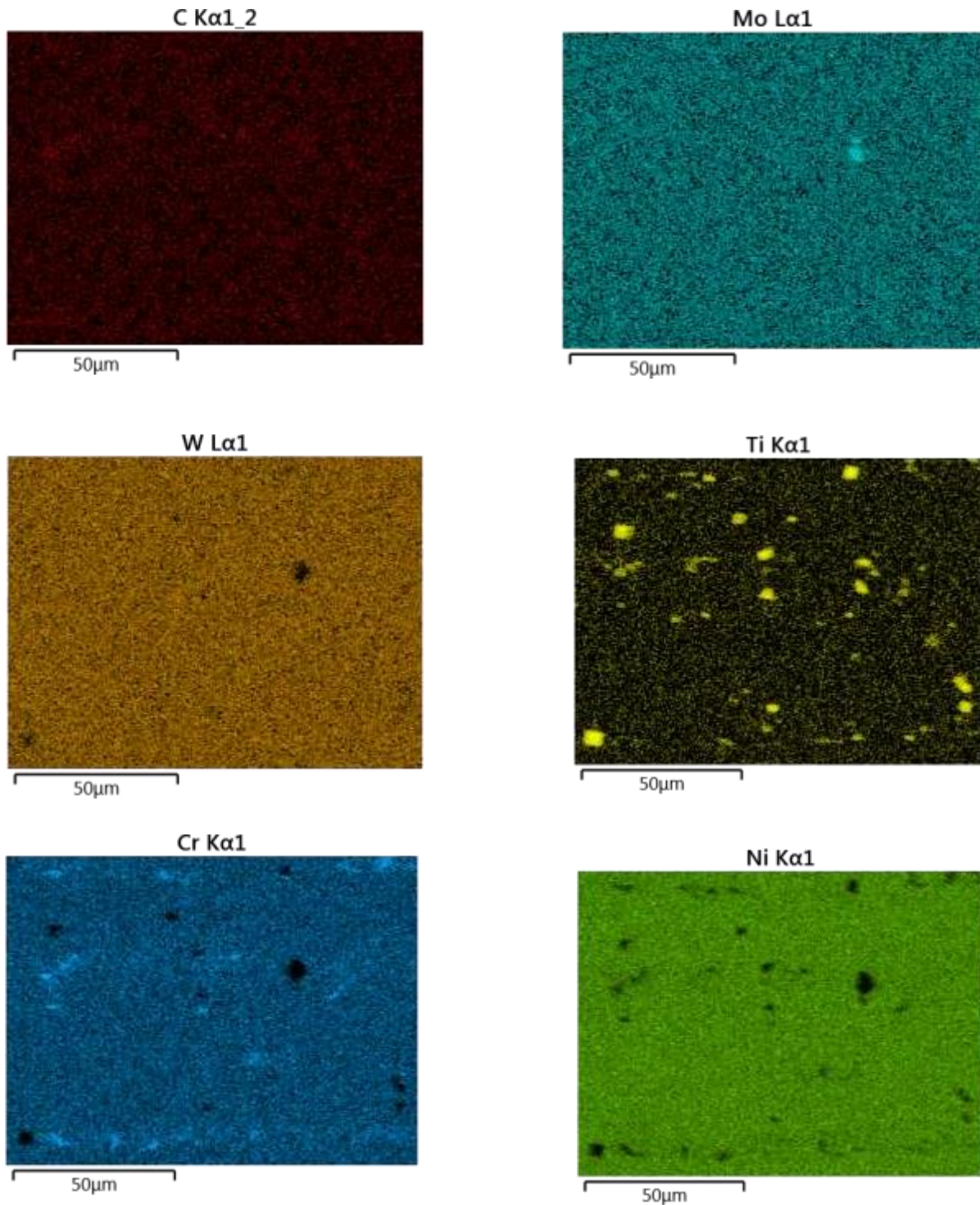


Рисунок 4.15 – Результати рентгеноспектрального мікроаналізу в режимі карти розподілу елементів за площею, зб. x1000

Результати РСМА представлені як картування. Більшій інтенсивності фарбування відповідає більша концентрація елемента [12].

Згідно з даними кількісного спектрального аналізу матеріал зразків вирощених методом ПНП відповідає сплаву EI868 (ВЖ98ВИ) результати перевірки представлені в (таблиці 4.5).

Таблиця 4.5 – Вміст елементів в матеріалу заготовки

Вид напівфабрикату	Вміст елементів, %			
	Ni	Cr	W	Ti
Вирощений зразок (ПНП)	основ.	25,92	14,97	0,47
Норми ТУ 1-809-45-2011	основ.	23,5 – 26,5	13,0 – 16,0	0,30 – 0,70

**Висновки.** Цей розділ відповідає на всі питання що до якості вирощуваної заготовки на основі її зразків виданих до лабораторії.

Матеріал зразків, вирощених плазмовим наплавленням дротом, відповідає сплаву EI868 (ВЖ98ВИ). Рентгеноспектральний мікроаналіз показав рівномірний розподіл хімічних елементів та міцніючої фази нітрид титану (TiN) та карбідів у матеріалі термооброблених зразків.

Макроструктура зразків шарувата, з зонами сплавлення, що рівномірно чергуються, що характерно для металу, отриманого методом багат шарового наплавлення. У матеріалі вирощених зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ) присутні одиничні мікропори і раковини розміром до 29 мкм.

Мікроструктура матеріал зразків, отриманих методом вирощування плазмовим наплавленням дротом із сплаву EI868 (ВЖ98ВИ) після термообробки, являє собою  $\gamma$ -твердий розчин з наявністю нітридів, карбонітридів і карбідів, розташованих упорядковано в напрямку відведення

тепла в процесі вирощування поперек . У мікроструктурі матеріалу присутня полос частість у напрямку відведення тепла (поперек шарів), пов'язана з невеликою (до 2%) ліквациєю по хрому та вольфраму. Мікроструктура відповідає нормально термообробленому стану сплаву EI868 (ВЖ98ВИ). Мікроструктура вирощених зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ) відрізняється від мікроструктури литого матеріалу, збільшеною кількістю нітридів і карбонітридів, які переходять із зварювального дроту в процесі вирощування, а також більшими скупченнями карбідів по межах зерен.

Механічні властивості при кімнатній температурі зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ), отриманих методом вирощування дротом плазмовим наплавленням, відповідають вимогам ТУ 14-1-1747-76 (Лист холоднокатаний), ТУ 1-809-45-2011 (Лиття), ТУ 14-1-4296-87 (Лист гарячекатаний). Міцні властивості ( $\sigma$ ) вирощених зразків нижче (~12...15%) вимог ОСТ 1 90396-91 (Кільце цельнокатане), при цьому пластичні властивості відповідають вимогам.

Механічні властивості ( $\sigma$ ,  $\delta$ ,  $\psi$ ) при температурі 900°C зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ), отриманого методом вирощування дротом плазмовим наплавленням відповідають вимогам ТУ 14-1-1747-76 (Лист холоднокатаний), ТУ 14-1-4296-87 (Аркуш гарячекатаний), ТУ 27.1-00190414-038:2007 (Поковка).

Міцні властивості ( $\sigma$ ,  $\sigma_{0,2}$ ) зразків у поздовжньому та поперечному напрямку знаходяться приблизно на одному рівні, присутня невелика відмінність яка становить при кімнатній температурі ~5...7%, при температурі 900°C ~8%. При цьому спостерігається більша відмінність пластичних властивостей ( $\delta$ ,  $\psi$ ) в поздовжньому і поперечному напрямку, що становить при кімнатній температурі ~8...28%, при температурі 900°C ~10...18%.

Тривала міцність при температурі 800°C зразків зі сплаву EI868 (ВЖ98ВИ), отриманого методом вирощування дротом плазмовим наплавленням відповідає вимогам довідника ВІАМ.

## ВИСНОВКИ

У даній магістерській роботі методом експериментального дослідження, був проаналізований адитивний метод 3D друку на адаптивному роботизованому комплексі "Fanuc", а саме його технічна, технологічна, економічна та найголовніша алгоритм математична частина в розробці та написанні програмного коду для автоматизації даного комплексу. В ході дослідження було виявлено значну економічну ефективність при виготовленні заготовки авіаційної деталі адитивним методом в порівнянні з ливарним методом поковки майже в чотири рази дешевше при виготовленні дротом та два рази дешевше при виготовленні порошком, однієї і тієї самої деталі з матеріалу ВЖ98ВІ.

Використання адитивних технологій у авіабудування, машинобудуванні та в цілому як у світі так і в Україні набувають все більшого поширення. Дослідження в вивченні покращення структури деталей 3D друку є особливо значущим, для виготовлення заготовок з самих різноманітних сплавів будь якої хімічно та технічної складності. Розвиток адаптивних робізованих комплексів "Fanuc" вже набуває дійного стану, все більше та більше на виробництвах України з'являються данні комплекси для вирішування різних задач з автоматизації технічного процесу ті економії витрат.

Розробка алгоритмів і написання програм значно покращує виробництво за рахунок автоматизації при виготовлені заготовки, та зменшує кількість похибок від людських факторів. Роботизований комплекс "Fanuc" має неймовірно роботизовану точність в чотирьох системах координат, зміло користаючись шістьма осями роботизованої руки, та двома осями позиційного столу, а також універсального маніпулятора на якому легко можна писати як найпростіші та і складні структурні програми. Дані характеристики дозволяють в повній мирі реалізувати три типи алгоритмів

які вказані в першому розділі даної роботи, це лінійні алгоритми, алгоритми з повторенням, та алгоритми із розгалуженням які по своїй структурі справляються з технологічним завданням до виготовлення потрібної заготовки. Написання програмних алгоритмів дає можливість досягнути потрібної точності, корегувати процесом під час наплавлення за рахунок математичних значень в реєстрах, так і виконувати зміщення полюбій координаті XYZ, у зв'язку с сигналами зварювального апарату які виставляються в програмному кодї роблять процес автоматизації універсальним засобом для налагодження серійного виробництва як авіаційної продукції так і будь-якої іншої.

Лабораторні дослідження показали повну хімічну та технічну будову вирощеного зразка матеріалу ВЖ98ВІ з якого була зроблена наша заготовка, та яка описана в другому, третьому та четвертому розділи. Отриманні лабораторні дані свідчать про властивості які ні в чому не уступають старим ливарним методам, ні в міцності ні пластичності ні твердості а також не порушують вимоги до хімічних характеристик. А якщо проаналізувати другий розділ, то дві такі області як адаптивний автоматизований комплекс та адитивні технології зварювального наплавлення не мають рівних в економічній ефективності при розумному користуванні та вистроєної стратегії.

## ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Авиационные материалы : справочник в 9 т. Москва : ОНТИ, 1989. Т. 3 : Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов / под ред. Р.Е. Шалина. 565 с.
2. Авиационные материалы : справочник в 9 т. Москва : ОНТИ, 1989. Т. 3 : Жаропрочные стали и сплавы. Сплавы на основе тугоплавких металлов / под ред. Р.Е. Шалина. 580 с.
3. Андрощук Г. О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. № 1 (1). С. 68-77.
4. Выжигин А. Ю. Гибкие производственные системы. Москва : Машиностроение, 2009. 288 с.
5. Выжигин А. Ю. Гибкие производственные системы. Москва : Машиностроение, 2009. 300 с.
6. Валетов В. А. Аддитивные технологии (состояние и перспективы) учеб. пособ. Санкт-Петербург : Университет ИТМО, 2015. 63 с.
7. Гречко О. М. Сучасні адитивні технології та 3D-друк. Огляд останніх досягнень в різних сферах людського життя. *Вісник НТУ «ХПІ»*. Серія: Проблеми удосконалювання електричних машин і апаратів. Теорія і практика. Харьков, 2019. №1. С. 63-75
8. Гибсон Я. Розен Д. Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2016. 656 с.
9. Гибсон Я. Розен Д. Стакер Б. Технологии аддитивного производства. Трехмерная печать, быстрое прототипирование и прямое цифровое производство. Москва : ТЕХНОСФЕРА, 2016. С. 15-20.
10. ГОСТ 25686-85. Манипуляторы, автооператоры и промышленные роботы. Термины и определения. Москва : Изд-во стандартов, 1988. 8 с.



11. ГОСТ 4784–74. Алюминий и сплавы алюминиевые деформируемые марки. [Действующий от 1976-01-01]. Изд. офиц. Москва: Издательство стандартов, 1974. 9 с
12. ГОСТ 7727–81. Сплавы алюминиевые. Методы спектрального анализа. [Действующий от 1982-07-01]. Изд. офиц. Москва: ИПК Издательство стандартов, 2002. 13 с
13. Гринюк А. А. Коржик В. Н., Бабич А. А. и др. Унифицированный плазмотрон для сварки сжатой дугой неплавящимся электродом. *Інноваційні технології та інжиніринг у зварюванні – PoliWeld-2016* : зб. доп. міжнар. конф. (Київ, 26-27 травня 2016 р.). Київ : НТУУ «КПІ», 2016. С. 43–49.
14. Жнякін Б. О., Краснова В. В. Економіка підприємства : навч. посіб. для вузів. Донецьк : Альфа-прес, 2005. 160с.
15. Зенкевич С. Л., Ющенко А. С. Основы управления манипуляционными роботами. 2-е изд. Москва : Изд-во МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2004. 480 с.
16. Иванов А. А. Основы робототехники. 2-е изд. Москва : ИНФРА-М, 2017. 223 с.
17. Климов А. С., Машнин Н. Е. Роботизированные технологические комплексы и автоматические линии в сварке. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2011. 210 с.
18. Климов А. С., Машнин Н. Е. Роботизированные технологические комплексы и автоматические линии в сварке. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2011. 214 с.
19. Климов А. С., Машнин Н. Е. Роботизированные технологические комплексы и автоматические линии в сварке. Санкт-Петербург; Москва; Краснодар : Лань, 2011. 220 с.
20. Медведев В. С., Лесков А. Г., Ющенко А. С. Системы управления манипуляционных роботов. Москва : Наука, 1978. 416 с.

21. Маранц А.В. Сравнение свойств материалов сталь–TiC, полученных методами лазерных технологий и порошковой металлургии. *ПМиФП Известия вузов*. 2013 . №1. С. 22-26.

22. Мельник Л. Г., Корінцева О. Л. Економіка підприємства : навч. посіб. для вузів. Суми : Університетська книга, 2004. 416с

23. Основные элементы SolidWorks (SolidWorks 2010). Dassault Systems SolidWorks Corporation : учеб. пособ. США штат Массачусетс, Dassault Systemes SolidWorks Corporation, 2009. 550 с.

24. Погорелов А. Д. Обзор алгоритмов планирования траектории движения манипуляторов. *Молодежный научно-технический вестник*. 2016. №8. С. 2-5.

25. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. Москва : Наука, 1978. 400 с.

26. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. Москва : Наука, 1978. 408 с.

27. Попов Е. П., Верещагин А. Ф., Зенкевич С. Л. Манипуляционные роботы: динамика и алгоритмы. Москва : Наука, 1978. 418 с.

28. Предко М. Устройства управления роботами / М. Предко. – Москва : ДМК Пресс, 2010. 390 с.

29. Предко М. Устройства управления роботами / М. Предко. – Москва : ДМК Пресс, 2010. 404 с.

30. Предко М. Устройства управления роботами / М. Предко. – Москва : ДМК Пресс, 2010. 408 с.

31. Ромашов А. С. Влияние структурных изменений на свойства жаропрочных никелевых сплавов при дисперсном упрочнении нитридами легирующих элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. Москва, 2015. 137 с.

32. Ромашов А. С. Влияние структурных изменений на свойства жаропрочных никелевых сплавов при дисперсном упрочнении нитридами

легирующих элементов : дис. ... канд. техн. наук : 05.16.01. Москва, 2015. 150 с.

33. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы / пер. с англ. Москва : Металлургия, 1976. 567 с.

34. Симс Ч., Хагель В. Жаропрочные сплавы / пер. с англ. Москва : Металлургия, 1976. 575 с.

35. Слюсар В. И. Фаббер-технологии. новое средство трехмерного моделирования. *Электроника: наука, технология, бизнес*. 2003. № 5. С. 54–60.

36. Справочник по авиационным материалам: в 4 т. / под ред. Т. М. Кунявской, М. С. Лаговской. Москва : Машиностроение, 1965. Т. II: Цветные сплавы. Ч. I: Алюминиевые сплавы. 440 с.

37. Справочник по авиационным материалам: в 4 т. / под ред. Т. М. Кунявской, М. С. Лаговской. Москва : Машиностроение, 1965. Т. II: Цветные сплавы. Ч. I: Алюминиевые сплавы. 455 с.

38. Спыну Г. А. Промышленные роботы: конструирование и применение. Киев : Вища школа, 1985. 176 с.

39. Спыну Г. А. Промышленные роботы: конструирование и применение / 2-е издание. Киев : Вища школа, 1991. 307 с.

40. Alhuzaim A. F. Investigation in the use of plasma arc welding and alternative feedstock delivery method in additive manufacture. A thesis submitted in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science General Engineering, Montana Tech of the University of Montana. 2014. 228 p.

41. Bruce M. R., Riley S. F., Cola M. J. et al. (2012) Measurement And Simulation Of Titanium Alloy Deposit Temperature In Electron Beam Additive Manufacturing. Trends in Welding Research 2012: Proceedings of the 9th International

42. Baufeld B., Van der Biest O., Gault R. S. Additive Manufacturing of Ti–6Al–4V Components by Shaped Metal Deposition: Microstructure and Mechanical Properties. *Materials & Design*. 2011. № 31. P. 106–111.

43. Baldinger M., Levy G., Schönsleben P., Wandfluh V. Additive Manufacturing Cost Estimation for Buy Scenarios. *Rapid Prototyping Journal*. 2016. Vol. 22. № 6. P. 871–877.
44. Benedyk J. Additive Manufacturing of Aluminum Alloys: Augmenting or Competing with Traditional Manufacturing? *Light Metal Age*. 2018. Vol. 76. No. 1. P. 54.
45. Comparison of Energy Consumption in Bulk Forming, Subtractive, and Additive Processes: Review and Case Study / Yoon,H.–S., et al. *Precision Engineering and Manufacturing–Green Technology*. 2014. Vol. 1, No. 3. P. 261–279.
46. Caffrey T., Wohlers T., Campbell R. I. Executive Summary of the Wohlers Report 2016. *Wohlers Report 2016. Fort Collins*. 2016.
47. Goehrke Sarah Anderson. Wohlers Report 2017: The Real Authority on 3D Printing. April 5, 2017. URL: <https://3dprint.com/170193/wohlers-report-2017-expert>.
48. Clark D., Bache M. R., Whittaker M. T. Shaped Metal Deposition of a Nickel Alloy for Aero Engine. *Journal of Materials Processing Technology*. 2008. 203, 439–448.
49. Hurn J., Li T. SLM Solutions Group AG (AM3D.DE). *Credit Suisse Small and Mid–cap Research Report*. 2014. 86 p.
50. Kruth J. P., Leu M. C., Nakagawa T. Progress In Additive Manufacturing And Rapid Prototyping. *CIRP Annals-Manufacturing Technology*. 1998. № 47(2). P. 525–540.
51. Korzhyk V. N., Khaskin V. Yu., Grinyuk A. A. et al. 3D-printing of metallic volumetric parts of complex shape based on welding plasma-arc technologies (Review). *The Paton Welding Journal*. 2016. №5-6. P. 117–123.
52. Kruth J. P. Selective laser melting of iron-based powder. *J. Mater. Process. Technol.* 2004. № 149. P. 616–622.

53. Klocke, F., Arntz K., Teli M. Winands K., Wegener M., Oiliarib S. State-of-the-art Laser Additive Manufacturing for Hot Work Tool Steels. *Procedia CIRP*. 2017. Vol. 63. P. 58–63.

54. Kottman M., Zhanget S., Cawley J., Denney P. Laser Hot Wire Process: A Novel Process for Near-net Shape Fabrication for High Throughput Applications. *Metals*. 2015. Vol. 67. No. 3. P. 622–628.

55. Thomas D. Costs, Benefits, and Adoption of Additive Manufacturing: A Supply Chain Perspective. *Advanced Manufacturing Technologies*. 2016. Vol. 85. P. 1857–1876.

56. Thomas D., Gilbert S.W. Cost and Cost Effectiveness of Additive Manufacturing. A Literature Review and Discussion. *NIST Special Publication* 1176.

57. Wile R. CREDIT SUISSE: 3D Printing Is Going To Be Way Bigger Than What The 3D Printing Companies Are Saying. Business Insider, September 17, 2013. URL: <https://www.businessinsider.com/the-3-d-printing-market-will-be-huge-2013-9>

58. Wolcott P. J., Hehr A., Dapino M. J. Optimized Welding Parameters for Al 6061 Ultrasonic Additive Manufactured Structures. *Journal of Materials Research*. 2014. Vol. 29. No. 17. P. 2055–2065.

59. Wohlers Associates Industry Briefing, February 2013; Additive Manufacturing Process Categories. URL: <https://wohlersassociates.com/brief02-13.html>

60. Xue L., Chen J., Wang S.–H. Freeform Laser Consolidated H13 and CPM 9V Tool Steels. *Metallography, Microstructure, and Analysis*. 2013. Vol. 2. P. 67–78.