

Міністерство освіти і науки України
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Завгородній Олександр Васильович

УДК 669.295:621.762

ДИСЕРТАЦІЯ

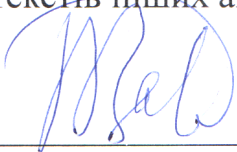
**ВДОСКОНАЛЕННЯ ОБЛАДНАННЯ ТА ТЕХНОЛОГІЇ ПЛАЗМОВОГО
РОТАЦІЙНОГО РОЗПИЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ МЕТАЛЕВИХ
ПОРОШКІВ АДИТИВНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ**

Спеціальність 131 – Прикладна механіка

Галузь знань 13 – Механічна інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD)

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів та текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



О.В. Завгородній

Науковий керівник

О.Є. Капустян

кандидат технічних наук

Запоріжжя, 2025

АНОТАЦІЯ

Завгородній О.В. Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії (PhD) за спеціальністю 131 – Прикладна механіка. – Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, 2025.

Для підвищення обороноздатності країни важливим напрямком промислового розвитку є авіадвигунобудування. З метою збільшення експлуатаційних показників авіадвигунів конструктори пропонують змінювати конфігурацію окремих деталей. Вузли із декількох складальних одиниць замінювати на монолітну деталь. Технологія 3D-друку деталей надскладної форми згідно побудованої тривимірної моделі можуть забезпечити мінімізацію витрат часу на впровадження в серійне виробництво. Період від стадії проектування до постановки деталі на літальний апарат може тривати декілька тижнів замість відліку в місяцях та навіть роках, як це відбувалось при класичних технологіях виробництва. Зменшення витрат відбувається в даному випадку за рахунок суттєвого збільшення коефіцієнту використання матеріалу, виключення стадій виготовлення оснасток, прес-форм, скорочення чисельності персоналу та мінімальної механічної обробки. При цьому, оскільки резерв механічних властивостей авіаційних матеріалів та сплавів часто є майже вичерпаним, ведеться пошук нових сплавів або шляхи кардинального підвищення властивостей вже існуючих матеріалів. Рішенням, що поєднує зазначені напрямки, є впровадження інноваційних технологій виготовлення деталей шляхом адитивного вирощування із застосуванням металевих порошків. Адитивні технології упродовж десятиліть широко застосовують в провідних країнах світу, в тому числі, і в авіаційному двигунобудуванні. При цьому закордонні підприємства є розробниками обладнання та технології виготовлення металевих порошків певних сплавів, що мають надвисоку вартість і не завжди відповідають вимогам

вітчизняного виробництва, де застосовуються інші марки матеріалів. Технологічні режими виготовлення порошків та виробів з них, зазвичай, є закритою інформацією і не розголошуються виробником. Тому для налагодження адитивного виробництва в Україні необхідні власні розробки обладнання з виготовлення металевих порошків, визначення технологічних режимів для тих сплавів, що використовуються у вітчизняній техніці, потрібна їх апробація з використанням різних технологій адитивного вирощування, доступних в нашій країні (лазерний 3D-друк, електронно-променеве та плазмове вирощування). Зазначені методи вже застосовуються в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, на АТ «Мотор Січ», ГП «Івченко-Прогрес», ТОВ «Адитивні лазерні технології». Ці підприємства потребують дисперсних порошків із жароміцних нікелевих і титанових сплавів. Головними вимогами до порошків адитивного призначення є сферична їх форма та розмір частинок, що не повинен перевищувати 100 мкм. Вирішенню цих науково-практичних задач присвячена дана дисертаційна робота.

Мета роботи полягає в розробці технології отримання сферичних порошків з нікелевих та титанових сплавів, які застосовуються для адитивного вирощування деталей відповідального призначення, для підвищення їх якості та забезпечення необхідного рівня механічних властивостей.

Об'єктом досліджень є процес плазмового ротаційного розпилення для виробництва сферичних порошків із титанових та нікелевих сплавів, процеси консолідації порошків із застосуванням адитивних технологій.

Предметом дослідження є обладнання та технологічні режими плазмового ротаційного розпилення для виробництва сферичних порошків з титанових та нікелевих сплавів та параметри адитивних технологій виготовлення різних деталей з них.

В якості базового обладнання для виготовлення сферичних металевих порошків використане обладнання підприємства ТОВ «Мультифлекс» – устаткування типу «УЦР» для ротаційного плазмового розпилення. Однак максимальна швидкість обертання витратного електроду у стані до модернізації не перевищувала $15\,000\text{ хв}^{-1}$, що дозволяло отримати порошки із розмірами гранул близько 200 мкм та крупніше –

що не відповідало вимогам адитивних технологій. У роботі виконано комплексний підхід, що поєднує модернізацію обладнання та вдосконалення технології для підвищення якості вихідних порошків та кінцевого продукту – деталей, виготовлених із цих порошків. Модернізація відцентрового плазмового розпилення для виготовлення металевих порошків, що відповідають адитивним вимогам, потребує додаткового вирішення ряду питань. У роботі для вдосконалення виробництва сферичних порошків поставлені такі завдання:

1. Запропонувати зміни вузла підведення заготовки, що розпилюється, та її фіксації з метою збільшення швидкості обертання витратного електроду.

2. Відпрацювати оптимальні склади газового середовища при ротаційному розпиленні заготовок із титанових та нікелевих сплавів.

3. Визначити вплив технологічних параметрів розпилення (швидкості обертання заготовки та складу плазмоутворюючої газової суміші) на фракційний склад і якість порошків з жароміцних нікелевих і титанових сплавів.

4. Отримати сферичні порошки заданого фракційного складу для певних технологій консолідації порошків (для електронно-променевого та мікроплазмового наплавлення, лазерний 3D-друк).

Конструктивні зміни обладнання для виготовлення порошків (зміна шпіндельного механізму притиску заготовки, яка розпилюється, встановлення підшипників, що мають примусове змащення) дозволили збільшити швидкість обертання до $30\ 000\ \text{хв}^{-1}$, зменшити рівень вібрацій і скоротити залишок нерозпиленого витратного електроду. Здійснена модернізація обладнання дозволила провести оптимізацію технологічних параметрів розпилення для створення стабільної промислової технології. Для підвищення об'ємної долі сферичного порошку необхідної дисперсності досліджено вплив швидкості обертання витратного електроду і підвищення потужності плазми за рахунок відпрацювання складу плазмоутворюючої газової суміші. До аргону запропоновано додавати інертний газ – гелій. Отримано регресійні рівняння залежності розміру частинок розпиленого порошку та об'ємної долі порошку необхідного розміру від швидкості обертання та складу плазмоутворюючої газової суміші. Методом математичного

планування експерименту встановлені оптимальні параметри процесу для нікелевих жароміцних сплавів на прикладі марок Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V. На підставі розрахункових даних проведена серія дослідних розпилень. У результаті отримано високоякісні сферичні порошки, що відповідають вимогам адитивних технологій. Розроблено оптимальні технологічні режими ротаційного плазмового розпилення, що змогли забезпечити серійне виробництво деталей авіадвигунів адитивними технологіями. Важливим практичним надбанням даної наукової роботи стала розробка спеціальної технічної документації на постачання виготовлених порошків – технічні умови для порошків із нікелевих жароміцних сплавів та на порошки із титанових сплавів, погоджені із замовниками та постачальником.

Наукова новизна роботи полягає в наступному:

1. Отримали подальший розвиток залежності впливу технологічного параметру ротаційного плазмового розпилення (швидкість обертання витратного електроду) на розмір порошків із жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V. Удосконалено кінематичну схему системи обертання витратного електроду в обладнанні для ротаційного плазмового розпилення (PREP). Отримано максимальну кількість (d_{50}) дрібнодисперсного (30...100 мкм) металевих порошків для виготовлення деталей ГТД адитивними технологіями.

2. Вперше встановлені регресійні залежності впливу складу плазмоутворюючих газів (аргон, гелій) в умовах надвисоких швидкостей обертання розпилюваної заготовки (20-30 тис. хв⁻¹) на фракційний склад виготовлених металевих порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 та Ti-6Al-4V за технологією PREP. Встановлено оптимальні технологічні режими для виготовлення сферичних порошків розмірами 30...60 мкм нікелевих жароміцних сплавів Inconel 718 і ВЖ98 та із титанового сплаву Ti-6Al-4V дисперсністю 30...60 мкм.

3. Розвинуте наукове обґрунтування впливу фракційних складів розроблених порошків на технологічні характеристики адитивних методів виробництва (лазерний 3D-друк, мікроплазмове та електронно-променеве пошарове

наплавлення). Встановлено оптимальні режими розпилення для одержання в дослідних і виробничих умовах металевих порошків різного призначення: для лазерного 3D-друку – 20...50 мкм; для мікроплазмового пошарового наплавлення – 100...120 мкм; для електронно-променевого вирощування виробів – 45...105 мкм.

Виготовлені порошки, замовлені підприємством АТ «Мотор Січ», застосовувались для лазерного 3D-друку деталей камери згорання – завихрювача зі сплаву Inconel 718. Виготовлені деталі пройшли випробування в складі двигуна та технологія лазерного друку рекомендована для серійного виробництва завихрювачів. В умовах Інституту електрозварювання ім. Є. О. Патона успішно проведене електронно-променеве та мікроплазмове пошарове вирощування заготовок та зразків із використанням сферичних порошків нікелевого сплаву ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V, що підтверджене відповідними актами впровадження.

Ключові слова: авіаційний газотурбінний двигун, завихрювач, жароміцний сплав, адитивна технологія, сферичний порошок, ротаційне плазмове розпилення, витратний електрод, вакуумна камера, плазмоутворюючий газ, фракційний склад, насипна щільність, текучість порошку, електронно-променеве вирощування, плазмове пошарове наплавлення, лазерний 3D-друк.

ABSTRACT

Zavgorodniy O.V. Improvement of equipment and technology of plasma rotary spraying for the production of metal powders for additive purposes. – Qualification scientific work in the form of a manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in specialty 131 – Applied Mechanics. – National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, 2025.

To increase the country's defense capability, an important area of industrial

development is aircraft engine manufacturing. In order to increase the operational performance of aircraft engines, designers propose to change the configuration of individual parts. Subassemblies consisting of several assembly units should be replaced with a monolithic part. The technology of 3D-printing of parts of an extremely complex shape according to the constructed three-dimensional model can minimize the time spent on introducing them into mass production. The period from the design stage to the installation of a part on an aircraft can last several weeks instead of months and even years, as was the case with classical production technologies. Cost reduction in this case occurs due to a significant increase in the material utilization rate, the elimination of the stages of manufacturing tools and molds, a reduction in the number of personnel and minimal mechanical processing. At the same time, since the reserve of mechanical properties of aviation materials and alloys is often almost exhausted, a search is underway for new alloys or ways to radically improve the properties of existing materials. The solution that combines the above-mentioned areas is the introduction of innovative technologies for manufacturing parts by additive manufacturing using metal powders. Additive technologies have been widely used in leading countries of the world for decades, including in aircraft engine manufacturing. At the same time, foreign enterprises are developers of equipment and technologies for manufacturing metal powders of certain alloys, which have an extremely high cost and do not always meet the requirements of domestic production, where other brands of materials are used. Technological modes of manufacturing powders and products from them are usually classified information and are not disclosed by the manufacturer. Therefore, to establish additive manufacturing in Ukraine, it is necessary to develop our own equipment for manufacturing metal powder, determine technological modes for those alloys used in domestic technology, and test them using various additive manufacturing technologies available in our country (laser 3D-printing, electron beam and plasma growing). These methods are already used at the Institute of Electric Welding named after E. O. Paton NAS of Ukraine, at JSC "Motor Sich", SE "Ivchenko-Progress", LLC "Additive Laser Technologies". These enterprises need dispersed powders from heat-resistant nickel and titanium alloys. The main requirements for additive powders are their spherical shape and particle size, which should

not exceed 100 μm . This dissertation work is devoted to solving these scientific and practical problems.

The purpose of the work is to develop a technology for obtaining spherical powders from nickel and titanium alloys, which are used for additive growth of parts for critical purposes, to improve their quality and ensure the required level of mechanical properties.

The object of research is the process of plasma rotary spraying for the production of spherical powders from titanium and nickel alloys, the processes of powder consolidation using additive technologies.

The subject of the study is the equipment and technological modes of plasma rotary spraying for the production of spherical powders from titanium and nickel alloys and the parameters of additive technologies for manufacturing various parts from them.

As the basic equipment for the production of spherical metal powders, the equipment of the LLC "Multiflex" enterprise was used – equipment of the "YQP" type for rotary plasma spraying. However, the maximum rotation speed of the consumable electrode in the state before modernization did not exceed 15 000 min^{-1} , which allowed obtaining powders with granule sizes of about 200 μm and larger - which did not meet the requirements of additive technologies. The work has implemented a comprehensive approach that combines equipment modernization and technology improvement to improve the quality of the initial powders and the final product – parts made from these powders. Modernization of centrifugal plasma spraying for the production of metal powders that meet additive requirements requires additional resolution of a number of issues. The work to improve the production of spherical powders sets the following tasks:

1. To propose changes in the node for supplying the sprayed workpiece and fixing it in order to increase the rotation speed of the consumable electrode.

2. To work out the optimal compositions of the gas medium during rotary spraying of workpieces made of titanium and nickel alloys.

3. To determine the influence of the technological parameters of spraying (the speed of rotation of the workpiece and the composition of the plasma-forming gas mixture) on the fractional composition and quality of powders made of heat-resistant nickel and titanium alloys.

4. To obtain spherical powders of a given fractional composition for certain powder consolidation technologies (for electron beam and microplasma deposition, laser 3D-printing).

Structural changes in the equipment for the production of powders (changing the spindle mechanism for clamping the workpiece being sprayed, installing bearings with forced lubrication) allowed to increase the rotation speed to $30\,000\text{ hv}^{-1}$, reduce the level of vibrations and reduce the amount of unsprayed consumable electrode. The modernization of the equipment made it possible to optimize the technological parameters of spraying to create a stable industrial technology. To increase the volume fraction of spherical powder of the required dispersion, the influence of the rotation speed of the consumable electrode and increasing the plasma power by working out the composition of the plasma-forming gas mixture was studied. It was proposed to add an inert gas – helium to argon. Regression equations were obtained for the dependence of the particle size of the sprayed powder and the volume fraction of the powder of the required size on the rotation speed and the composition of the plasma-forming gas mixture. The method of mathematical experimental planning established the optimal process parameters for nickel heat-resistant alloys using the Inconel 718, ВЖ98 grades and titanium alloy Ti-6Al-4V as an example. Based on the calculated data, a series of experimental sprayings were carried out. As a result, high-quality spherical powders were obtained that meet the requirements of additive technologies. Optimal technological modes of rotary plasma spraying were developed, which were able to ensure the serial production of aircraft engine parts using additive technologies. An important practical achievement of this scientific work was the development of special technical documentation for the supply of manufactured powders – technical conditions for powders made of nickel heat-resistant alloys and for powders made of titanium alloys, agreed with customers and the supplier.

The scientific novelty of the work is as follows:

1. We have further developed the dependence of the influence of the technological parameter of rotary plasma spraying (consumable electrode rotation speed) on the size of powders from heat-resistant nickel alloys Inconel 718, ВЖ98 and titanium alloy Ti-6Al-4V. The kinematic scheme of the consumable electrode rotation system in the equipment

for rotary plasma spraying (PREP) has been improved. The maximum amount (d_{50}) of finely dispersed (30...100 μm) metal powder for the manufacture of gas turbine engine parts by additive technologies has been obtained.

2. For the first time, regression dependences of the influence of the composition of plasma-forming gases (argon, helium) under conditions of ultra-high rotation speeds of the sprayed workpiece (20-30 thousand hv^{-1}) on the fractional composition of metal powders manufactured from Inconel 718, ВЖ98 and Ti-6Al-4V alloys using PREP technology have been established. Optimal technological modes have been established for the manufacture of spherical powders with sizes of 30...60 μm of nickel heat-resistant alloys Inconel 718 and ВЖ98 and from titanium alloy Ti-6Al-4V with a dispersion of 30...60 μm .

3. Scientific substantiation of the influence of fractional compositions of the developed powders on the technological characteristics of additive manufacturing methods (laser 3D printing, microplasma and electron beam layer-by-layer deposition) has been developed. Optimal spraying modes for obtaining metal powders for various purposes in experimental and production conditions have been established: for laser 3D printing – 20...50 μm ; for microplasma layer-by-layer deposition – 100...120 μm ; for electron-beam growth of products – 45...105 μm .

The manufactured powders, ordered by JSC Motor Sich, were used for laser 3D-printing of combustion chamber parts – swirlers made of Inconel 718 alloy. The manufactured parts were tested as part of the engine and laser printing technology is recommended for serial production of swirlers. In the conditions of the E. O. Paton Electric Welding Institute, electron-beam and microplasma layer-by-layer growth of blanks and samples using spherical powders of nickel alloy ВЖ98 and titanium alloy Ti-6Al-4V was successfully carried out, which is confirmed by the relevant acts of implementation.

Keywords: aviation gas turbine engine, swirler, heat-resistant alloy, additive technology, spherical powder, rotary plasma spraying, consumable electrode, vacuum chamber, plasma-forming gas, fractional composition, bulk density, powder flowability, electron beam growth, plasma layer-by-layer deposition, laser 3D-printing.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації в наукових журналах, які індексуються у Scopus

1. Girzhon V. V., Smolyakov O. V., Ovchinnykov O. V., **Zavgorodny O. V.** Laser Surface Strengthening of Heat-Resistant Titanium Alloy for Gas Turbine Engines. *Metallofizika i Novejsie Tehnologii*. 2022. № 3. Vol. 44. P. 383-392. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0383>. *Здобувачем сформульована проблематика дослідження та визначений вплив лазерної обробки поверхні зразків із жароміцного титанового сплаву на їх мікротвердість.*

2. V. Matviichuk, V. Nesterenkov, V. Efanov, **O. Zavgorodny**, R. Bilyi. Determining technological parameters for the additive electron-beam surfacing of blanks for medical implants made of Zr-Ti-Nb alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. №1/12 (133). P. 16 - 26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322118>. *Здобувачем визначено взаємозв'язок технологічних параметрів електронно-променевого наплавлення з характеристиками вихідного порошку; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.*

3. Halienkova O. B., Yefanov V. S., **Zavgorodny O. V.**, Kirian I. M., Bulish S. O., Rud A. D. Development of a titanium aluminide alloy of optimal composition by modification. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. Vol. 47. № 3. P. 245 – 256. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.47.03.0245>. *Дисертантом відпрацьована методика оптимізації досліджених параметрів із отриманням регресійних рівнянь; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.*

Публікації у наукових фахових виданнях України

4. Галєнкова О. Б., Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Бронецька В. І., Шевченко В. Г. Комплексний вплив модифікування на властивості γ -сплаву на основі алюмініду титану. 2025. *Сучасні проблеми металургії.*, № 28. С. 3-12. DOI:10.34185/1991-7848.2025.01.01. *Здобувач виконав аналіз результатів механічних випробувань зразків із титанових сплавів; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.*

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Овчинников О. В., Скребцов А. А., **Завгородній О. В.** Дослідження впливу фракції сферичного порошку на його хімічний склад. *Національний університет «Запорізька політехніка»* (8-10 жовтня 2019, м. Запоріжжя).

6. **Завгородній О.В.**, Сторчак Є. А., Буліш С. О., Білий Р. Ю. Отримання порошків з частинками сферичної форми низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів Zr-Ti-Nb методом плазмового розпилення обертового електрода. *Інститут електрозв'язування ім. Є. О. Патона НАНУ*. (27 листопада 2023 р. м. Київ).

7. Сторчак Є. А., Овчинников О. В., **Завгородній О. В.**, Білий Р. Ю., Осіпчук Р.Б. Виготовлення сферичних порошків із авіаційного сплаву Ti-6Al-4V з використанням легованого титану губчастого. *Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»* (3-6 вересня 2024 р., м. Харків).

8. **Завгородній О.В.**, Овчинников О.В., Пясецький М. М., Іванів А. М., Урекін Д. В. Вплив параметрів ротаційного плазмового розпилення на розмір сферичних порошків жароміцних сплавів *Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»* (3-6 вересня 2024р., м. Харків).

9. Бехтер Р. В., Галенкова О. Б., Білий Р. Ю., **Завгородній О. В.**, Овчинников О. В. Визначення коефіцієнту запасу міцності лопаток турбіни зі сплаву на основі алюмінію титану. *Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України* (7-11 жовтня 2024 р., м. Київ).

10. Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Галенкова О. Б., Буліш С. О., Осіпчук Р. Б. Виготовлення стоматологічних імплантів із низькомодульного сплаву Zr-Ti-Nb за адитивною електронно-променевою технологією. [*Електронний ресурс*]. (20-22 січня 2025 р., м. Мюнхен).

11. Осипенко О. В., Сторчак Є. А., **Завгородній О. В.**, Пясецький М. М. Вплив складу українських титановмісних концентратів на вміст ванадію в тетрахлориді титану для отримання інноваційного титану губчастого. *Дніпровський металургійний інститут УДУНТ* (20 березня 2025 р., м. Дніпро).

12. Куц Д. О., Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Пясецький М. М. Аспекти

впровадження 3D-технологій для виготовлення деталей авіадвигунів. *Національний авіаційний інститут*. (1-4 квітня 2025 р., м. Київ).

13. Куц Д. О., **Завгородній О. В.**, Іванів А. М., Білий Р. Ю. Підвищення експлуатаційних показників камери згоряння газотурбінного двигуна шляхом впровадження адитивного способу виробництва. *Національний авіаційний інститут*. (22 квітня 2025 р., м. Київ).

ЗМІСТ

Перелік умовних позначок	16
Вступ	17
Розділ 1. Проблеми та перспективи виробництва сферичних порошків для адитивних технологій в авіабудуванні	24
1.1 Переваги адитивних технологій для авіабудування	24
1.2 Методи виробництва металевих порошків та вимоги до порошків для адитивних технологій	33
1.3 Огляд технологічного обладнання для виробництва сферичних порошків та вибір оптимального з врахуванням вимог адитивних технологій	49
1.4 Постановка мети та задач роботи	54
1.5 Висновки по розділу 1	55
Розділ 2 Матеріали та методики досліджень	56
2.1 Обґрунтування методології досліджень	56
2.2 Визначення хімічного складу	59
2.3 Фракційний склад та інші характеристики порошку	60
2.4 Дослідження структури	62
2.5 Електронно-мікроскопічні дослідження	63
2.6 Механічні випробування	64
2.7 Статистична обробка даних	66
2.8 Висновки по розділу 2	67
Розділ 3 Модернізація обладнання для виготовлення сферичних порошків жароміцних сплавів	68
3.1 Аналіз існуючої технології та обладнання для виявлення шляхів їх модернізації	68
3.2 Конструктивні зміни вузлів та механізмів обладнання для ротаційного плазмового розпилення	79
3.3 Висновки по розділу 3	87

Розділ 4 Оптимізація технологічних параметрів ротаційного плазмового розпилення для виготовлення сферичних порошків жароміцних сплавів	89
4.1 Визначення впливу технологічних параметрів плазмового ротаційного розпилення заготовки на розмір частинок порошку	89
4.2 Визначення якості сферичних порошків, виготовлених згідно з розробленими режимами на вдосконаленій установці ротаційного плазмового розпилення	101
4.3 Висновки по розділу 4	111
Розділ 5 Застосування сферичних порошків жароміцних сплавів для виготовлення деталей адитивними технологіями	113
5.1 Виготовлення малогабаритної деталі з високим коефіцієнтом складності форми «Завихрювач» зі сплаву Inconel 718 лазерним 3D-друком	114
5.2 Виготовлення середньогабаритних виробів із порошку нікелевого сплаву ВЖ98 із застосуванням технології мікроплазмового пошарового наплавлення	120
5.3 Виготовлення великогабаритних корпусних деталей із титанового сплаву Ti-6Al-4V електронно-променевою 3D-друком	124
5.4 Висновки по розділу 5	129
Висновки	130
Перелік використаних джерел	132
Додаток А	145
Додаток Б	147
Додаток В	149
Додаток Г	150
Додаток Д	151
Додаток Ж	152
Додаток К	153
Додаток Л	154

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧОК

АТ – адитивні технології

ГТД – газотурбінний двигун

SLM – Selective Laser Melting

PREP – ротаційне плазмове розпилення

УЦР – установка відцентрового розпилення

LAM – пошарове лазерне сплавлення порошків

ЕПН – електронно-променеве наплавлення

SLS – селективне лазерне спікання

LDMD – спрямована лазерна наплавка

ГА – газова атомізація

РСМА – енергодисперсійний рентгеноспектральний мікроаналіз

d₅₀ – середній розмір 50 % частинок порошку

ВСТУП

Актуальність теми. Адитивні технології набувають все більшого поширення в різних галузях – в авіакосмічній промисловості, виробництві технологічного оснащення, медичних імплантів, деталей спортивних автомобілів тощо [1-3]. Одним із перспективних у цьому напрямку є синтез виробів електронним променем на операції пошарового плавлення порошку різних сплавів, а також пошарове додавання матеріалу з використанням лазера – селективним лазерним плавленням (SLM). Використання зазначених технологій дозволяє отримувати деталі з внутрішніми криволінійними отворами, недоступними для виготовлення інших видів обробки. Відсутність значної кількості переходів і переустановок деталі на верстаті, як при традиційних методах виготовлення, дозволяє отримати мікронну точність виробу [4-6]. Найбільший економічний ефект досягається на деталях, що раніше виготовляли механічною обробкою з об'ємних штампованих заготовок з високим коефіцієнтом використання металу.

Нікелеві та титанові сплави для адитивного виробництва мають найбільший потенціал, оскільки вихідний матеріал має велику вартість, а також близько половини ціни готової деталі займає механічна обробка. Хоча ціна нікелевого або титанового порошку, що застосовується в адитивному вирощуванні деталей, значно вища за вартість деформованої заготовки, але собівартість деталі буде нижчою завдяки меншим припускам під механічну обробку і, відповідно, менших витрат металу [7-9]. Слід додати істотне скорочення термінів виготовлення деталей, оскільки для адитивних технологій вже не потрібно проектування складних штампів, прес-форм і сотень операцій механообробки. 3D-модель деталі створюють в комп'ютері, після чого починають виробництво [10-12].

У вітчизняній промисловості впровадження адитивних технологій зіткнулося з низкою проблем, пов'язаних, насамперед, із вихідними порошками. Висока вартість застосовуваної сировини, якою є сферичні порошки зарубіжного виробництва,

труднощі їх стабільних поставок і обмежена номенклатура сплавів, серед яких є тільки іноземні марки, є головним стримуючим фактором. Тому важливим завданням є заміна існуючих вартісних імпорتنих порошкових матеріалів вітчизняними. Для вирішення цієї проблеми необхідно розробити технології та провести удосконалення обладнання з метою отримання порошкових матеріалів із різних сплавів.

Загальною вимогою до порошків, які застосовуються для адитивного вирощування виробів, є сферична форма частинок з характерним розміром (від 20 мкм до 60 мкм). Такий розмір частинок визначає мінімальну товщину насипного шару та надалі шорсткість майбутнього виробу. Вимога сферичної форми також пов'язана з тим, що такі частинки більш компактно укладаються до певного об'єму і мають необхідну плинність у системі подачі сипучого порошку з мінімальним опором. До того ж, порошки повинні мати високу хімічну однорідність і знижений вміст шкідливих домішок, в їх структурі мають бути відсутні несплавлення, пори, раковини [13-15]. Основними технологіями одержання порошків, які забезпечують виконання цих вимог, є методи диспергування розплаву (розпилення або атомізація – GA). До основних технологічних варіантів атомізації розплаву відносять газову, вакуумну та відцентрову (ротаційну) [16-18].

При газовій атомізації метал розплавляють у плавильній камері і потім зливають у керованому режимі, де проводиться руйнування потоку рідкого металу струменем інертного газу під тиском. Процес вакуумної атомізації відбувається за рахунок розчиненого в розплаві газу (водень, гелій, азот). Метал під дією тиску в плавильній камері надходить догори розпилювальної камери. Перепад тиску, що виникає, спонукає розчинений газ до виходу на поверхню крапель розплаву і «підриває» краплі зсередини, забезпечуючи при цьому сферичну форму і дрібнодисперсну структуру порошку. Як в результаті газової, так і вакуумної атомізації, замість сферичної форми, частинки порошку можуть набувати витягнутої форми чи з'єднуються між собою, утворюючи «сателіти». Крім того, має місце низький вихід порошку однієї фракції, тобто великий розкид у розмірах, а газове розпилення ще привносить в хімічний склад порошинок неоднорідність і, нерідко,

наявність зміненого шару і структурний шар, що може плавитися на їх поверхні. Все це в комплексі знижує якість готової деталі, сприяє утворенню в її структурі мікропор та несплавень, що неприпустимо для відповідальних виробів. Технологія ротаційної атомізації передбачає розпилення шару розплавленого металу, що утворюється на торці прутка, що обертається, з плазмовим нагріванням (міжнародне позначення – метод PREP) [19-21]. Пруток, що обертається, подається в камеру розпилення, де оплавляється плазмовою дугою і на торці прутка утворюється рідка плівка товщиною менше діаметра майбутніх гранул. Частинки розплаву, відірвавшись від вінця заготовки, яка обертається, переміщується в газовому середовищі і кристалізується, утворюючи сферичні гранули. Висока швидкість обертання прутка дозволяє запобігти утворенню в структурі кожної частинки порошку таких дефектів, як пори, сегрегації і скупчення фаз. На сьогоднішній день отримані позитивні результати у застосуванні сферичних порошоків, одержаних цим методом (PREP) [22-24]. Однак, прикладні завдання під конкретну деталь, той чи інший сплав, необхідність конкретного розміру фракції порошку окреслюють ряд невирішених питань у цій сфері. Так, ключовим є створення модернізованого обладнання для отримання порошоків методом PREP, що дозволяє отримувати заданий фракційний склад; відпрацювання технологічних режимів виготовлення порошку із різних сплавів, фізико-механічні властивості яких відрізняються і зумовлюють необхідність різних параметрів розпилення.

Для промислового виробництва деталей адитивними методами із порошоків необхідно ретельне вивчення, моделювання та оптимізація технологічних операцій на всіх етапах отримання готового виробу. Це дозволить сформулювати рекомендації щодо відпрацювання повного технологічного циклу виготовлення у кожному конкретному випадку.

Мета та завдання дослідження. Мета роботи полягає в розробці технології отримання сферичних порошоків з нікелевих та титанових сплавів, які застосовуються для адитивного вирощування деталей відповідального призначення, для підвищення їх якості та забезпечення необхідного рівня механічних властивостей. Для досягнення поставленої мети вирішувались наступні завдання:

- модернізація технологічного обладнання для розпилення заготовок (витратних електродів);
- встановлення закономірностей впливу технологічних режимів обладнання для реалізації технології PREP на характеристики порошків;
- отримання оптимальних характеристик порошкових матеріалів для різних процесів адитивного вирощування деталей (лазерне сплавлення на 3D-принтері та мікроплазмове наплавлення);
- розробка технологій адитивного виготовлення різних деталей авіадвигунів та впровадження нових технологій у серійне виробництво.

Предмет досліджень – технологічні режими та обладнання плазмового ротаційного розпилення для виробництва сферичних порошків з титанових та нікелевих сплавів та параметри адитивних технологій виготовлення різних деталей з них.

Об'єкт досліджень – процес плазмового ротаційного розпилення для виробництва сферичних порошків із титанових та нікелевих сплавів, процеси консолідації порошків із застосуванням адитивних технологій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами, грантами.

Окремі результати роботи виконані автором дисертації в рамках №д.р.0123U102008 «Новітні низькомодульні сплави Zr-Ti-Nb для виготовлення адитивними технологіями індивідуалізованих біосумісних імплантів з удосконаленою функціональною поверхнею», внесок автора полягав у розробці технології виготовлення сферичного порошка.

Методи дослідження. Визначення хімічних складів сплавів виконували рентгеноспектральним, хімічним та енергодисперсійним методами.

Дослідження структур матеріалів проводили з використанням оптичного, растрового та електронного мікроскопів.

Механічні властивості визначали за стандартними методиками.

Обробка статистичних даних виконувалась кореляційно-регресійним методом.

Наукова новизна отриманих результатів. Основні висновки та положення, що характеризують наукову новизну роботи, полягають у наступному:

1. Отримали подальший розвиток залежності впливу технологічного параметру ротаційного плазмового розпилення (швидкість обертання витратного електроду) на розмір порошків із жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V. Удосконалено кінематичну схему системи обертання витратного електроду в обладнанні для ротаційного плазмового розпилення (PREP). Отримано максимальну кількість (d_{50}) дрібнодисперсного (30...100 мкм) металевого порошку для виготовлення деталей ГТД адитивними технологіями.

2. Вперше встановлені регресійні залежності впливу складу плазмоутворюючих газів (аргон, гелій) в умовах надвисоких швидкостей обертання розпилюваної заготовки (20-30 тис. хв⁻¹) на фракційний склад виготовлених металевих порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 та Ti-6Al-4V за технологією PREP. Відповідно отриманим рівнянням встановлено, що для виготовлення порошків розмірами 30...50 мкм із нікелевих жароміцних сплавів Inconel 718 і ВЖ98 швидкість обертання має становити 25 тис. хв⁻¹, а співвідношення аргон / гелій – 30 / 70 %. При максимальній швидкості обертання (30 тис. хв⁻¹) достатньо вводити в плазмоутворюючу газову суміш 40 % гелію. Для одержання порошків із титанового сплаву Ti-6Al-4V розміром 30...60 мкм необхідно забезпечити швидкість обертання до 30 тис хв⁻¹ при вмісті гелію не менше 70 %, що пов'язано із низькою питомою вагою титану і більш складним відривом крапель у процесі розпилення.

3. Розвинуте наукове обґрунтування впливу фракційних складів розроблених порошків на технологічні характеристики адитивних методів виробництва (лазерний 3D-друк, мікроплазмове та електронно-променеве пошарове наплавлення). Встановлено оптимальні режими розпилення для одержання в дослідних і виробничих умовах металевих порошків різного призначення:

- для лазерного 3D-друку – 20...50 мкм;
- для мікроплазмового пошарового наплавлення – 100...120 мкм;
- для електронно-променевого вирощування виробів – 45...105 мкм.

Практична цінність роботи та реалізація у промисловості:

- удосконалено обладнання типу УЦР-4 для виробництва сферичних порошків із титанових та нікелевих сплавів, що забезпечило виробництво сферичних металевих порошків високої дисперсності (20...100 мкм), які відповідали вимогам якості порошків для адитивних технологій;

- розроблені технологічні режими виготовлення сферичних порошків жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718, ВЖ98, а також титанового сплаву Ti-6Al-4V ротаційним плазмовим розпиленням на модернізованому обладнанні, що забезпечило максимальний відсоток порошку заданої фракції у виготовленій партії;

- на основі результатів конструктивного удосконалення обладнання ротаційного плазмового розпилення та розроблених технологічних режимів для виготовлення металевих порошків високої дисперсності розроблені та впроваджені на підприємстві АТ «Мотор Січ» спеціальні технічні умови («Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізонікелевій основі» та «Порошки титанових сплавів сферичної форми для адитивних процесів вирощування»), що регламентують вимоги до хімічного складу та технологічних властивостей порошків.

- у результаті досліджень впливу діаметру металевих порошків на якість матеріалу зразків, вирощених за різними адитивними технологіями, визначені найбільш ефективні для цих процесів розміри порошків: 20...50 мкм – для лазерного 3D-друку, 45...105 мкм і 100...120 мкм – відповідно для електронно-променевого і мікроплазмового пошарового вирощування. Порошки вказаних фракцій застосовуються для лазерного друку складнопрофільних деталей паливної системи ГТД – завихрювача (Додатки Б, Г, Д) та мікроплазмового вирощування кільцевих деталей в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона (Додаток В).

- окремі результати досліджень дисертаційної роботи Завгороднього О.В. використані в навчальному процесі кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій» НУ «Запорізька політехніка» (Додаток Ж).

Особистий внесок здобувача. Роботу виконано відповідно до науково-дослідної роботи (НДР) № д.р. 0123U102008 «Новітні низькомодульні сплави Zr-Ti-Nb для виготовлення адитивних технологій індивідуалізованих біосумісних імплантів з удосконаленою функціональною поверхнею».

Результати дисертаційного дослідження отримані особисто здобувачем та в співавторстві, опубліковані в наукових виданнях (**Додаток А**):

1) публікації у виданнях, що індексуються в наукометричній базі Scopus:

[1] – здобувачем сформульована проблематика дослідження та визначений вплив лазерної обробки поверхні зразків із жароміцного титанового сплаву на їх мікротвердість.

[2] – здобувачем визначено взаємозв'язок технологічних параметрів електронно-променевого наплавлення з характеристиками вихідного порошку; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.

[3] – дисертантом відпрацьована методика оптимізації досліджених параметрів із отриманням регресійних рівнянь; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.

2) фахові видання України:

[4] – здобувач виконав аналіз результатів механічних випробувань зразків із титанових сплавів; брав участь в обговоренні результатів та висновків роботи, написання статті.

Апробація матеріалів дисертації. Основні висновки та результати дисертаційної роботи доповідалися та обговорювалися на 9-ти міжнародних наукових конференціях [5-13].

Публікації. Основні результати роботи знайшли відображення у 13-ти публікаціях, з яких 3 статті з індексом цитування в наукометричній базі даних Scopus, 1 стаття – в науковому фаховому виданні та 9 матеріалів тез конференцій.

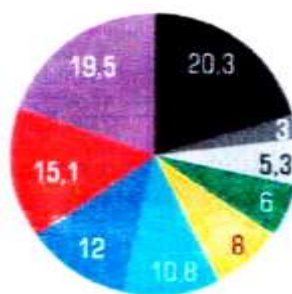
Структура та обсяг дисертації. Робота складається з анотації, вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел та вісім додатків.

Загальний обсяг дисертації складає 154 сторінки. Робота містить 26 таблиць, 45 рисунків та 12 формул. Список використаних джерел складається зі 127 найменувань, з них 20 – кирилицею та 107 – латиницею.

РОЗДІЛ 1. ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ВИРОБНИЦТВА СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ В АВІАБУДУВАННІ

1.1 Переваги адитивних технологій для авіабудування

Адитивне виробництво – новітня технологічна концепція, що активно розробляється у всіх високорозвинених країнах XXI століття (рис. 1.1). Принцип полягає в тому, що виріб створюється за допомогою пошарового додавання матеріалу різними способами на відміну від традиційних технологій механічної обробки, в основі яких лежить принцип віднімання зайвого матеріалу із заготовки. Дослідження британських вчених показали, що економія сировини при використанні адитивних технологій може досягати 75 % [25].



20,3 – споживчі товари; 19,5 – транспорт; 15,1 – медицина; 12,0 – авіація та космос; 10,8 – промисловість; 8,0 – наука; 6,0 – воєнне застосування; 5,3 – архітектура; 3,0 – інше

Рисунок 1.1 – Використання адитивних технологій у різних галузях економіки, % [25]

Перехід на цифровий опис виробів та адитивні технології справили справжню революцію, що особливо виявилось у таких високотехнологічних галузях як авіаційна та аерокосмічна. В останні роки адитивні технології активно імплементуються в авіадвигунобудування [26-28], що пов'язано з підвищенням вимог до потужностей авіаційних двигунів, що неможливо без нових конструкторських рішень та розробок у найкоротші терміни нових матеріалів,

здатних витримати великі навантаження та температури. Причому час від проєкту нового технічного рішення до випробування його в металі, у класичному поданні, завжди процес тривалий, що вимагає виготовлення значної кількості оснасток, створення технологій механічної обробки нових деталей, тривалих механічних випробувань матеріалів на зразках та натурних випробуваннях на деталях і т.д. При розробці нової промислової продукції особливе значення має швидкість проходження етапів науково-дослідних та дослідно-конструкторських робіт, що суттєво залежить від технологічних можливостей дослідного виробництва. Так, виготовлення ливарних і штампованих деталей, найчастіше – найбільш трудомісткий і дорогий процес, і при частій корекції конструкції відповідно змінюється технологічне оснащення для лиття або штампи, які виготовляються і, по суті, є заново виготовлені для кожного варіанту під час відпрацювання технології. Тому кожне наближення конструкції деталі до остаточної версії вимагає виготовлення нового оснащення, оскільки переробка старої виявляється трудомісткою або неможливою. У цьому традиційні методи виявляються як високовартісні, так і надзвичайно затратні за часом. Крім того, авіакомпанії вимагають скорочення термінів міжексплуатаційного ремонту двигунів, що неможливо без скорочення часу на виготовлення деталей, які підлягають заміні. Вище зазначене стало основою для пошуку нових рішень і технологій, які можуть відповідати сучасним вимогам. Адитивні технології дозволяють моментально передати цифрову модель у будь-яке місце світу та організувати там за потреби локальне виробництво [29-31]. Також використання пошарового синтезу дало можливість радикально скоротити час на створення нової продукції та дозволяють генерувати нові технології, наприклад, виготовлення деталей авіадвигунів з інтерметалідних сплавів титану. Традиційний виробничий ланцюжок виготовлення деталі полягає в отриманні сплаву – виготовленні прокату – попередньої механічної обробки для виготовлення заготовки – виготовлення кінцевої деталі. У разі адитивного виробництва замість традиційних багатоетапних технологічних ланцюжків використовується коротша: порошок – спечена деталь заданої форми, шорсткість поверхні надрукованої деталі становить Ra 25 / Ra 35 [34-36]. До того ж

конструктор до початка виробництва може розрахувати характеристики міцності одержуваного виробу, змодельовати його поведінку при навантаженнях, провести коригування конструкції. Технології 3D-друку дозволили поєднати в собі не тільки переваги порошкової металургії, такі як високий коефіцієнт використання матеріалу, що не вдається досягти методами лиття, але також переваги ливарного виробництва, такі як отримання деталей складної форми та різної конфігурації. Відсутність безлічі переходів і переустановок деталі на верстаті, як за традиційних методів виготовлення, дозволяє отримати мікронну точність виробу. Саме завдяки відходу від традиційних технологій за рахунок використання синтезу порошків лазером або електронним променем з'явилася можливість радикально скоротити час на створення нової продукції [37-39].

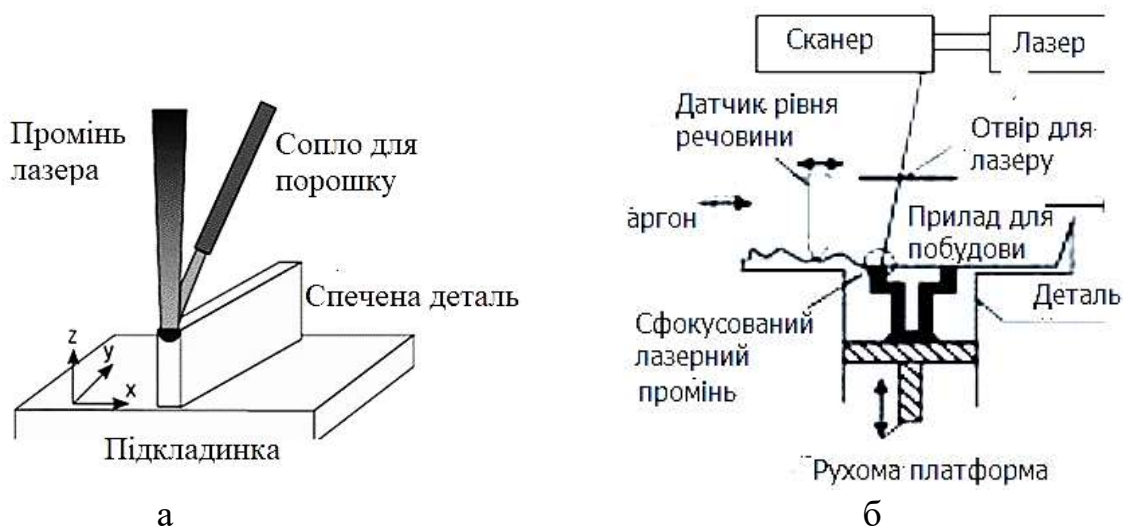
Аддитивні технології нерозривно пов'язані з технологіями тривимірного друку (3D-printing), які з кожним роком набирають все більшої популярності. У 90-х роках в Європі та США винайдені технології пошарового лазерного сплавлення порошків (SLS) для створення матеріалів, що застосовуються в аерокосмічній галузі. Суть цього методу полягає у використанні скануючого лазерного променя для розплавлення порошкових матеріалів та пошарового виплавлення деталі заданої форми. Для цього застосовуються два методи подачі порошку в зону плавлення: разом з інертним газом (рис. 1.2 а) та механічно із спеціальної камери (рис. 1.2 б).

У першому випадку головка волоконно-оптичного лазера переміщається системою управління, у другому – промінь лазера сканує у зоні спеціальної платформи для переміщення готового виробу.

Паралельно дослідження проводились у Німеччині. Компанії Rapid Product Innovations (RPI) та EOS GmbH дали свою назву процесу: Direct Metal Laser Sintering (безперервне лазерне сплавлення металу) [32, 33]. Ще одна назва Selective Laser Melting – селективне лазерне сплавлення використовується британськими фахівцями.

На розробку технології потрібно близько п'яти років і в даний час обладнання для пошарового лазерного сплавлення випускається серійно в країнах Європи та США. Використання даної технології дозволяє виготовляти деталі з внутрішніми

отворами криволінійними, недоступними виготовленнями іншими видами обробки.



а – порошок подається з інертним газом; б – порошок подається механічно

Рисунок 1.2 – Схема пошарового лазерного сплавлення [32, 33]

Вимоги щодо підвищення характеристик міцності матеріалів, зниження собівартості їх виготовлення в масовому виробництві призвели до появи нових методів консолідації порошків.

Нові методи адитивного виробництва знизять матеріаловитратність та трудомісткість виробництва. Крім того, вже доведено, що металеві вироби, надруковані на 3D-принтері, за своїми властивостями – щільністю, залишковою напругою, механічними властивостями, нерівноважною мікроструктурою, кристалографічною текстурою – відрізняються на краще від виробів, виготовлених литтям, методами деформації та механічною обробкою [32].

Найбільш складна обробка деталей в аерокосмічній галузі: під час виготовлення компонентів знімається до 90 % металу заготовки. При цьому значно зростає вартість деталі, і значні витрати йдуть на процес механічної обробки титанових та жароміцних нікелевих сплавів [33].

Економічні переваги нової технології можна продемонструвати з прикладу виготовлення деталей компресора газотурбінного двигуна (ГТД). Сучасні ГТД використовують відцентрові або осьові ступінчасті компресори, в яких лопатки разом із диском виточуються з однієї заготовки. У такому виробництві

співвідношення маси використаного металу до маси готової продукції становить приблизно 5:1 [40-42]. Адитивні технології дають змогу досягти значної економії: наприклад, скорочення часу виготовлення компресорного диска на 30 % та забезпечення коефіцієнту використання матеріалів до 2:1. Вартість кілограма порошку вища, ніж титану, що деформується, проте вартість механічної обробки становить близько половини ціни готової деталі [40-42].

На рисунку 1.3 показаний приклад деталей, одержаних за допомогою методу лазерного спікання. У виробництві турбінних лопаток використовується також метод лазерного порошкового наплавлення для зміцнення торця пера та контактних поверхонь [43-45] (рисунок 1.4). Деталі турбіни та компресора, виготовлені на 3D-принтері, знайшли застосування при виробництві турбонагнітачів.



а



б

а – розподільчий вал; б – лопатки диска турбіни

Рисунок 1.3 – Зовнішній вигляд деталей, виготовлених методом лазерного сплавлення [40-42]



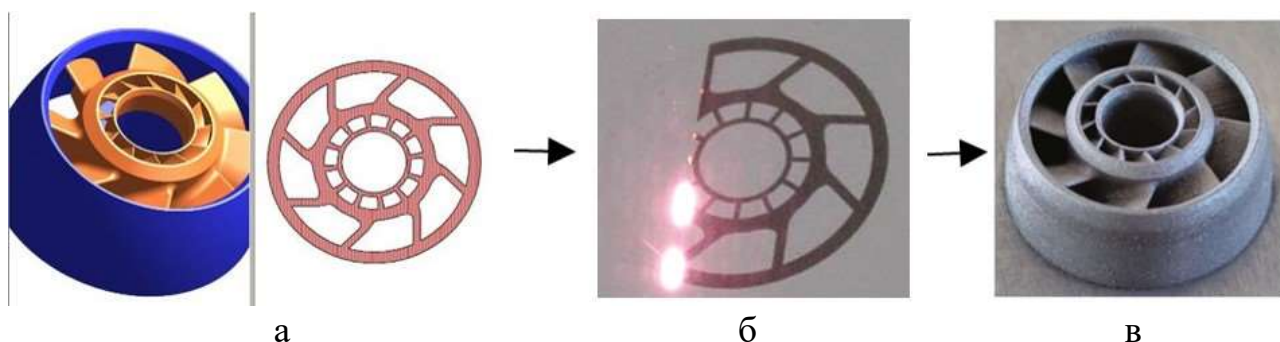
Рисунок 1.4 – Застосування лазерного порошкового наплавлення для

зміцнення торцевих поверхонь лопаток моноколеса [40]

На різних двигунобудівних підприємствах випробувано виготовлення завихрювачів, вирощених за адитивною лазерною технологією, в тому числі паливні форсунки із завихрювачами вирощені компанією "General Electric" (рисунок 1.5). Для їх виробництва раніше було потрібно дві прес-форми, на виготовлення та доведення яких витрачалися місяці, а за новою технологією завихрювачі вирощені в металі за 2 години [46].

На Міжнародному авіасалоні в Авалоні було представлено перший прототип реактивного двигуна, надрукованого на 3D-принтері [47, 48]. У компанії Stratasys, яка займається розробкою авіатехніки, заявили, що понад тисячу деталей нового Airbus A350 XWB роздруковано на 3D-принтері.

Зараз перед розробниками ГТД стоїть завдання виготовлення подібних деталей, що мають необхідні характеристики міцності і надійності. Це сьогодні стало реальністю. Так, Boeing щорічно виготовляє 22 тисячі деталей трьохсот найменувань для десяти військових та комерційних літаків. Компанія «General Electric» заявила, що половина деталей їх двигуна зроблена адитивними технологіями [49-51].



а – комп'ютерна модель; б – процес друку; в – надрукована деталь

Рисунок 1.5 – Етапи виготовлення завихрювача за технологією лазерного 3D-друку [42]

Аналогічні технології використовуються при виготовленні великогабаритних деталей та заготовок із титану. Так, у США проводився проєкт із виготовлення великорозмірних складноконтурних заготовок деталей із титану авіаційної якості. В

результаті реалізації цього проекту собівартість виготовлення титанових заготовок знижено в чотири-п'ять разів (наблизивши вартість титану до вартості алюмінієвих сплавів). Спочатку проводили спікання титанового порошку методом SLS, а потім виконувати додаткову обробку методами пластичної деформації, щоб надати заготівці механічні властивості, аналогічні стандартному титановому прокату авіаційної якості. Відомо також, що на установці компанії «LENS» (США) для виготовлення великогабаритних деталей успішно випробувано технологію пошарового мікроплазмового наплавлення та вже виготовлено корпусні деталі з нікелевих та титанових сплавів складної форми, з подвійними стінками (рисунок 1.6). Однією із перспективних є розробка технології синтезу великогабаритних виробів електронним променем на операції пошарового плавлення порошку різних сплавів [52-54].



а



б

а – корпус камери згоряння EOS зі сплаву Inconel 718; б – подвійне сопло турбіни зі сплаву Ti-6-4 двигуна JSF

Рисунок 1.6 – Деталі, виготовлені методом SLS [52]

Також адитивні технології в аерокосмічній галузі дають можливість виготовляти ті деталі, складну геометрію яких неможливо зробити традиційними технологіями (рисунок 1.7) або неможливо виготовити деталь одночасно з кількох сплавів. Для складнонавантажених деталей ГТД все частіше висувуються вимоги до різного рівня механічних властивостей матеріалу в декількох перерізах, що можна

реалізувати формуванням в них композиційних структурних станів [55-57] або виготовленням однієї деталі зі сплавів, що суттєво відрізняються за своїми властивостями. При цьому оптимальна мікроструктура по-різному навантажених при експлуатації частин деталі забезпечує високі показники міцності та опору до втомного руйнування, тріщиностійкість. Приклад тому – моноколесо із трьох сплавів титану, виготовлене лазерним синтезом порошків із трьох титанових сплавів (рисунок 1.8).



Рисунок 1.7 – Зовнішній вид ротору вертольота (Ti-6-4) безпілотника (UCAR), виготовлений лазерним 3D-друком [55]



A – звичайний сплав Ti-6-2-4-2; B – орторомбічний сплав;

C – інтерметалідний сплав Ti-48-2-2

Рисунок 1.8 – Моноколесо, виготовлене за адитивною технологією у трьох зонах з різних титанових сплавів [56]

Таким чином, можна виділити такі переваги адитивних технологій для авіабудування [56-60]:

- скорочується час і витрати отримання виробу, оскільки виключаються проміжні стадії виготовлення оснастки та прес-форм;
- підвищена рентабельність виробництва малої серії та ексклюзивних варіантів;
- можливість зниження ваги деталі за рахунок зменшення товщини стінок, створення інших конфігурацій;
- є можливість швидко відтворити деталь;
- виготовлення деталей складної геометрії та різної конфігурації;
- можливість оперативно змінювати геометрію деталей та в автоматизованому режимі фактично будувати тривимірні вироби за комп'ютерною моделлю;
- високий коефіцієнт використання матеріалу;
- використання 3D-технологій для відновлення та ремонту виробів, що збільшує тривалість життєвого циклу деталей;
- мінімальний тепловий вплив при відновленні деталі;
- відсутні дефекти лиття, та знижується трудомісткість фінішної механічної обробки.

На жаль, вітчизняні підприємства поки що недостатньо активно впроваджують у промислових масштабах нові технології консолідації порошкових матеріалів. Можливо, це пов'язано з тим, що виробництво порошків для адитивних технологій – це складне високотехнологічне виробництво, яке потребує спеціальних знань та обладнання, тому вихідні порошки мають більшу вартість, ніж литі або деформовані заготовки. У зв'язку з цим необхідно налагодження власного виробництва порошків адитивної якості. На підтвердження того, в різних публікаціях [58-60] авторами обґрунтовано, що попит на порошки та вироби порошкової металургії може перевищити попит на прокат. Виробник, який не вжив завчасно заходів для впровадження нових технологій, буде до цієї ситуації не готовий і наздогнати конкурентів йому буде складно. Адитивні технології – провісник нової промислової революції і, якщо їх упустити і не розвивати, то це значно знизить конкурентоспроможність нашої промисловості вже найближчим часом [58-60].

1.2 Методи виробництва металевих порошків та вимоги до порошків для адитивних технологій

Метод виробництва порошків з різних металів та сплавів визначають властивості майбутньої деталі, виготовленої методами синтезу порошку. До хімічних властивостей порошків слід віднести кількість домішок в матеріалі порошку; до фізичних відносять форму, розмір, питому поверхню, щільність та мікротвердість частинок; технологічні властивості – це насипна щільність, текучість порошку [61-64].

Часто властивості порошку з одного й того ж металу істотно змінюються залежно від способу виробництва. Порошки, ідентичні за хімічним складом, можуть мати різні фізичні характеристики та різко відрізнятися за технологічними властивостями, що призводить до значних змін умов подальшого перетворення порошку на готові вироби та впливає на їх властивості [61, 62].

Щоб забезпечити високу надійність і якість виробів, одержуваних методом адитивних технологій із сферичних порошків, необхідно контролювати виконання технологічних процесів на всіх етапах виробництва. На стадії виготовлення порошків контролюють їх фракційний склад та мікроструктуру. Властивості порошку залежать від його гранулометричного складу, аналіз якого є обов'язковим у процесі виготовлення порошків та їх обробки. Гранулометричний склад порошків повинен бути високої однорідності, що до розподілу частинок за розмірами, та гарантуватися технологією виготовлення [64].

Різноманітність вимог, що висуваються до порошків залежно від їх застосування, і навіть властивості самих металів пояснюють існування великої кількості різних методів виробництва металевих порошків [63-66].

Існують різні методи виробництва порошків, що застосовуються до сплавів на основі титану та нікелю, відносять наступні:

- подрібнення частинок шляхом помелу в кульових млинах або атриторах (Grinding);
- подрібнення шляхом гідравлічного удару (Shotting);
- процес відцентрового розпилення обертового зливка-електрода під впливом

поток плазми (Plasma Rotating Electrode Process – PREP).

- процес газоструменевого розпилення розплаву (Gas Atomization, Electrode Induction Melting-gas).

Перші роботи у галузі отримання порошків титану пов'язані з іменами українських вчених: І. М. Федорченко (м. Київ), В. С. Пугіна (м. Київ), В. А. Павлова (м. Запоріжжя), О. М. Шаповалової (м. Дніпро), В. А. Дрозденко (м. Харків). Насьогодні розроблено технології отримання порошків методом електролізу, пізніше отримані сферичні гранули шляхом розплавлення електрода у вакуумі.

Склад та твердість порошку титану, отриманого за різними технологіями, представлена в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 – Хімічний склад та твердість титанових порошків, отриманих за різними технологіями

Технологія виготовлення	Твердість, НВ	Вміст елементів, % ваг.						
		Ti	Cl	N	C	H	O	Σ інших елементів
Електролітичне рафінування	867	99,0	0,054	0,012	0,005	0,0102	0,029	0,101
Промисловий електроліз	1270	98,5	0,041	0,017	0,014	0,0075	0,083	0,162
Відновлення натрієм	1290	-	0,121	0,010	0,005 6	0,080	0,112	0,329
Відновлення магнієм	2380	97,0-98,0	0,105	0,270	0,085	0,126	0,176	0,762
Технологія PREP	-	98,5-99,0	-	0,050	-	0,0150	0,150	0,215

Як видно із даних таблиці 1.1, вміст домішок у частинках порошку титану багато в чому визначається технологією їх отримання. Хімічні технології дають можливість отримати більш рафінований порошок титану. Проте природа методів

хімічної конденсації є такою, що за їх допомогою практично неможливо вирішувати завдання отримання порошків багатокомпонентних конструкційних сплавів і дані технології неприйнятні для адитивного виробництва.

Вихідним матеріалом для промислової 3D-друку, як правило, служать сферичні порошки з характерним розміром частинок. Більше 90 % всіх порошків, які застосовуються в адитивних технологіях, виробляють методами диспергування розплаву [61-63].

Основними технологіями диспергування, які дозволяють виготовляти порошки необхідного розміру та забезпечують виконання всіх вимог, є газова атомізація, вакуумна та відцентрова атомізація. Порошки, одержані з використанням методів диспергування розплавів, мають форму частинок, близьку до сферичної. Методи розпилення металевих розплавів розрізняються за видом енергії, що витрачається (нагрів індукційний, електродуговий, лазерний, плазмовий та ін.), а також за видом впливу на розплав (механічний вплив, енергія газових та водяних потоків, відцентрова сила). При цих процесах може використовуватися різне середовище для їх створення. При газовій атомізації метал розплавляють у плавильній камері (зазвичай у вакуумі або інертному середовищі) і потім зливають в керованому режимі через спеціальний пристрій-розпилювач, де проводиться руйнування потоку рідкого металу струменем інертного газу під тиском (рисунк 1.9). Процес пневматичного розпилення передбачає розплавлення шихти, розташованої в мідному тиглі з підведеною охолоджувальною системою, в атмосфері інертного газу або у вакуумі. Отримана розплавлена суміш розпиляється через спеціальне сопло або форсунку під дією газу, що подається під високим тиском [61-63].

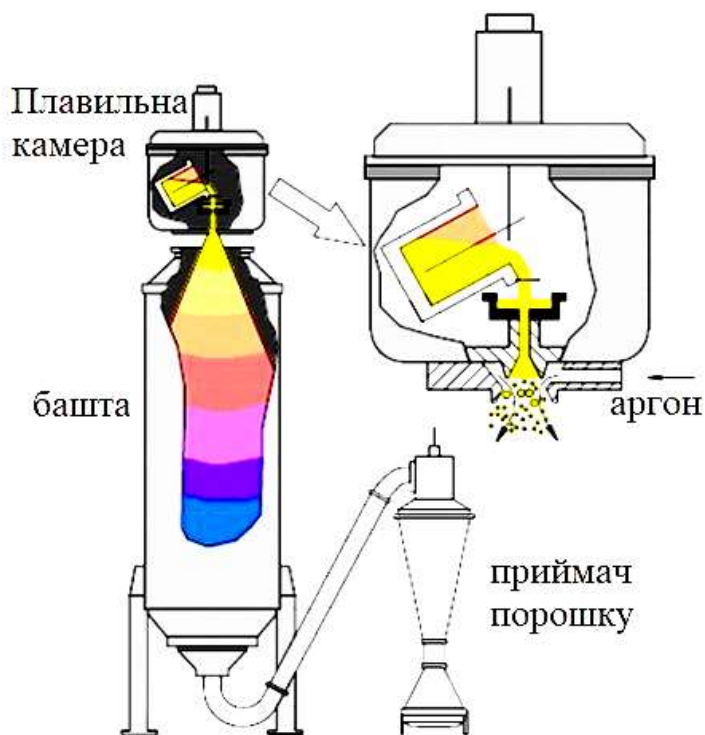


Рисунок 1.9 – Схема газової атомізації виробництва металевих гранул [65]

Вихідний матеріал, що використовується в зазначеному процесі, може бути чистим металом або сплавом у вигляді, наприклад, злитків. У цій схемі за рахунок дії першої індукційної котушки (зона гарнісажної печі) виникає потік розплаву, який стікає в зону дії другої індукційної котушки – вогнетривке сопло, але вже відсутня система охолодження, і тому не утворюється настіль. Надалі розплав розпилюється пневматично. У цьому методі потік розплаву розпадається на мікрозливки-гранули, які кристалізуються під час розпилення. Одним із недоліків даного процесу є утворення на частках порошку сателітів і значної кількості домішок у матеріалі, що одержується, в порівнянні з іншими процесами. Аналогічний процес газового розпилення розплаву розроблено фірмою "Iowa Powder Atomization Technologies Inc", США. У цьому процесі використовується два близько розташованих розпилювача для отримання газового потоку. Метою даної розробки є виробництво порошків дрібніших фракцій (менше 40 мкм) [61-63].

Оригінальний варіант технології розпилення обертового електрода розроблений фірмою "ALD Vacuum Technologies" та відрізняється відсутністю плавильного тигля. У даному методі електрод-заготовка, що повільно обертається,

подається в зону дії конічної індукційної котушки. Під дією індукції частина електрода, що обертається, плавиться, і одержуваний розплав стікає у форсунку, яка розпилює його по диспергаційній колоні, звідки затверділі мікрозливки-гранули потрапляють у резервуар [67-69]. Схематично цей процес зображено на рисунку 1.10. Діаметр використаного електрода в даній модифікації методу зазвичай не перевищує 70 мм, швидкість подачі заготовки в зону дії індукції дорівнює від 40 хв^{-1} до 60 хв^{-1} . У роботі [48] показаний вплив діаметру витратної заготовки на розмір та якість розпиленого порошку. При цьому встановлено, що порошки, виготовлені із заготовки діаметром 60 мм, мали менші відхилення за розмірами порівняно із порошками, виготовленими із витратного електрода $\varnothing 50 \text{ мм}$. Також ці порошки мали високі технологічні характеристики. Окрім цього, показана можливість отримати даним методом порошки дрібніших фракцій ніж, наприклад, при використанні технології PREP. Компанія "Osaka Titanium Technologies Co. Ltd." розробила такий процес для виробництва порошку з титану [67-69].



Рисунок 1.10 – Схема процесу розпилення в результаті індукційного нагріву [7]

Процес вакуумної атомізації відбувається за рахунок розчиненого у розплаві газу. Атомайзер складається з двох камер – плавильної та розпилювальної (рис. 1.11). У плавильній камері створюють надлишковий тиск газу (водень, гелій, азот), який

розчиняється у розплаві.

Під час атомізації метал під дією тиску надходить до соплового апарату, що поєднується з камерою розпилювання, де створюється вакуум. Перепад тиску, що виникає, спонукає розчинений газ до виходу на поверхню крапель розплаву і це забезпечує утворення сферичної форми частинок порошку та та їх дрібнодисперсної структури. Аналогічно процесам, описаним вище, рідкий розплав у вигляді крапель, кристалізується під час польоту і надалі частинки накопичуються в резервуарі [70, 71]. Весь процес відбувається у вакуумній камері.

Порошки, одержувані цим методом, мали правильну сферичну форму, окрім цього, в отриманих порошках майже відсутні шкідливі домішки. Середній розмір одержуваних гранул становив 40 мкм [72]. Індукційне плавлення електроду розпилюваним газом розроблене спеціально для отримання порошків таких металів як Ti, Zr, Nb, Mo, оскільки плавка цих металів у керамічних тиглях ускладнена навіть в умовах вакууму. Згідно з цією технологією прутки (після попереднього виплавлення у формі витратних електродів) проходили індукційне плавлення і розпилювались без використання плавильного тигля [71, 72].

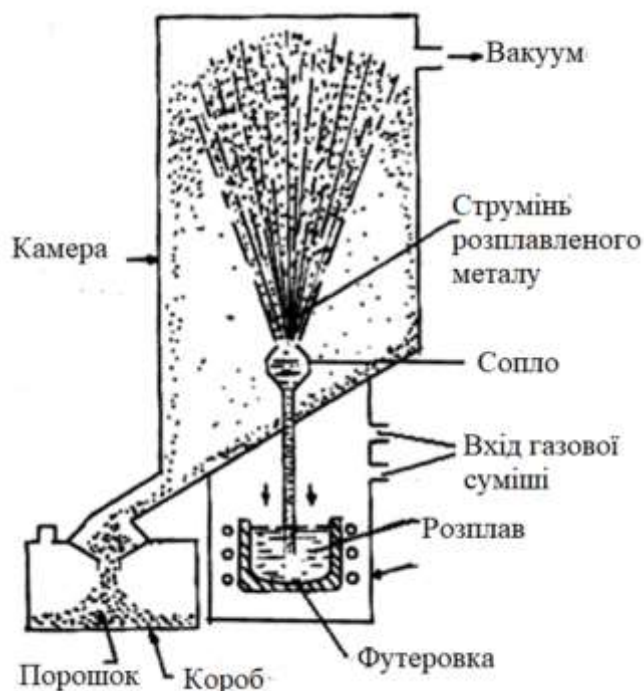


Рисунок 1.11 – Схематичне зображення процесу вакуумного розпилення [71]

Плавлення проводиться опусканням електрода, що повільно обертається, в кільцевий індуктор. Краплі металу падають з електрода в систему форсунок і розпилюються інертним газом. Типовими матеріалами, одержуваними за технологією без використання кераміки, є тугоплавкі та активні матеріали, наприклад, алюмініди [60].

Технологія відцентрової (ротаційної) атомізації передбачає розпилення розплаву, що створюється електричною дугою між прутком матеріалу та вольфрамовим електродом. Процес отримання порошків шляхом відцентрового розпилення електрода, що обертається під впливом плазмового потоку, схема якого наведена на рисунку 1.12, розроблений компанією "Nuclear Metals/Starmet" [73].

У даному процесі плазмовий потік гелію використовується для плавлення електрода, що обертається. Розплавлені частинки під дією відцентрової сили відриваються від електрода, що розплавляється, і застигають у вигляді сферичних гранул. Весь процес відбувається в камері із жаростійкої сталі, наповненій інертним газом або в умовах вакууму. Використання високих швидкостей охолодження при кристалізації, які реалізуються при відцентровому розпиленні, забезпечує отримання однорідної дрібнозернистої структури високої дисперсності та рівномірності розподілу фазових складових. Потужність плазмотрону визначається величиною діючої напруги та сили струму і впливає на фракційний склад одержуваного порошку [22, 23, 72].

При зростанні потужності плазмового струменя збільшується перегрів розплавленого металу, що підвищує його рідину і зменшує поверхневий натяг, сприяючи, таким чином, відриву крапель розплаву на більш ранній стадії. В результаті в процесі розпилення виходять частинки порошку дрібнішого фракційного складу.

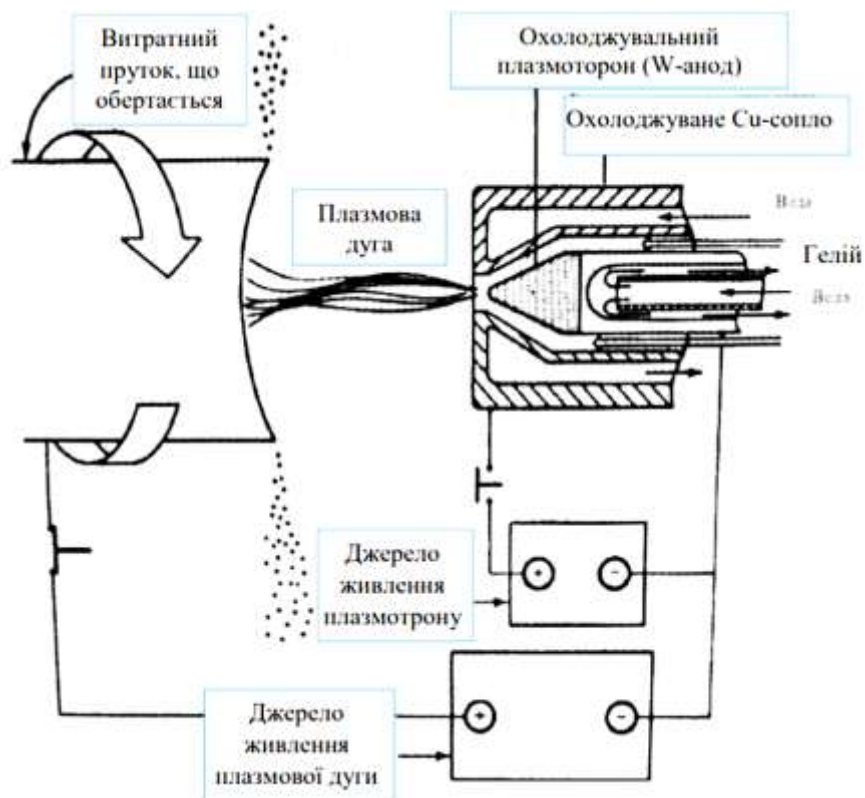


Рисунок 1.12 – Схематичне зображення процесу PREP [22, 23]

Розподіл розміру одержуваних порошкових гранул залежить від швидкості обертання електрода, від його матеріалу та діаметру. При обертанні зі швидкістю 15000 хв^{-1} типовий розмір одержуваного порошку із заготовки-електроду, що обертається, діаметром 50 мм зі сплаву Ti-6Al-4V, коливається від 100 до 300 мкм. Процеси відцентрового розпилення мають свої особливі переваги у виробництві перед іншими аналогічними процесами [74-76].

У традиційній порошковій металургії зазвичай отримують порошки в широкому діапазоні розмірів, коли близько 10-20 % одержуваних порошкових частинок мають розміри 180...250 мкм. Однак більш розвинута адитивна технологія вимагає отримання дрібних порошків, розміри яких становлять 20...100 мкм. Насі не існує загальних вимог до металевих порошків, що застосовуються в адитивних технологіях. Різні компанії-виробники 3D-принтерів обумовлюють роботу з певним переліком матеріалів, який зазвичай постачає сама компанія. Як правило, фірми-виробники 3D-принтерів є постачальниками витратних матеріалів [77-79].

Порошок закупають на фірмах-виробниках порошкових матеріалів,

закуплений порошок піддається просіюванню та поділу на фракції, далі проводиться змішування фракцій у певних співвідношеннях та фасування у герметичну тару. Так, виробники 3D-принтерів страхують себе від можливих претензій до якості порошоків з боку споживачів. У таблиці 1.2 наведено перелік порошкових композицій, пропонують компанії-виробники 3D-продукції [22, 65, 72].

Таблиця 1.2 – Порошкові композиції, що поставляються компаніям-виробниками деталей [80-82]

Фірма	Матеріал	Фірмове позначення	Стандарти Європи	Стандарти США
1	2	3	4	5
Concept Laser	Нерж. сталь	CL 20ES	1.4404	316L
	Інструм. сталь (Cr > 12%)	CL 90RW	1.2083	
	Інструм. сталь	CL 91RW		
	Мартенситно-старіюча сталь	CL 50/60WS	DIN 2 80 2709	18 % Ni Maraging300, AISI h23
	Al сплав AlSi12	CL 30AL	ISO AlSi12	AA 4047 ASTM A04130
	AlSi10Mg	CL 31AL	ISO 3522	A03600
	Ti-6Al-4V ELI Ti-6Al-4V	CL 40TI ELI CL 40TI	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F1472, AMS 4928, AMS 4967
	Нікелевий сплав	CL 100NB	ISO 6208 UNS N07718	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664
	Сплав Co-CR (remanium star)	CL 111 CoCr	DIN EN ISO9693/DIN EN ISO 22674	ASTM F75
EOS	AlSi10Mg	AlSi10Mg	ISO 3522	A03600
	Сплав CoCrMo, біосумісний	Cobalt Chrome MP1	ISO 5832-4, ISO 5832-12, UNS R 31538	ASTM F75 ASTM F1537
	Сплав Co-Cr	Cobalt Chrome SP1	ISO 5832-4, ISO5832-12,	ASTM F75 ASTM F1537

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5	
EOS	Мартенситно-старіюча сталь	MaragingSteel MS1	1.2709	18 % Ni Maraging300, AISI h23	
E	Nickel Alloy IN625	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	UNS N06625, AMS 5666F, AMS 5599G	Nickel Alloy IN625	
	Нікелевий сплав	NickelAlloy IN718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664	
	Нерж. сталь	St.Steel GP1	1.4542	17-4 PH	
	Нерж. сталь	St. Steel Ph2	DIN 4540	UNS S15500	
	Сплав Ti6Al4V	Titanium Ti64	ISO 5832-3	ASTM F1472	
	Сплав Ti6Al4V ELI	Titanium Ti64 ELI	ISO 5832-3, UNS R56401	ASTM F136	
3D Systems	Нерж. сталь	ST4404D	1.4404	316 L	
	Мартенситно-старіюча сталь	ST2709B	1.2709	18 % Ni Maraging300, AISI h23	
SLM Solutions	Сплав Co-Cr	ST2724G	ISO 5832-4	ASTM Grade2	
	Комерційно чистий титан	CP Titanium	ISO 5832-2 UNS R50400		
	Сплав Ti6Al4V	Ti6Al4V	ISO 5832-3	ASTM F136 ASTM F14727	
	Сплав TiAl6Nb7	TiAl6Nb7	ISO 5832-11	ASTM F1295	
	Нерж. сталь	1.4404	1.4404	AISI H13	
	Жаростійка сталь	1.2344	1.2344		
	Алюмінієві сплави		AlSi10Mg	ISO AlSi10Mg	ASTM AA 4047, ASTM A04130
			AlSi7Mg	ISO AlSi7Mg	A03600
			AlSi9Cu3	ISO AlSi9Cu3	ASTM A13560
			AlMg4,5Mn0,4	ISO 5182	
	Сплав Co-Cr	Co212-f	UNS N06625, DIN NiCr22Mo9Nb	ASTM F75	
Нікелевий сплав	Inconel 625	UNS N06625, AMS 5666F			

Продовження таблиці 1.2

1	2	3	4	5
SLM Solutions	Нікелевий сплав	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	AMS 5662, AMS 5664
R	Мартенситно-старіюча сталь	Tool steel h23	DIN 2803, 2709	18 % Ni Maraging 300, AISI h23
	Інконель НХ	Inconel НХ	2.4665	
	Комерційно чистий титан	CP Titanium	ISO 5832-2, UNS R50400	ASTM Grade 2
	Титановий сплав	Titanium V4	ISO 5832-3	ASTM F136, ASTM F1472
	Сплав Co-Cr	Cobalt chrome	ISO 5832-4, ISO5832-12, UNSR31538	ASTM F75, ASTM F1537
	Нерж. сталь	316L	1.4404	316L
	Нікелевий сплав	Inconel 718	ISO 6208, UNS N07718, DIN NiCr19Fe19NbMo3	UNS N07718, AMS 5662, AMS 5664

З наведених даних таблиці 1.2 видно, що більшість компаній пропонує практично ідентичний набір матеріалів для вирощування виробів, проте при цьому немає жодних гарантій того, що порошки, наприклад, EOS, можна застосовувати в машинах SLM Solutions або Realizer [72].

У різних машинах використовуються порошки різного фракційного складу.

Гранулометричний склад порошків повинен бути однорідним та забезпечуватися технологією виготовлення, яка розроблялася та удосконалювалася у цій роботі.

Характеристики порошків (фракційний склад, морфологія частинок, вміст домішок, мікроструктура тощо), отриманих різними методами, важливо контролювати, оскільки вони мають суттєвий вплив на структуру та властивості кінцевого продукту, наприклад, деталей різних механізмів. Відповідність порошків цим параметрам має принципове значення при виготовленні деталей критичних вузлів авіаційної та ракетно-космічної техніки [71-73].

Як показано у роботі [83], на пористість виробу спочатку впливає фракційний склад порошку титану. При цьому з підвищенням дисперсності порошку ступінь ущільнення зменшується, що задовільно пояснюється збільшенням величини внутрішнього тертя між частинками порошку і тертям зовнішнім з поверхнею пресування і матриці пресформи. Також у даному дослідженні показано, що на здатність до формування порошоків титану впливає тиск пресування та його дисперсність [72, 83].

Загальноприйнятим є той факт, що чим більше частинок одного діаметра в партії порошку, тим краща якість металопорошкових композицій, що отримуються з нього. Ось чому порошки після виготовлення додатково сортують за розмірами частинок. Одним із параметрів, що характеризують порошок, є величина d_{50} – середній діаметр частинок. Наприклад, якщо D_{50} дорівнює 40 мкм, це означає, що 50 % частинок порошку розмір частинок менше або дорівнює 40 мкм [84].

Класифікація порошоків за розмірами частинок та методами їх одержання у широкому діапазоні розмірів наведена на рисунках 1.13 та 1.14. У роботі [84] дослідним шляхом встановлено, що найчастіше розміри сукупності частинок, що вийшли, розподіляються за логарифмічним законом. Цей розподіл залежить від двох параметрів: середнього розміру частинок у всьому об'ємі – d_{50} і стандартного відхилення – σ , яке дорівнює 1.0 у разі частинок однакового розміру і зростає до значення 2,3 для порошоків, отриманих, наприклад, газовим розпиленням. Значення стандартного відхилення може бути розраховане як відношення d_{84}/d_{50} та d_{50}/d_{16} .

Станом на сьогодні розроблені спеціальні програми для подібного статистичного аналізу у виробництві: такий підхід є вигідним з економічної точки зору [85-87]. З типового розподілу за розмірами сумарної кількості порошкового продукту логарифмічних координатах можна зробити висновок, що середній розмір одержуваних частинок масової медіані (d_{50}) в даному випадку дорівнює 60 мкм. Вагова медіана дає уявлення про вміст часток різних розмірів порошку у відсотках, розподіл розмірів частинок якого встановлено [87].

Так, значення параметра, розподілу порошоків частинок для даного процесу знаходиться в інтервалі від 1,3 до 1,5, також процес може безперервно відбуватися в

атмосфері інертного газу, або у вакуумі. Кількість оксидів в одержуваних порошках невеликий і сумарний вміст кисню в порошках є низьким. Крім того, частинки порошку виходять формою близькими до сферичної (більше 98 % частинок одержуваного порошку – сфери). З недоліків [83, 86, 90] можна виділити громіздкість обладнання відцентрового розпилення, оскільки для затвердіння крапель розплаву, що розпилюється, потрібен великий простір робочої камери.

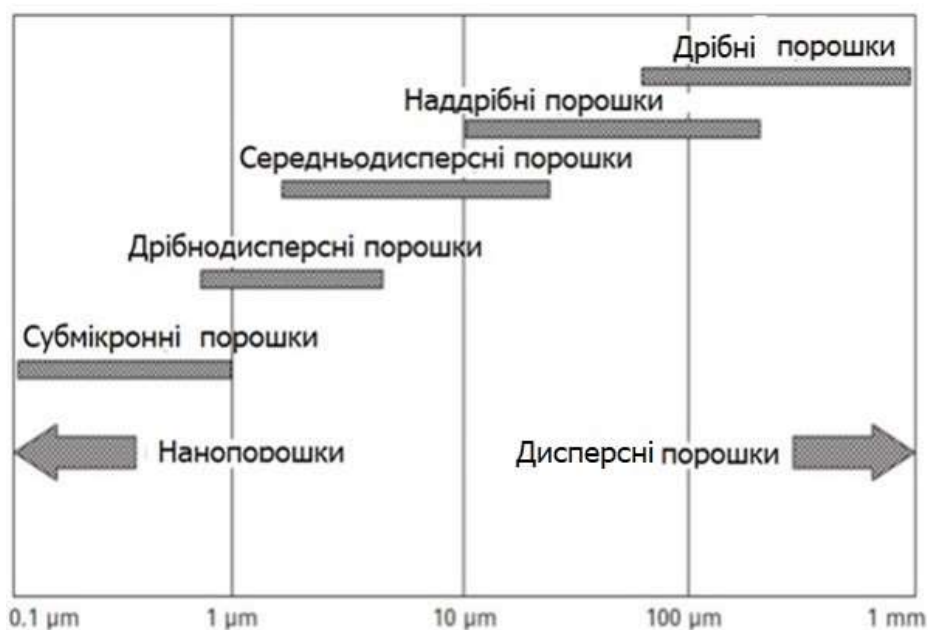


Рисунок 1.13 – Класифікація порошків за розмірами їх частинок [79]

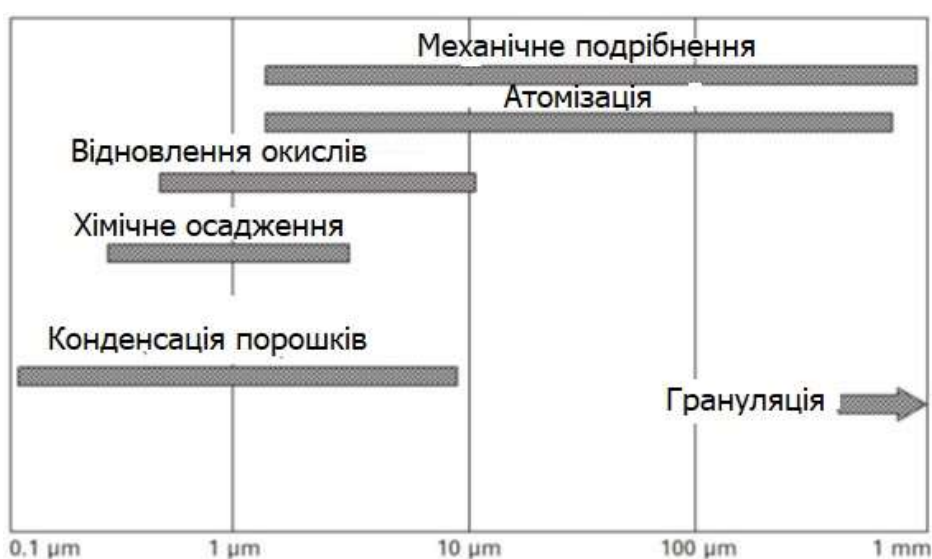
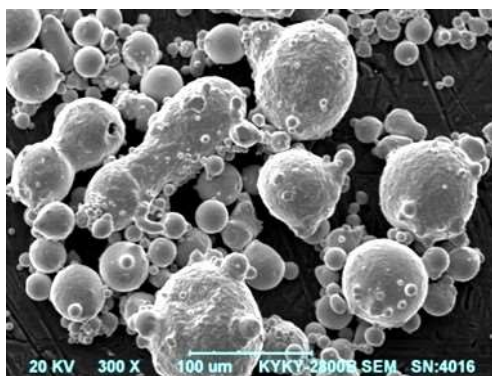


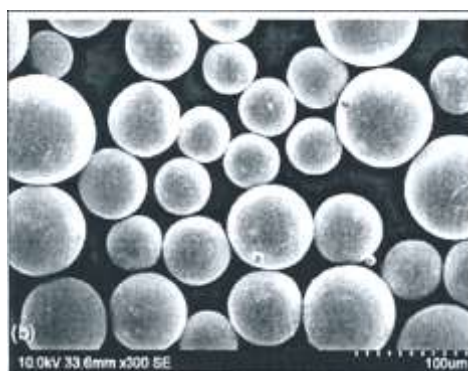
Рисунок 1.14 – Класифікація методів одержання порошків різного розміру [79]

Порівняльне дослідження впливу найбільш поширених способів отримання порошків титанового сплаву Ti-6Al-4V на характеристики структур, отриманих за допомогою адитивних методів спрямованої лазерної наплавки (LDMD), проведено авторами роботи [91]. Дані порошки отримували двома різними методами: газового розпилення (Gas Atomization, GA) і плавлення плазмою електрода, що обертається (PREP) [22, 23, 83].

Морфологія GA і PREP порошків, представлена на рисунку 1.15, типова для даних методів. Порошок GA характеризується не дуже гладкою поверхнею з дрібними частинками-сателітами та видимими порами; PREP порошок має сферичну форму без сателітів та явних ознак пористості (дані наведено в таблиці 1.3). Дослідження порошкових зразків за допомогою скануючої електронної мікроскопії та дифракційного аналізу показали, що порошок, отриманий методом газової атомізації, має більший середній розмір частинок, ніж порошок, виготовлений технологією PREP (95 мкм та 70 мкм, відповідно). Крім того, авторами досліджень [22, 23, 92] зазначено, що при використанні порошків PREP реалізується більш висока швидкість наплавлення, наплавлені шари мають меншу пористість та менш грубу поверхню. Також у методі PREP кристалізація розплаву відбувається з високою швидкістю (104...106 °C / с), що дозволяє запобігти утворенню в структурі порошків раковин, сегрегацій, пор і грубих скупчень фаз [72, 83].



а



б

а – GA; б – PREP

Рисунок 1.15 – SEM фотографії порошку Ti-6Al-4V сплаву, виготовленого за різними методами [92]

Таблиця 1.3 – Характеристики пористості порошків, виготовлених за технологіями GA та PREP зі сплаву Ti-6Al-4V, отриманих за допомогою мікротомографії [93]

Зразок	Об'єм порошку, мм ³	Об'єм пор, мм ³	Пористість, %
GA	3,877	0,002117	5
PREP	2,329	0,000399	7

З таблиці 1.3 видно, що в PREP порошках внутрішня пористість все ж таки є, однак об'ємна частка пор у них майже на порядок величини менше, ніж у порошках, виготовлених за технологією газової атомізації.

Результати огляду технологічних методів виробництва металевих порошків показали потенційну перевагу порошків, отриманих методом плазмового ротаційного розпилення (PREP) для адитивних технологій. Переваги PREP технології неодноразово підтвердили її спроможність до виготовлення високоякісних сферичних порошків із жароміцних і титанових сплавів для використання в авіаційній і в ракетній техніці [94-96].

Як зазначалось вище, загальною вимогою до порошків для 3D-принтерів є сферична форма частинок. Це пов'язане з тим, що такі частинки компактніше укладаються в певний об'єм і мають високу текучість в системах подачі матеріалу з мінімальним опором. При цьому діаметр частинок порошку не повинен перевищувати 100 мкм. Такий розмір частинок порошку обумовлений не тільки кращою компактністю та формуванням менш шорсткої поверхні готової деталі, але і меншими розмірами дефектів, що потенційно можуть утворитися.

Так, в роботах [97-99] досліджено особливості розвитку тріщин у гранульних нікелевих сплавах, виявлені закономірності підтвердили доцільність використання гранул менше 70...100 мкм для зниження розміру можливих дефектів – місця концентрації напружень в деталі, що особливо критично для втомної міцності дисків із жароміцних нікелевих сплавів. У роботах авторів [100-102] також аргументовано показана необхідність зменшення розмірів частинок порошку, що застосовуються для високонавантажених деталей: чим крупніше гранула, тим більшим є неметалева

включення, яке може в частинці утримуватися.

Разом із порошком неметалеві частинки потрапляють у компакту заготовку і це негативно впливає на властивості матеріалу. Чим крупніше неметалева включення, тим вище ймовірність руйнування деталі, нижче ресурс, надійність та експлуатаційні характеристики. Рекомендовано зменшення гранул порошоків до наступних розмірів:

- до 100 мкм – для жароміцних сплавів на основі нікелю;
- до 250 мкм – для сплавів на основі титану.

Крім цього, у роботі [103] показано, що порошки високолегованих тугоплавкими елементами жароміцних нікелевих сплавів нового покоління мають хімічний однорідний склад в інтервалі розмірів 40...100 мкм. Частинки порошку більшого розміру мають неоднорідність хімічного складу, яка не дозволяє отримати деталь необхідної якості. Рівномірність розподілу легувальних елементів у частинках порошоків із високолегованих нікелевих та титанових сплавів визначає якість металу виробів з них, тому в них не допускаються неметалеві включення та інші сегрегації.

Таким чином, до порошоків адитивного призначення можна сформувавши наступні вимоги [78 - 80]:

- особлива чистота за вмістом неметалевих та газових домішок;
- сферична форма частинок;
- діаметр сферичних частинок менше 40...100 мкм;
- безпориста структура;
- відсутність частинок-сателітів;
- відповідність фракційного складу вимогам замовника.

Для відповідності металевому порошку адитивного призначення зазначеним вимогам необхідно створити або модернізувати наявне обладнання та технології промислового виробництва порошоків розміром до 100 мкм з метою суттєвого зниження розміру та кількості неметалевих включень у частинках порошку.

З метою забезпечення рівномірного хімічного складу, частинок порошку, особливо для складнолегованих інтерметалідних сплавів на основі нікелю та титану,

також потрібно проводити удосконалення обладнання для розпилення порошків.

1.3 Огляд технологічного обладнання для виробництва сферичних порошків та вибір оптимального для подальшої модернізації з урахуванням вимог адитивних технологій

Зростаючі вимоги до якості порошків для адитивних технологій роблять актуальною проблему вдосконалення та модернізації обладнання для їх виробництва та технологічних процесів, що здійснюються на ньому. Як було показано в п.1.1-1.2, виробництво сферичних порошків методами диспергування розплаву найбільше підходить для адитивних технологій, що застосовуються в промисловості (в авіабудуванні, для атомних енергетичних установок, військової техніки, медицини). Основними елементами технологічного ланцюга виготовлення порошків диспергуванням розплаву є наступні етапи [78-80]:

- розпилення рідкого сплаву (металу) або його диспергування;
- розсівання порошку;
- сепарація та очищення від металевих та неметалічних включень;
- дегазація, засипка та їх герметизація в капсули для зберігання.

Розпилення рідкого металу (диспергування) може здійснюватися за різними технологічними схемами, що зумовило різноманітність методів (газова атомізація, розпилення електрода з його індукційним розплавленням, вакуумна атомізація, плазмове ротаційне диспергування тощо) і використаного для цього обладнання. Схеми зазначених процесів вже описані у п. 1.2 роботи. Розглянемо ці процеси з погляду використаного устаткування, з'ясування основних їх переваг і недоліків. Так, у технології газового розпилення металу, розплавленого у вакуумній камері, методом індукційного нагріву застосовують керамічні або графітові тиглі, розплавлений метал зливають у спеціальний приймач, до якого підводять інертний газ під тиском. Однак плавлення реактивних металів (Ti, Zr, Hf і т. д.) у керамічних

тиглях ускладнене навіть в умовах вакууму, що унеможливило диспергування титанових сплавів для авіабудування [94-96]. Крім того, у першій та заключній фазах газової атомізації порошок виходить некондиційним. Для якісного розпилення має бути витримане певне співвідношення між витратою металу та витратою газу. Наприклад, мінімальна витрата металу для встановлення газової атомізації компанії «ALD» (Німеччина) «VIGA» становить приблизно 8 кг/хв, при цьому вихід кондиційного порошку невеликий. Устаткування для газової атомізації досить громіздке – площа, яку займає установка «VIGA», становить 16 м² [104]. Аналогічне обладнання ще в 70-ті роки минулого століття створено на Запорізькому науково-дослідному підприємстві «УкрНДІСпецсталь». Однак технічні можливості цього обладнання дозволяли виробляти порошки з великим розміром фракцій 100...160 мкм. Машини газової атомізації фірми «PSI» призначаються для мало- та середньосерійного виробництва металевих заготовок і порошків, мають як спеціальну опцію можливість атомізації титанових сплавів, але реалізація такої опції вимагає встановлення додаткового обладнання, яке суттєво збільшує габарити та вартість системи [104].

Диспергування електрода, що обертається, з індукційним нагріванням його в кільцевому індукторі є різновидом газової атомізації і застосовується, в тому числі, і для титанових сплавів. Устаткування такого типу, назване за назвою процесу «EIGA», виробляється фірмою «ALD» (Німеччина) [105, 106]. Краплі металу капають з електрода в систему форсунок і розпилюються у струмені аргону. Установки такого типу мають невисоку швидкість розпилювання – близько 0,5 кг за секунду, що впливає на продуктивність та вихід кондиційного порошку. Газове розпилення може привносити в структуру частинок порошку пори та раковини, на поверхні більших частинок порошку часто налипають дрібніші фракції, утворюючи сателіти.

Вакуумна атомізація передбачає попереднє розплавлення в окремій камері, куди потім подається під великим тиском інертний газ і розчиняється в розплаві, що вже є вибухонебезпечним процесом. Загальною вимогою до машин, що працюють з пірофорними матеріалами, такими як алюміній і титан, є наявність протипожежної

системи та системи попередження про спалах. Працюючи з дрібнодисперсними порошками (особливо при $d_{50} < 10$ мкм) підвищується їх летючість і небезпека займання збільшується. До цього слід додати необхідність проведення плавки в окремій камері, а умови для виплавки різних металів і сплавів можуть істотно відрізнятись (різні тиглі, температури, в'язкість розплаву, різна сила струму), необхідність ретельного очищення настилів тиглів, оскільки існує можливість попадання попереднього металу або хімічних сполук [105].

Аналіз різних технологій диспергування та якості одержуваних порошків [107-109] показав, що метод PREP дозволяє отримати порошки з мінімальною кількістю включень, практичною відсутністю внутрішньої газової пористості та адсорбованих на їх поверхні газів, що забезпечить стабільність властивостей та високу надійність деталей.

Тому в даній роботі за основу для подальших розробок обладнання та вдосконалення технології виготовлення порошків вибрано метод плазмового ротаційного розпилення. Для отримання сферичних порошків сплавів методом плазмового ротаційного розпилення розроблено сімейство спеціалізованого технологічного обладнання УЦР (виробник – ВАТ «Електромеханіка»). Головною перевагою такої установки є виключення контакту розплаву з тиглем і розливними пристроями [22, 23].

Установка «УЦР-4», яка стала базовою для модернізації в даній роботі, складається з наступних основних вузлів (рисунок 1.16):

- 1 – вакуумної системи (вакуумного насоса, патрубків та секцій установки);
- 2 – вузла подачі електродів;
- 3 – системи циркуляції газової суміші в зоні розпилення (для плавлення електрода, що обертається, використовується плазма - газова суміш (гелій + аргон);
- 4 – камера розпилення складається з водоохолоджуваного корпусу з герметично кришкою, що закривається, діаметром 2,4 м.

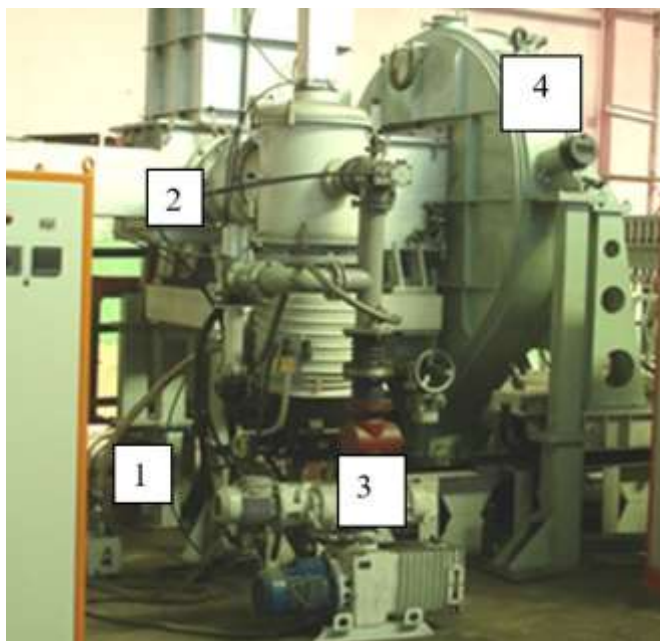


Рисунок 1.16 – Технологічне обладнання типу «УЦР» для виробництва металевих сферичних порошків [21]

До недоліків існуючого обладнання «УЦР-4» слід віднести:

- низький відсотковий вміст дрібних гранул (менше 200 мкм) внаслідок невисокої швидкості обертання заготовки;
- відсутність системи охолодження частинок інертними газами, рециркуляції та очищення газової суміші та ряд інших.

Установка відцентрового розпилення типу УЦР є ключовою у забезпеченні високої якості порошків, що розпилюються, однак, в існуючому виконанні вимагає доопрацювання та модернізації для відповідності вимогам адитивних технологій. Необхідно створити обладнання «УЦР» нового покоління для одержання дрібних порошків із високим виходом придатної фракції менше 100 мкм. Зменшення розміру порошку в процесі їх одержання методом розпилення можливе за рахунок збільшення частоти обертання заготовки, що розпилюється, і відділення великих фракцій при розсві порошку [110-112].

Крім того, розробка технологічного обладнання нового покоління дозволить витіснити порошки зарубіжного виробництва, що закуповуються вітчизняними підприємствами, які впроваджують адитивні технології. Можна зробити висновок, що метод ротаційного плазмового розпилення перспективний для виробництва

сферичних порошків і обладнання типу «УЦР» підходить для їх виробництва. Однак для повної відповідності порошків вимогам адитивних технологій необхідне доопрацювання установки УЦР-4 застарілої моделі та розробка технологій диспергування на вдосконаленому обладнанні для різних сплавів індивідуально. Також для цього знадобиться встановлення закономірностей між технологічними параметрами та характеристиками порошку (діаметр частинок, вміст в порошках фракцій заданого розміру, вміст домішок у хімічному складі матеріалу порошку тощо).

Зменшення розмірів фракції порошку позитивно впливає на 3D-друк і сприяє зменшенню розміру ймовірного неметалічного включення і зменшує його негативну дію як концентратора напружень. Однак дрібніший порошок має і свої негативні наслідки – значно збільшується питома поверхня його частинок, внаслідок чого може підвищуватися вміст кисню, особливо на поверхні частинок, що збільшує протяжність спадкових меж порошків у структурі компактного металу та впливає на його властивості. Властивості одержуваного нікелевого порошкового матеріалу сильно залежать від вмісту кисню, тому необхідно провести дослідження еволюції вмісту кисню на етапах технологічного циклу: від прутка-електрода, що витрачається, до порошків для різних фракційних складів. У процесі виготовлення порошків методом відцентрового розпилення вирішується найважче завдання – не привнести додатковий кисень у процесі розпилення та утримати його на рівні вихідного дроту. Тому контроль атмосфери у процесі розпилення при отриманні порошків – один із найважливіших параметрів. При отриманні дрібнодисперсних порошків (менше 100 мкм) вимоги щодо чистоти інертної атмосфери в процесі розпилення на вміст кисню та водяної пари повинні бути жорсткішими до рівня його вмісту менше 4 ppm. Тому обробку і зберігання порошків слід вести в атмосфері надчистих інертних газів. Технологічні рішення, що дозволили звести до мінімуму вміст шкідливих домішок в інертній атмосфері під час ротаційного розпилення розроблені в дослідницькому розділі цієї роботи.

Таким чином, у цій роботі здійснено комплексний підхід, що поєднує модернізацію наявного обладнання та вдосконалення технології, для максимально

можливого підвищення якості продукції вихідних порошків та кінцевого продукту – деталей із них.

1.4 Постановка мети та завдань роботи

Аналіз літературних даних дозволив зробити висновок, що, незважаючи на всі переваги та переваги, які надає використання 3D-друку, залишається низка проблем, які стримують поширення цієї технології у промислових масштабах. Ключовою є висока вартість вихідної сировини – сферичного порошку зарубіжного виробництва та відсутність вітчизняних марок серед пропонованої продукції. Особливо це актуально при використанні порошків титанових і нікелевих жароміцних сплавів, де основну роль у ціноутворенні відіграє не так вартість легувальних елементів, а скільки самої технології отримання порошків (500-700 доларів за кілограм). Як показав огляд публікацій, найбільш продуктивною серед різноманітних методів виробництва сферичних порошків, що відповідають вимогам адитивної технології, є ротаційне плазмове розпилення. Проте для організації вітчизняного виробництва порошків необхідна глибока модернізація існуючого устаткування – установки сімейства УЦР, яку можна використовувати реалізації цього методу. Також необхідне відпрацювання технологічних режимів процесу одержання порошків з різних сплавів та самої технології 3D-друку різних деталей авіадвигунів, енергетичних установок, військової техніки. Це сприятиме поширенню адитивних технологій у стратегічних галузях промисловості нашої країни.

У цілому аналіз даних літературних джерел дозволяє сформулювати основну **мету роботи**, яка полягає в розробці технології отримання сферичних порошків з нікелевих та титанових сплавів, які застосовуються для адитивного вирощування деталей відповідального призначення, для підвищення їх якості та забезпечення необхідного рівня механічних властивостей. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі **завдання**:

- удосконалення технологічного обладнання для розпилення заготовок (витратних електродів);
- встановлення закономірностей впливу технологічних режимів дослідного обладнання на характеристики порошків;
- отримання оптимальних характеристик порошкових матеріалів для різних процесів адитивного вирощування деталей (лазерне сплавлення на 3D-принтері та мікроплазмове наплавлення електронним променем);
- заміна існуючих високовартісних імпорتنих порошкових матеріалів на вітчизняні аналоги;
- розробка технологій адитивного виготовлення різних деталей авіадвигунів та впровадження нових технологій у серійне виробництво.

1.4 Висновки до розділу 1

З результатів проведеного аналізу літературних джерел можна зробити наступні висновки:

1. На основі аналізу світових досягнень розвитку адитивних технологій визначені пріоритетні напрямки для сучасних умов вітчизняного виробництва.
2. Сформульовані основні вимоги до порошків адитивного призначення: сферична форма, розмір частинок металевих порошків до 100 мкм, відсутність частинок-сателітів та газонасиченого шару на їх поверхні, відсутність неметалевих включень. При отриманні таких порошків зростають вимоги щодо чистоти інертної атмосфери в процесі розпилення: вміст кисню та водяної пари повинні бути менше 4 ppm.
3. Виконано порівняльний аналіз різних технологій та обладнання, що застосовується для виготовлення дисперсних металевих порошків сферичної форми.
4. Обґрунтована доцільність модернізації обладнання ротаційного плазмового розпилення порошків, призначених для адитивного виробництва деталей

авіадвигунів.

РОЗДІЛ 2. МАТЕРІАЛИ ТА МЕТОДИКИ ДОСЛІДЖЕНЬ

2.1 Обґрунтування методології досліджень

Як показано в розділі 1, для вітчизняного виробництва сферичних порошків різних сплавів перспективною є технологія відцентрового розпилення, для чого необхідна модернізація обладнання сімейства «УЦР». У цій роботі за основу для доопрацювання та технічних змін обране обладнання УЦР-4 з наступними технічними характеристиками: діаметр одержуваних порошків ≥ 120 мкм; розмір заготовки, що розпилюється становить: $\varnothing 50$ мм, довжина 700 мм; частота обертання до 23 000 хв⁻¹; потужність плавлення до 100 кВт; продуктивність – до 100 кг/годину; вихід придатного до 92 %.

До недоліків існуючого обладнання типу «УЦР» можна віднести: низький процентний вміст дрібних гранул (менше 200 мкм) внаслідок невисокої швидкості обертання заготовки; відсутність подачі газової суміші в область плавлення електрода для завдання сприятливих умов кристалізації та охолодження частинок у польоті, охолодження та очищення газової суміші та ряд інших. Ось чому серед головних напрямів удосконалення технології виробництва порошків металевих сплавів методом PREP насамперед необхідно створити обладнання «УЦР» нового покоління для одержання дрібних порошків із високим виходом придатної фракції менше 100 мкм. Питання модернізації даного обладнання висвітлено у дослідному розділі цієї роботи. У зв'язку з високими вимогами до надійності деталей із порошків високолегованих нікелевих та титанових сплавів для авіаційних двигунів найважливіше значення при їх виготовленні має контроль якості. Для забезпечення високої якості порошків необхідно здійснювати контроль якості вихідної металопродукції та готових порошків, що передбачає перевірку відповідності хімічного складу. Для сортування порошку за розмірами, кількісною оцінкою діаметра порошку та статистичної обробки даних, для визначення його насипної щільності, плинності та інших параметрів створено технічні умови, в яких обумовлено всі вимоги. Додатково проводилися мікроструктурні дослідження стану

поверхні частинок порошку та готових виробів, консолідованих їх адитивними технологіями. Для підтвердження відповідності якості металу досліджено мікроструктуру матеріалу частинок порошків та виробів з них, його мікротвердість, визначено розподіл легуючих елементів у частках порошку порівняно з їх розподілом у вихідному прутку, для чого проведено дослідження із застосуванням електронного мікроскопа з приставкою для рентгеноспектрального аналізу. Рівень механічних властивостей матеріалу дослідних виробів відіграє вирішальну роль у прийнятті нової технології виробництва деталей у серійне виробництво, є ключовим критерієм для конструкторських розрахунків. Механічні властивості визначалися за нормальної та підвищеної температури за стандартними методиками на зразках, вирізаних з дослідних деталей та заготовок, виготовлених технологіями 3D-друку та мікроплазмового сплавлення порошку. Для прогнозування мікроструктурних станів в деталях, виготовлених із порошків, досліджували їх мікроструктуру методами світлової оптичної мікроскопії та електронного мікроскопа. Для забезпечення стабільного виробництва сферичних порошків адитивного призначення важливу роль відіграє контроль якості.

Актуальним завданням є вивчення, моделювання та оптимізація технологічних операцій на всіх етапах отримання готового виробу. Це дозволить сформулювати рекомендації щодо відпрацювання повного технологічного циклу виготовлення у кожному конкретному випадку.

Для гарантованої якості сферичних порошків досліджених сплавів автором цієї роботи створено технічні умови (додатки К, Л), у яких обумовлено всі необхідні методи контролю на стадії виробництва порошків.

В експериментах досліджували вплив наступних параметрів і характеристик на діаметр порошку: швидкість обертання електрода, що розпилюється (прутка), впливу співвідношення плазмоутворюючої газової суміші, що застосовується в даному процесі.

Для досягнення поставлених завдань розроблено комплекс науково-технічних заходів, що розкриває суть методики проведених досліджень та контролю якості продукції (рисунок 2.1).

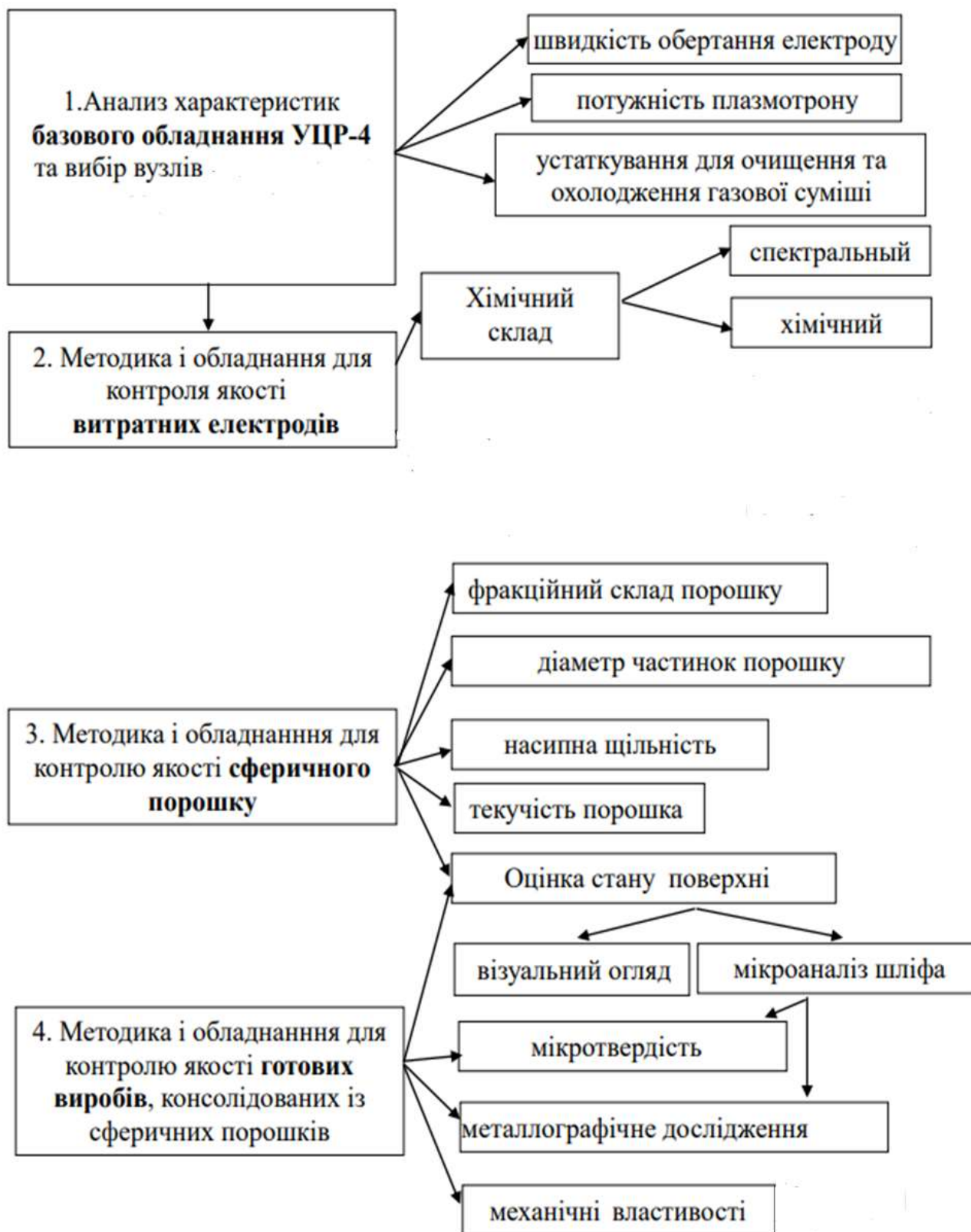


Рисунок 2.1 – Структурно-логічна схема досліджень модернізації обладнання та розробки технології одержання металевих сферичних порошоків

Визначали вплив технологічних параметрів (швидкість обертання витратного електроду, вміст гелію в плазмоутворюючій газовій суміші) на розміри частинок порошку. Для сферичних порошоків адитивного призначення насипна щільність повинна бути в межах $2,0 \text{ г/см}^2$ до $2,6 \text{ г/см}^2$.

Текучість порошку залежить від ступеня сфероїдизації частинок порошку і є здатковим параметром при виготовленні металевого порошку, оскільки сферична форма порошку забезпечує мінімальний опір у системі подачі матеріалу в 3D-принтерах.

Для визначення вольт-амперних характеристик плазмотрона (величини діючої напруги та сили струму) провели дослідні процеси відцентрового розпилення, що відображено у дослідницькому розділі цієї роботи.

2.2 Визначення хімічного складу

У даній роботі для виготовлення сферичних порошоків і виробів з них застосовували жароміцні нікелеві сплави ВЖ98, Inconel 718 та розповсюджений титановий сплав Ti-6Al-4V (таблиця 2.1).

Вибір зазначених сплавів обумовлений їх широким застосуванням для виготовлення корпусних деталей турбінної частини авіадвигунів, які найчастіше мають складну конфігурацію і довгий технологічний ланцюжок виготовлення від масивного штампування-поковки до ажурної зварної деталі. Тому ці деталі перспективні для виготовлення із застосуванням сферичних порошоків із сплавів Ti-6Al-4V, ВЖ98, Inconel 718 для 3D-друку.

Хімічний склад визначали спектральним методом з використанням приладу "SPECTROMAX" фірми "SPECTRO". Сутність спектрального аналізу заснована на визначенні інтенсивностей спектра, що збуджується, від кожного хімічного елемента, який прямо пропорційний його ваговій частці в сплаві.

Таблиця 2.1 – Хімічний склад сплавів для виготовлення сферичних порошків

Марка сплаву	Вміст елементів, ваг. %								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Ti	V	Al	Nb
Ti-6Al-4V	≤0,1	≤0,1	-	-	-	основа	3,5-5,3	5,3-6,8	-
ВЖ98	≤0,1	≤0,80	≤0,5	23,5-26,5	основа	0,3-0,7	-	≤0,5	-
Inconel 718	≤0,1	≤0,30	≤0,6	14,0-16,0	43,0-47,0	1,9-2,4	-	0,9 - 2,4	0,8-1,5

Вміст домішок (азоту, кисню) у частинках порошку нікелевих сплавів та виробів з них визначали за допомогою газоаналізатора моделі ON900 фірми «ELTRA», з консолідованих заготовок виготовлені спеціальні циліндричні зразки діаметром 5 мм довжиною 3,5 мм. Принцип визначення газових домішок полягає в спалюванні зазначених зразків (або порції порошку такої ж ваги, як зразок) і визначенні вмісту газоподібних хімічних елементів, що виділилися.

У структурних складових вміст елементів визначали якісним та кількісним методами. Розподіл вмісту елементів визначали на багатоцільовому растровому мікроскопі JSM-6360LA з приставкою для рентгеноспектрального енергодисперсійного аналізу JED 2200. Роботу здійснювали при прискорювальній напрузі 15 кВ та діаметрі електронного зонда близько 4 нм, при цьому діаметр зони збудження рентгенівського випромінювання становив приблизно 1 мкм.

2.3 Фракційний склад та інші характеристики порошку

Фракційний склад гранул із досліджених сплавів визначений методом розсіву на ситах з розміром комірок (40, 100, 125, 160, 200 та 250) мкм (сухий ситовий аналіз) [113, 114]. Використаний ситовий аналізатор представлений рисунку 2.2.

Однак найбільш повну інформацію про розміри частинок порошку відображає інтегральна крива розподілу, при побудові якої враховується розмір кожної частинки

досліджуваної проби. Чим ширший фракційний склад порошку, тим більш значущим стає використання інтегральних кривих, так як при ситовому аналізі визначаються не розміри гранул, а досить широкі інтервали їх розподілу.



а



б

Рисунок 2.2 – Ситовий аналізатор для розсіву на фракції (а) та вібросито (б)

Мікроаналіз порошку на шліфах, виготовлених у перерізі порошоків. Порошки для мікроаналізу заливали в епоксидні смоли із застосуванням автоматичного запресувального апарату «SIMPLIMET 2000» з подальшим шліфуванням і поліруванням. При мікроаналізі розмір частинок визначили за площею поперечного перерізу із застосуванням програмного забезпечення «Image» і описували через гістограми розподілу розмірів, що дозволяло визначити яких частинок більше в даній партії. Полідисперсність порошку (ступінь неоднорідності) визначали як відношення стандартного відхилення до середнього розміру домінуючих частинок.

Сферичність порошку є визначальним параметром застосування в адитивних технологіях і при дослідженні визначалася шляхом мікроскопічного огляду із застосуванням стереоскопічного бінокулярного мікроскопа. Отримані у мікроскопі зображення частинок оброблялися із застосуванням програмного забезпечення «Image Score ColorM», яке дозволяло визначити діаметр частинок.

Текучість та насипна щільність – важливі характеристики порошоків, які тісно пов'язані зі сферичністю частинок. Насипна щільність показує, наскільки щільно

порошок може бути упакований у заданому обсязі, і вона залежить від форми частинок та їх здатності вільно переміщатися. Сферичні частинки зазвичай мають кращу текучість і більш високу насипну щільність, ніж частинки неправильної форми, так як вони можуть щільніше упаковуватися. Насипна щільність – це маса порошку, що припадає на одиницю об'єму, включаючи порожнечі між частинками.

Текучість порошку безпосередньо впливає на рівномірність розтікання порошку в процесі 3D-друку та на стабільність процесу подачі порошку. Текучість пов'язана з морфологією порошку, розподілом частинок за розмірами та об'ємною щільністю. Текучість порошоків – це здатність порошку переміщатися під дією сили тяжіння чи інших зовнішніх впливів. Сферичні частинки порошку зазвичай мають високу текучість, тому що вони легше скочуються один до одного, ніж частинки з неправильною формою.

Вища насипна щільність може вказувати на кращу текучість порошку [113]. Насипна щільність є технологічним показником та визначалася за ISO 3923-1:2008 із застосуванням лійки.

Текучість визначали за допомогою каліброваної лійки (прилад Холла) у відповідність до ASTM B213, суть якого полягала у визначенні швидкості потоку металевого порошку, що проходить через вирву витратоміра Холла.

2.4 Дослідження структури

При виготовленні порошоків разом із фракційним складом важливо контролювати і мікроструктуру його частинок: дисперсність структурних складових, рівномірність їх розподілу, відсутність сторонніх включень та пор.

Першим етапом усіх металографічних досліджень є виготовлення шліфів, що використовуються для мікроскопічного дослідження за допомогою світлового та електронного мікроскопів [115, 116].

Виготовлення та підготовка металографічних шліфів із дослідних порошоків

жароміцних нікелевих та титанових сплавів складалась з наступних операцій:

- заливання частинок порошку епоксидною смолою;
- шліфування поверхні;
- полірування.

Для металографічного дослідження структури порошки заливали в епоксидні смоли із застосуванням автоматичного запресувального апарату «SIMPLIMET 2000», також вирізалися зразки із заготовок після 3D-друку. Металографічні зразки зазнавали послідовного шліфування із застосуванням паперу різної зернистості (від № 40 до мікронної M20) та полірування на сукні, змоченому суспензією «DiaDuo» (виробник – фірма ”STRUERS“) на основі алмазних частинок фракцією 3 мкм. Травлення шліфів порошків із жароміцних нікелевих сплавів здійснювали у реактиві Марблі, із титанового сплаву – в розчині плавикової кислоти на основі гліцерину.

Мікроструктурний аналіз шліфів проводили з використанням інвертованого мікроскопа відбитого світла "Observer.D1m" (фірма "Carl Zeiss") при збільшеннях від 100 до 1000 разів, оснащеного окуляр-мікрометром з лінійкою (при збільшенні в 500 разів 1 поділ = 2 мкм).

2.5 Електронномікроскопічні дослідження

Наукові результати, представлені в роботах, розглянутих в розділі 1, свідчать про те, що порошки високолегованих жароміцних сплавів зазвичай мають однорідний хімічний склад в інтервалі розмірів 40...100 мкм. При розмірах, що перебільшують 100 мкм, збільшується вірогідність появи ліквіційних неоднорідностей або неметалевих включень у частинках порошку. Тому важливо створювати або модернізувати обладнання та технології промислового виробництва порошку розмірами 40...100 мкм з метою запобігання неметалевим включенням, а також для забезпечення його рівномірного хімічного складу.

Для визначення розподілу елементів у частинках порошку та у матеріалі

виробів з них проводили енергодисперсійний рентгеноспектральний мікроаналіз (РСМА) на багатоцільовому електронному мікроскопі JSM-6360LA, оснащеному системою JED 2200 для проведення РСМА. Роботу виконали при прискорювальній напрузі 15 кВ та діаметрі електронного зонда близько 4 нм, при цьому діаметр зони збудження рентгенівського випромінювання становив приблизно 1 мкм. Розподіл хімічних елементів за площею визначали методом картування у вигляді кольорових карт, де більшому вмісту хімічного елемента відповідає більш інтенсивне забарвлення та аналізом елементів у лінію.

2.6 Механічні випробування

У процесі досліджень визначали мікротвердість, межу міцності і умовну межу плинності при випробуванні на розтягування, відносне подовження і звуження зразків, а також ударну в'язкість і характеристики короточасної міцності при підвищеній температурі.

Випробування на ударний вигин проводили на маятниковому копрі IMP-460J фірми «INSTRON», з номінальною потенційною енергією маятника 460 Дж. Прилад оснащений комп'ютерною системою керування та за результатами випробувань отримували графічну залежність зміни зусилля удару та енергії удару в часі. Розміри зразків з U-подібним видом концентратора напружень.

Для підтвердження рівномірності розподілу легуючих елементів у частинках порошку вимірювали їх мікротвердість. У зв'язку з пошаровою консолідацією порошку можна очікувати нерівномірність властивостей шарів отриманих виробів. Для виявлення можливої неоднорідності властивостей вимірювали мікротвердість виробів, виготовлених адитивними методами із даних порошоків в різних перерізах (вздовж і поперек).

Мікротвердість вимірювали на приладі MM7T фірми "BUEHLER" при навантаженні індентора 50 грамів впродовж 10 с. Для цього виготовляли

мікрошліфи, що піддавалися механічному поліруванню. Збільшення мікроскопа приладу при окулярі 15 становило 485 разів. На кожному шліфі ставили по три відбитки на частинках порошку з аналізованої ділянки.

Зразки для випробування на розтягування виготовляли діаметром 5 мм робочої частини та розрахункової довжиною 25 мм – рисунок 2.3. Випробування проводили на обладнанні «INSTRON-8862» при швидкості переміщення захоплень 15 мм/хв.

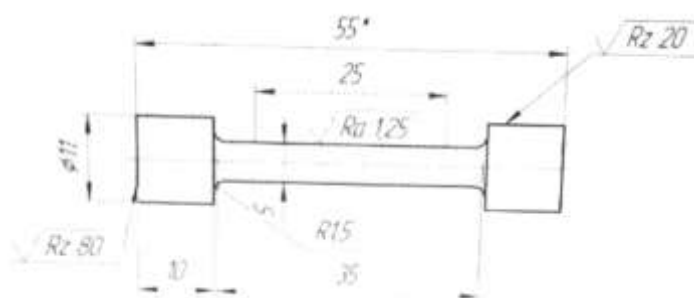


Рисунок 2.3 – Зразок для випробування на однісіне розтягування

Випробування жароміцних характеристик проводили на циліндричних зразках з діаметром робочої частини 5 мм та з початковою розрахунковою довжиною довжиною 25 мм. Установка для жароміцних випробувань представляла собою універсальну випробувальну машину «УММ-20», оснащену муфельною нагрівальною електропіччю. Контроль температури здійснювався термоелектричною термопарою типу ТХА-101М, терморегулятор – універсальний вольтметр В7-38. Зразок, встановлений у тримачах випробувальної машини та поміщений у піч, нагрівали до заданої температури та витримували задану кількість годин. Швидкість пересування захватів становила 0,18 мм/хв. Для вимірювання температури зразків на кінцях встановлені термопари. Відхилення від заданої температури будь-якої миті протягом усього часу випробування і будь-якій точці розрахункової довжини зразка не перевищували $\pm 3^{\circ}\text{C}$. Після нагрівання зразка та витримки до зразка плавно додавалося навантаження.

2.7 Статистична обробка даних

Отримані експериментальні дані опрацьовували статистично [117].

При статистичній обробці визначали такі параметри: середньоквадратичне відхилення, величину довірчого інтервалу, значимість коефіцієнтів регресії з використанням критерію Стюдента, адекватність моделей з використанням критерію Фішера, методом найменших квадратів отримували неповне квадратне рівняння.

$$S = \sqrt{\frac{\sum(x_i - \bar{x})^2}{n-1}} \quad (2.1)$$

де S – середньоквадратичне відхилення;

n – число вимірів;

\bar{x} – середнє значення показника властивостей;

x_i – значення показника, що вимірюється.

Розмір довірчого інтервалу – за формулою 2.2.

$$\Delta x = \frac{S}{\sqrt{n}} \cdot t \quad (2.2)$$

де t – критерій Стюдента при довірчій ймовірності $\alpha = 95 \%$.

При побудові математичної моделі, що описує вплив технологічних параметрів на властивості матеріалу виробів з досліджених порошків після 3D-друку, експериментальні дані обробляли статистично. Значимість коефіцієнтів регресії оцінювали з використанням критерію Стюдента з нерівності (2.3):

$$|b_i| \geq \Delta b_i = t(0.05; f_y) \frac{S_y}{\sqrt{n}} \quad (2.3)$$

$$f_y = n - 1$$

де $t(0.05; f_y)$ – 5 % – точка розподілу Стюдента зі ступенем свободи;

n – кількість дослідів.

З обробки результатів експериментальних даних методом найменших квадратів отримували рівняння виду (2.4):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + \dots + b_{123}x_{123} \quad (2.4)$$

2. 8 Висновки до розділу 2

1. Сформована структурно-логічна схема досліджень по вдосконаленню обладнання ротаційного плазмового розпилення та розробки технології одержання металевих сферичних порошоків.

2. Визначені особливості методик та матеріалів з оцінювання якості розпиленних порошоків та виробів, вирощених з них різними адитивними технологіями.

РОЗДІЛ 3. МОДЕРНІЗАЦІЯ ОБЛАДНАННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

3.1 Аналіз існуючої технології та обладнання для виявлення шляхів їх модернізації та вдосконалення

Зростаючі вимоги до якості порошків і компактних заготовок обумовлюють необхідність удосконалення та модернізації обладнання для їх виготовлення і технологічних процесів, що здійснюються за допомогою цього устаткування. Це пов'язано із сучасною тенденцією зменшення розмірів сферичних порошків до 40...100 мкм. Такі порошки характеризуються мінімальною кількістю неметалічних включень, відсутністю внутрішньої газової пористості та адсорбованих на їх поверхні газів, що забезпечує стабільність властивостей, високу надійність деталей за рахунок розробки раціональної технології виробництва та контролю. Устаткування для відцентрового розпилення типу УЦР займає важливе місце у забезпеченні високої якості сферичних порошків, що отримують в результаті розпилення.

Розвиток технологій металургії порошків, що складаються із високодисперсних гранул, в напрямку підвищення механічних властивостей при нормальній і підвищених температурах гранульованих суперсплавів, а також інтенсивний розвиток адитивного виробництва потребують отримання високоякісних сферичних порошків із різних металів та сплавів. При цьому мова йде про порошки із частинками розмірами 20-40 мкм із максимально низьким вмістом в них кисню та вологи. Ця тенденція розвитку технологій обумовила потребу в докорінній модернізації обладнання для виробництва металевих порошків.

Стосовно проблеми модернізації обладнання для ротаційного плазмового розпилення по технології PREP можливо виділити ряд ключових напрямків для реалізації нових технічних рішень:

- збільшення частоти обертання витратного електроду до 30 тис. хв⁻¹, що дозволить виготовляти порошки жароміцних сплавів на основі нікелю з

розміром частинок до 40 мкм, титанових сплавів – до 70 мкм;

- забезпечення низького вмісту кисню в порошках та відсутністю домішкових включень;

- підвищення продуктивності та виходу кондиційного порошку;

- оснащення обладнання системою автоматизації, контролю та реєстрації технологічних параметрів з метою виключення або зведення до мінімуму впливу людського фактору на технологічний процес.

Найбільша увага при проектуванні обладнання типу УЦР завжди приділялась швидкохідним механізмам, які забезпечували обертання заготовки, що розпилюється, з високою частотою. Як показав досвід, від надійності роботи механізмів обертання та способу подачі заготовки в зону розпилення суттєво залежать якісні характеристики виготовлених порошків та експлуатаційні (ресурсні) показники цього обладнання. Схема установки типу УЦР представлена на рисунку 3.1 [21-23].

Традиційно конструкція механізму обертання заготовки складається з двох паралельно встановлених привідних барабанів. В жолоб між барабанами вкладають заготовку та фіксують притискним роликком.

Привод обертання барабанів складається з електродвигуна постійного струму з поступово регульованими оборотами та редуктора – мультиплікатора з двома вихідними валами, що сполучаються з вхідними валами барабанів через муфти. Такий механізм забезпечує частоту обертання заготовки максимум до $15\ 000\ \text{хв}^{-1}$, при частоті обертання електродвигуна $3000\ \text{хв}^{-1}$.

Притискний ролик, який утримує заготовку на барабанах під час обертання, встановлений під невеликим кутом ($1,5^\circ$) до осі заготовки, що створює постійне зусилля притискнення до штовхача подавання її в зони розпилення.

Для розробки заходів щодо підвищення якості, необхідно детальне дослідження механізму утворення сферичних порошків у процесі ротаційного плазмового розпилення.

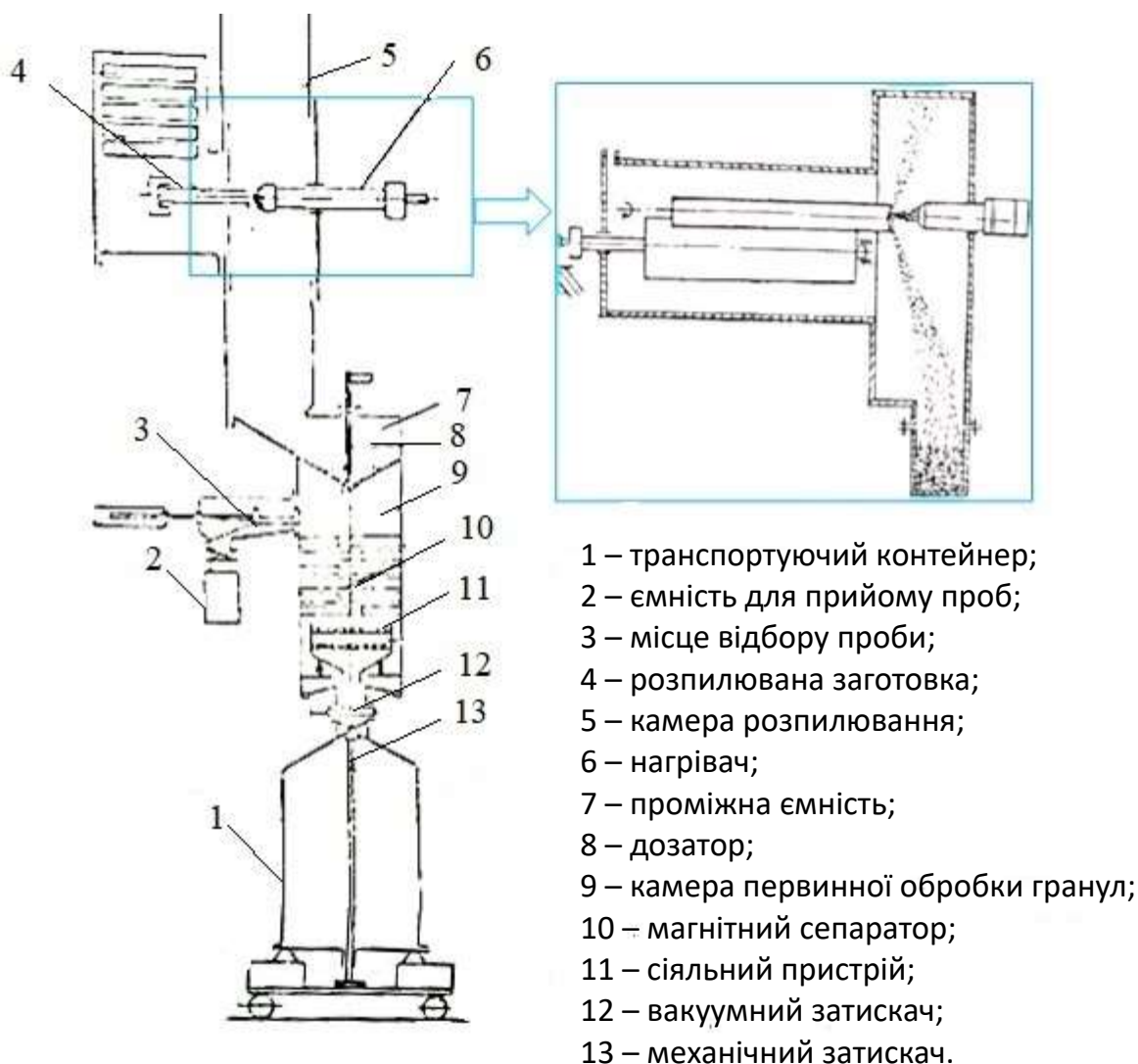


Рисунок 3.1 – Схема установки для ротаційного плазмового розпилення

Відцентрове розпилення відбувається коли заготовка-витратний електрод необхідного хімічного складу $\varnothing 50$ мм обертається з високою частотою:

- для порошків фракцією 170...200 мкм – 8 000-15 000 хв⁻¹ ;
- для більш дисперсних порошків менше (100 мкм) – до 30 000 хв⁻¹.

При цьому торцева поверхня заготовки оплавляється плазмою, і під дією відцентрових сил розплав збирається у формі «вінця» в крайовій зоні торця, потім утворюють сферичні краплі, які кристалізуються у польоті.

При дії концентрованого джерела тепла (плазмова дуга) на торець заготовки, що

швидко обертається (витратний електрод), відбувається плавлення металу і відтискання його під дією відцентрових сил до периферії витратного електроду. Плазмотрон характеризується значним тепловим потоком та високими температурами в області контакту електродугового розряду з електродом. Збільшення їх ресурса також є важливим завданням для покращення показників роботи обладнання для відцентрового розпилення порошків. Для його успішного вирішення завдання необхідна детальна інформація про робочі процеси. У міру надходження металу, коли відцентрова сила перевищить поверхневий натяг, частинка відривається від маси металу, сфероїдизується і кристалізується. При кутовій швидкості обертання (ω) та діаметрі електроду D величина відцентрової сили ($F = m \omega^2 D / 2$) визначається вагою сферичної частинки металу. Отже, відрив краплі відбудеться тільки тоді, коли вона набере масу рідкого металу і всі краплі, що відриваються, мають приблизно однакові розміри [21-23]. Таким чином, розмір частинок сферичного порошку залежить від швидкості обертання витратного електроду.

У процесі оплавлення витратної заготовки, що швидко обертається, за допомогою коаксіального плазмотрона незалежної дії, утворюється плівка рідкого металу, яка під дією відцентрових сил переміщується до периферії заготовки. Поверхневий натяг не дозволяє зірватися із заготовки плівки розплаву, який утворює в процесі розпилення вінець з розплавленого металу на периферії торця. Під впливом струменевого надходження розплаву до вінця у ньому утворюються ділянки, в яких через зростаючу масу їх відцентрова сила у певний момент перевищить силу поверхневого натягу – і буде необхідною умовою утворення дрібних крапель розплаву [22, 118]:

$$\frac{\pi d^3}{62} \rho \omega \frac{D}{2} = \sigma \pi d \quad (3.1)$$

де d – діаметр краплі, мкм;

ρ і σ – щільність (г/см³) та поверхневий натяг (Н/м) розплаву;

D , ω – діаметр (мм) і кутова швидкість обертання заготовки (хв⁻¹).

Тому за умов сталих величин ρ і σ (у формулі 3.2 це коефіцієнт K), що мають місце при розпиленні конкретного сплаву, розмір частинок порошку дорівнює розміру краплі і зворотно пропорційний швидкості обертання заготовки:

$$d = \frac{K}{\omega\sqrt{D}} \quad (3.2)$$

де D , ω – діаметр (мм) і кутова швидкість обертання заготовки (хв^{-1}).

Для нікелевих жароміцних сплавів рівняння 3.2 набуває вигляду:

$$d = \frac{15350}{\sqrt{\eta D}} \quad (3.3)$$

де η - число обертів заготовки, що розпильюється.

Очевидно, що кількість металу, що розплавляється, в одиницю часу залежить від потужності плазми щодо площі заготовки, що розпильюється. Авторами робіт [21, 22] показано, що із збільшенням потужності плазмового нагріву зростає швидкість розпилення витратного електроду (рисунок 3.2 а).

Графік показує, що зі зростанням потужності плазмової дуги від $0,5 \text{ кВт/см}^2$ до $1,0 \text{ кВт/см}^2$ кількість розплаву (швидкість розпилення) збільшується більш ніж у $1,5$ рази внаслідок зниження в'язкості розплаву у зв'язку з підвищенням температури та більш швидким переміщенням його до вінця, де розплав диспергується в краплі. При недостатньому розмірі камери розпилення краплі настільки перегріті, що не встигають кристалізуватися і замість порошку утворюють шар розплавленого металу на стінках камери, який потім залишається у вигляді наростів з розпиленого металу прутка.

Розглянемо два можливих механізми утворення порошків при відцентровому розпиленні, які залежать від технологічних параметрів процесу (частоти обертання, потужності нагріву витратної заготовки). Краплинний, коли розплавленого металу утворюється стільки, скільки відцентрові сили здатні відірвати від вінця по краплях.

У разі перевищення цієї кількості розплавленого металу розпилення може піти

іншим механізмом – струминним, коли частинки порошку заданого розміру вузького фракційного складу отримати неможливо. Однак ці дослідження проведені на досить помірних швидкостях обертання заготовок, що розпиляються (від 8 000 хв^{-1} до 10 000 хв^{-1}) і графік залежності швидкості розпилення (витрати розплаву) від швидкості обертання заготовки (рисунок 3.2 б) показує, що при перевищенні певного значення швидкості розпилення зменшується, а розміри частинок порошку значно зменшуються, продуктивність установки цього виду розпилення значно зростає.

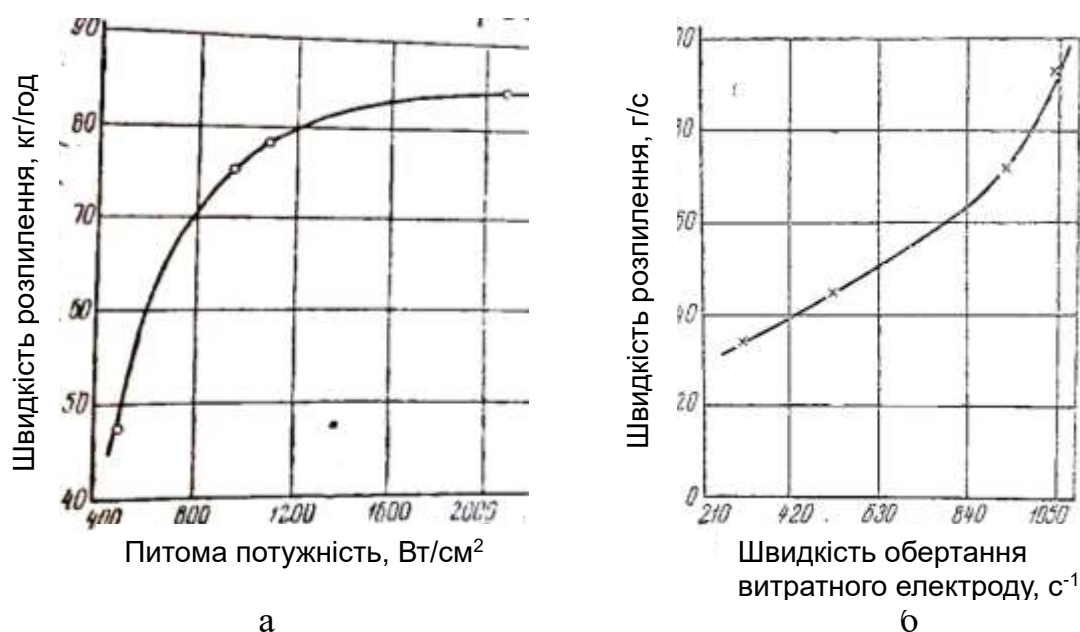


Рисунок 3.2 – Залежності швидкості розпилення від потужності плазмового нагріву (а) та швидкості обертання (б) заготовки, що розпилюється [21-22]

Тому підвищення потужності плазми та збільшення швидкості обертання заготовки, що розпилюється, є перспективним напрямом розвитку технології відцентрового плазмового розпилення.

В сучасних умовах розвитку промисловості підвищуються вимоги до якості виготовлення і точності балансування барабанів та збирання їх сумісно з приводними двигунами. Одночасно більш жорсткі вимоги висувають до заготовки, що розпилюється. Зміни торкнулися і притискних роликів: підвіска роликів стала мати ричажну систему і демпфуючу пружину. При цьому число притискних вузлів

збільшилося до 3-х або 4-х одиниць. Притискні ролики розподілені по довжині заготовки з рівними проміжками. Така конфігурація системи утримання витратного електроду на барабанах забезпечує підвищену жорсткість системи, що обертається без люфтів на контактній поверхні поміж заготовкою і барабанами. Для зменшення вібрацій значно збільшена вага опорних конструкцій (монтажної плити) приводів.

Можна виділити такі основні елементи технологічного циклу виготовлення сферичних порошків із застосуванням технології ротаційного плазмового розпилення:

- нагрівання торця дроту концентрованим джерелом енергії (плазмою);
- розпилення рідкого сплаву або його диспергування при високошвидкісному обертанні дроту;
- розсів порошку по фракціях;
- сепарація та очищення від неметалевих включень;
- дегазація готового порошку та герметизація його в капсулах.

Для плавлення торця розпилюваного електрода, що витрачається, в установці відцентрового розпилення УЦР-4 використовувався електродуговий плазмотрон постійного струму потужністю 100 КВт з вкладинками з тугоплавких металів (молібдену і вольфраму).

Основними вузлами в установці для розпилення порошків, найбільш чутливими до зміни навантаження є підшипники, барабани, система притиску електрода (шпіндель), електропривід. Вихід із ладу цих деталей є показником надмірних навантажень, викликає значні вібрації і унеможлиблює продовження процесу розпилення. Враховуючи, що розпилення відбувається в умовах вакууму, то збільшити кількість обертів заготовки за рахунок застосування іншого редуктора стає утрудненим. Необхідні конструктивні зміни. До того ж збільшення швидкості обертання збільшує навантаження на підшипник.

Для реалізації можливостей збільшення швидкості розпилення необхідно, окрім удосконалення системи фіксації витратної заготовки, зміна властивостей плазмоутворюючого газу, що може збільшити потужність плазми.

Як правило, в якості плазмоутворюючого застосовуються інертні по

відношенню до титана і нікелю газу – аргон, гелій та їх суміш. Дані різних досліджень щодо складу газової атмосфери різні. Вказується [22], що при підвищенні у 3-4 рази вмісту аргону в плазмоутворюючому газі та зменшення надлишкового тиску інертного газу в камері розпилення дозволяє знизити пористість усередині частинок порошку. Зазначається [21], що зміни у складі газової суміші (додавання гелію до аргону) впливають на потужність плазми, яка впливає на швидкість розпилення та продуктивність процесу загалом [22, 23]. При підключенні електроенергії в плазмотроні виникає елекродуговий розряд, яким нагрівається гелієво-аргонова суміш. Перетворення електричної енергії в теплову відбувається в дуговому розряді. Енергія, що виділяється, витрачається на нагрівання газової суміші.

Вибір оптимального складу плазмоутворюючої газової суміші – важлива частина вдосконалення технології розпилення нікелевих жароміцних та титанових сплавів, для чого необхідно провести дослідні процеси відцентрового розпилення різних рівнях зазначених параметрів. Визначення оптимального співвідношення газів у поєднанні з різною швидкістю обертання електрода, що витрачається, дозволить вирішити задачу виробництва виробів прогресивними методами консолідації порошків – під кожен метод є свій фракційний склад, що забезпечує високу якість готової деталі.

При зростанні потужності плазмового струменя збільшується перегрів розплавленого металу, що підвищує його рідкоплинність і зменшує поверхневий натяг, сприяючи, таким чином, відриву крапель розплаву на більш ранній стадії. Відрив крапель більш ранньої стадії може забезпечити збільшення швидкості обертання заготовки. В результаті в процесі розпилення виходять частинки порошку дрібнішого фракційного складу. Вимоги до зменшення розмірів частинок порошку обумовлюють збільшення швидкості обертання заготовки. При цьому в зоні контакту витратного електрода з роликотом утворювався кільцевий слід, що має певну глибину.

Температура на поверхні рідкої плівки металу в кратері розпилення теоретично перевищує на 8-14 °С температуру плавлення та стає тоншою з її

зростанням і залежить від частоти обертання витратного електроду. У «вінці» здійснюється додаткове прогрівання розплавленого металу на 70...100 °С і саме через нього відбувається відрив крапель, що створюють порошок. У зв'язку з високотемпературними умовами роботи багатьох деталей плазмотрона (катод, анод) для більшої продуктивності та запобігання «прогоряння» екрану необхідно про створення додаткової системи охолодження анода плазмотрона та збільшення камери.

Коливання фактичного діаметра частинок порошку впливають на кількість придатної фракції, і основним фактором, що впливає на величину цієї дисперсії, є неминуча вібрація заготовки, що розпилюється. Неможливість ідеального виготовлення і відбалансування механізму обертання, відсутність ідеально точних підшипників для нього, отримати заготовку, що розпилюється, з відсутністю еліпсності, з високою чистотою обробки поверхні, рівномірною щільності за об'ємом. Все це при високій швидкості обертання (до 30 000 хв⁻¹) викликає вібрацію розплаву у вінці заготовки, що розпилюється. При цьому краплі розплаву можуть відірватися від вінця раніше, ніж вони матимуть достатню вагу, що дозволить краплі відірватися під дією відцентрової сили, із вагою частинки, меншою за теоретичну або на вінці із розплавленого металу можуть злитися дві сусідні краплі – зародки частинок порошку, і тоді частинки будуть крупніші за розрахунковий розмір. Отже, чим менше вібрація витратного прутка, тим вужче інтервал розмірів у розпиленому порошку і тим вище вихід кондиційної фракції. Таким чином, для підвищення надійності роботи установки та з метою забезпечення стабільності процесу необхідно також розробити заходи щодо зменшення вібрацій.

В процесі відпрацювання технологічних режимів розпилення, особливо, при збільшенні швидкості обертання до 30 000 хв⁻¹, щоб уникнути виникнення аварійної ситуації, що супроводжується руйнуванням зазначених деталей та вузлів, запропоновано використовувати датчики шуму і вібрацій. До завдань розвитку та модернізації технології відцентрового плазмового розпилення також відноситься і підвищення продуктивності процесу. Продуктивність (кількість виходу придатної фракції в одиницю часу) залежить від кількості розплаву, що утворюється на торці

електрода, що обертається. У зв'язку з тим, що товщина плівки розплаву при цьому становить 20...50 мкм і мало змінюється в залежності від питомої потужності нагріву і швидкості обертання заготовки, то кількість розплаву також визначається площею торця витратного електроду, тобто його діаметром. В обладнанні УЦР-4, як і в іншому обладнанні подібного типу, використовуються заготовки для розпилення діаметром 50 мм.

Таким чином, актуальним стає завдання збільшення площі розплавлення, що дасть можливість збільшити діаметр витратного електроду. Для цього необхідно підвищити питому потужність нагріву, тобто збільшити швидкість розпилення, за рахунок зміни складу плазмоутворюючої газової суміші. Співвідношення інертних газів для різних сплавів буде різним через відмінності в теплофізичних властивостях сплавів, і його визначаємо шляхом експериментальних розпилень. До недоліків існуючої технології також слід віднести істотний розмір залишку від розпиленої заготовки – «негарка». В установці відцентрового розпилення УЦР-4 використовується касетна система завантаження десятків заготовок і після розпилення кожної з них залишається нерозпилена частина - "негарок", що становить близько 10 % заготовки. Залучення цієї частини заготовки в процес розпилення суттєво підвищить ефективність одержання порошку. При більш високих швидкостях обертання процес розпилення відбувається за більш короткий проміжок часу, що вимагає своєчасного видалення з камери залишку від електроду (негарка) і безперервну подачу наступної заготовки, що також підлягало урахуванню при модернізації.

Таким чином, для збільшення виходу дрібної фракції гранул (менше 100 мкм) та підвищення продуктивності установки запропоновані два шляхи:

1) зменшення в'язкості розплавлюваного матеріалу, за рахунок чого швидше відбувається розплавлення електроду і краплі металу меншого розміру відриваються від електроду, що плавиться – можливе за рахунок підбору оптимального складу суміші плазмоутворюючих газів і підвищення потужності плазми;

2) збільшення швидкості обертання заготовки, для чого необхідна розробка нового, більш потужного електроприводу і вузла фіксації заготовки, що

розкручується, притискним роликком і супутні конструктивні зміни.

Крім зменшення розмірів частинок важлива також чистота порошку за включеннями, оскільки частинки неметалевих включень у компактних заготовках є джерелами зародження мікротріщин, що зумовлює зниження характеристик довговічності деталей.

Вплив включень визначається їх розмірами та природою, а також видом напружено-деформованого стану. Необхідно зменшити розмір цих включень шляхом зменшення розміру частинок порошку в процесі їх одержання методом розпилення, а також за рахунок більших фракцій порошку при розсіванні. Джерелом надходження в порошок різноманітних включень є витратна заготовка, що розпилюється, до якої вони потрапляють при розливі розплавленого металу в кокіль після вакуумної індукційної плавки. Зниження кількості кисню, що потрапляє до порошка в процесі розпилення та адсорбованого поверхнею готового порошку, також відноситься до найважливіших завдань удосконалення обладнання та технології, оскільки в порошках має бути обмежена внутрішня газова пористість і вміст кисню в порошках не повинен перевищувати його вміст у вихідній заготовці.

Таким чином, успішне застосування технології відцентрового плазмового розпилення потребує вирішення низки проблем. В межах цієї роботи вирішені такі задачі:

1. Запропоновані конструктивні зміни вузла підведення витратної заготовки і її фіксації з метою збільшення швидкості обертання витратного електрода і зниження рівня вібрацій.

2. Відпрацьовано оптимальні склади газового середовища при ротаційному плазмовому розпиленні заготовок із титанового та нікелевих сплавів.

3. Визначено вплив технологічних параметрів розпилення (швидкості обертання заготовки та складу плазмоутворюючої газової суміші) на фракційний склад і якість матеріалу порошків з жароміцних нікелевих і титанових сплавів (рівномірність їх хімічного складу, мікроструктуру, пористість частинок, вихід кондиційної фракції, тощо).

4. Отримано сферичні порошки заданого фракційного складу під конкретні

технології консолідації порошків (для електронно-променевого та мікроплазмового наплавлення, під лазерний 3D-друк).

Отже, з метою підвищення якості одержуємого дрібнодисперсного порошку та збільшення продуктивності обладнання на основі проаналізованих даних сформульовано напрямки з удосконалення та модернізації існуючого обладнання.

3.2 Конструктивні зміни вузлів та механізмів обладнання для ротаційного плазмового розпилення

Для підвищення надійності роботи плазмотрона (рисунок 3.3 а) та забезпечення стабільності процесу розпилення, а також для реалізації можливостей зміни швидкостей плавлення в широких межах проведено низку змін у конструкції установки УЦР-4.

Як зазначалося раніше, одним із факторів, який гальмує можливості збільшення швидкості обертання заготовки, є підвищена вібрація та, відповідно, підвищене зношування деталей, що утримують розпилювану заготовку і забезпечують подачу з магазину заготовок у робочу камеру розпилення (притискний ролик, підшипники, барабани). Для обертання витратного електроду слугують вали, що рухаються внаслідок роботи редуктора. До модернізації для фіксації заготовки, що розкручується, слугував притискний ролик з підпружинюванням, який в процесі роботи обертався і штовхав заготовку, залишаючи на її поверхні кільцеву вибірку, другий ролик стояв стаціонарно, при цьому безпосередньо на роликові утворювався наплив з матеріалу, що розпилювався, від чого знижувалася продуктивність, а підвищення швидкостей обертання лише посилювало всі ці негативні чинники. Найбільш навантаженими деталями в редукторі є підшипники, які періодично руйнувалися через надмірні навантаження. Отже, для підвищення швидкості обертання витратної заготовки необхідно виконати модернізацію та удосконалення всієї кінематичної схеми обладнання УЦР-4 – від електродвигуна до характеристик

редуктора та діаметру барабанів, що обертають заготовку (рисунок 3.3 б). Діаметр розкручуваної заготовки (витратного електроду) не змінювали, він становив 50 мм. Конструкція до модернізації передбачала два барабани діаметром 150 мм, котрі обертали витратний пруток $\varnothing 50$ мм.

Редуктор до модернізації характеризувався значенням швидкості обертання вала $15\ 000\ \text{хв}^{-1}$ та передаточним співвідношенням 1:4.



а



б

а – мідний сопло-анод плазмотрону; б – притискні ролики;

Рисунок 3.5 – Основні вузли обладнання для розпилення «УЦР-4»

Таким чином, конструкція із діаметром барабанів 150 мм співвідносилась із діаметром витратної заготовки 50 мм, як $150: 50 = 3$. Отже, максимальна швидкість обертання, яку теоретично можливо отримати на обладнанні до модернізації, складала: $V_{об.} = 1500 \times 3 \times 4 = 18\ 000\ \text{хв}^{-1}$, що є недостатнім для виготовлення порошків дисперсністю до 100 мкм. Для підвищення ступеня мультиплікації в новій модернізованій конструкції збільшили діаметр барабанів, що обертаються, з 150 мм на 190 мм, це обумовлювало також конструктивні зміни редуктора, оскільки посадочні розміри під вали зміненої конструкції не підходили. В новому редукторі додана третя проміжна шестерня, що збільшило оберти витратного електроду (рисунок 3.4).

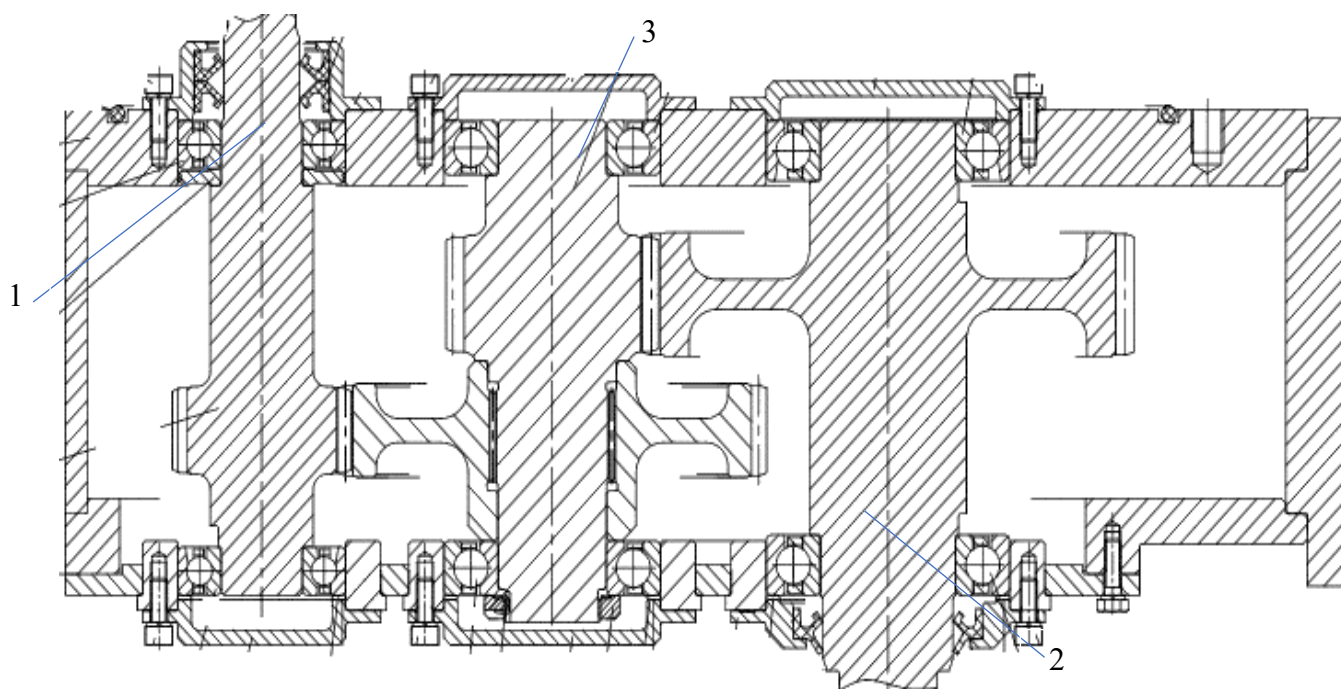


Рисунок 3.4 – Ескіз удосконаленого редуктора із зображенням двох основних шестерен (1, 2) та доданої проміжної в центрі (3)

Характеристики системи обертання заготовки в обладнанні для ротаційного плазмового розпилення УЦР-4 представлені в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Характеристики мультиплікатора приводу модернізованого обладнання УЦР-4

Параметр	1 ступінь		2 ступінь	
	1	2	3	
Позначення зубчатого колеса	МП02-11-001	МП02-11-002	МП02-11-003	МП02-11-004
Число зубців	57	23	59	23
Модуль нормальний	3	3	2,5	2,5
Кут зубця	12	12	15	15

Продовження таблиці 3.1

1	2		3	
Напрямок лінії зубців	правий	лівий	лівий	Правий
Максимальна частота обертання	1500	3717,4	3717,4	9535,9
Передаточне число	0,4035		0,3898	

Отже, при новому розмірі барабанів 190 мм співвідношення із витратною заготовкою $\varnothing 50$ мм дорівнювало значенню «3,8» (передача крутного моменту від електродвигуна на барабани), сумарне передаточне число мультиплікатора складало 0,15728. Новий редуктор характеризувався передаточним співвідношенням 1:7. З новим редуктором отримували наступну теоретично максимально можливу швидкість обертання витратної заготовки в процесі плазмового розпилення:

$V_{об.} = 1500 \times 7 \times 3,8 = 39\,900 \text{ хв}^{-1}$. Таке значення швидкості обертання закладене в конструкцію із запасом і на практиці для безпечної експлуатації без руйнувань обладнання не досягалось, максимальна швидкість обертання не перевищувала 30 тис. хв^{-1} . Кінематична схема нової конструкції обладнання для розпилення УЦР-4 із зазначенням нових характеристик редуктора, барабанів, мультиплікатора, про визначення яких зазначено вище, представлена на рисунку 3.5.

Вид на привідні барабани від
плазмотрону

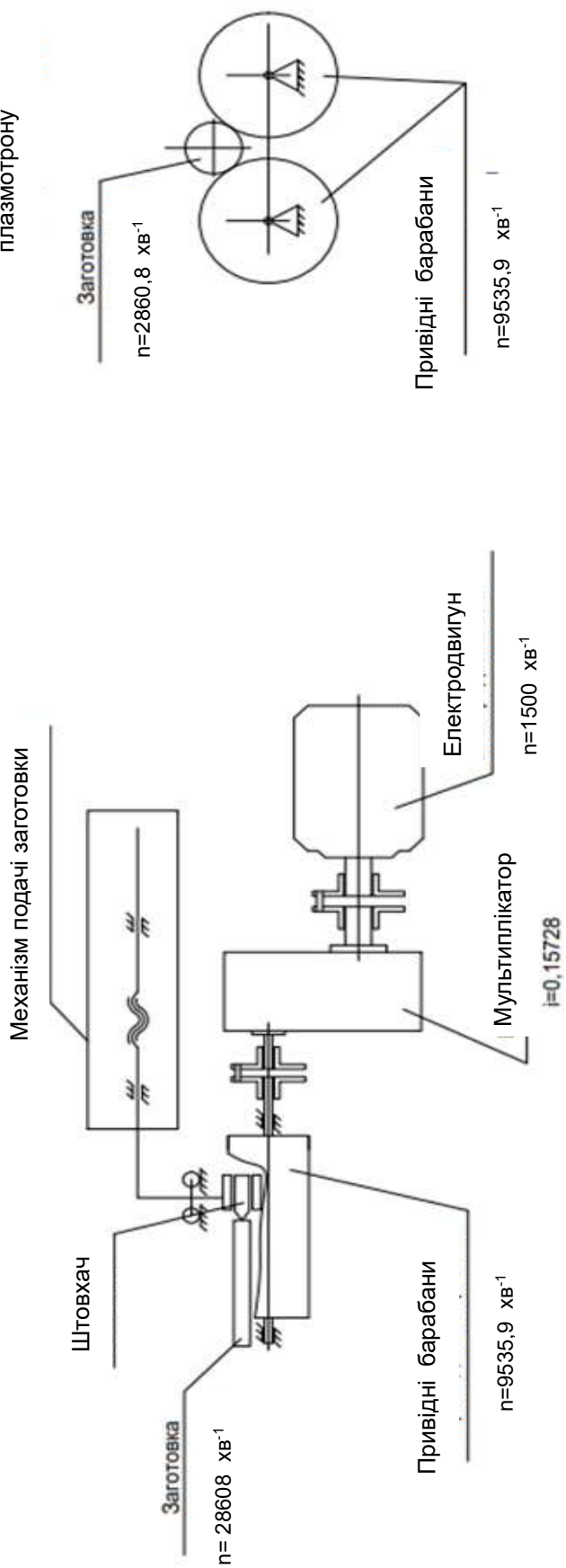


Рисунок 3.5 – Кінематична схема механізму обертання заготовки в обладнанні відцентрового плазмового розпилення УЦР-4

До модернізації для фіксації заготовки, що розкручується, слугував притискний ролик з підпружинюванням, який в процесі роботи обертався і штовхав заготовку, залишаючи на її поверхні кільцевий слід, що має поглиблення (рисунок 3.6). Другий ролик стояв стаціонарно, при цьому безпосередньо на ролик утворювався наплив з матеріалу, що розпилювався, від чого знижувалася продуктивність, а підвищення швидкостей обертання лише посилювало всі ці негативні чинники.



Рисунок 3.6 – Кільцева вибірка на поверхні заготовки, що розпилюється, від контакту із притискним роликом після роботи на установці УЦР-4 (до модернізації)

Слід враховувати, що весь процес відбувається в умовах вакууму та середовищі інертних газів, і будь-яка зупинка процесу спричиняє необхідність розвакуування для проведення налагоджувальних робіт.

Проте, через труднощі підтримки герметичності робочої камери в місцях введення високошвидкісного приводу при цьому на конструкції до модернізації не вдавалося зберігати інертний газ високої якості, що також не виключало окислення порошку в процесі виробництва.

У зв'язку з цим розроблено новий вузол, який відповідає за розкручування заготовки, що розпилюється – це шпиндель і підшипники із мастилом для запобігання перегрівання. Введене також додаткове охолодження камери розпилення за допомогою окремої, незалежної від плазмотрону, системи циркуляції інертного газу шляхом створення каналу. Через цей канал нагрітий газ забирають з камери

розпилення, далі охолоджують його до кімнатної температури та повертають у камеру, при цьому знижується кількість несферичних гранул за рахунок додаткового охолодження частинок у польоті. В результаті модернізації збільшений діаметр барабана. Притискний ролик тепер встановлюється під невеликим кутом ($1...2^\circ$) до поверхні заготовки, що дозволило запобігти утворенню кільцевого сліду від контакту з витратним електродом і налипання його матеріалу на ролик. Шпиндельний механізм, що притискує та утримує витратний електрод з підшипниками з примусовим змащенням, дозволили:

- підвищити швидкість обертання розпилюваної заготовки;
- зменшити рівень вібрацій витратного електроду;
- зменшити розмір залишку витратного електроду після розпилення (розмір «негарку») з 35 мм до 20 мм.

Також збільшити швидкість обертання витратного електроду дозволила розробка нового більш потужного електроприводу дозволять, що плавно змінює швидкість обертання заготовки. Конструктивні зміни сприяли також більш повному використанню витратних електродів. Ескіз витратного електроду, що застосовується в обладнанні УЦР-4, наведено на рисунку 3.7. Розмір залишку після ротаційного плазмового розпилення зменшено, в середньому, вдвічі. Враховуючи дефіцитність і високу вартість жароміцних нікелевих і титанових сплавів цей фактор має суттєвий вплив на собівартість виготовлених порошків. Ця обставина потенційно може вивести технологію відцентрового розпилення на рівень рентабельності, співрозмірний із методом газопламеневого розпилення.

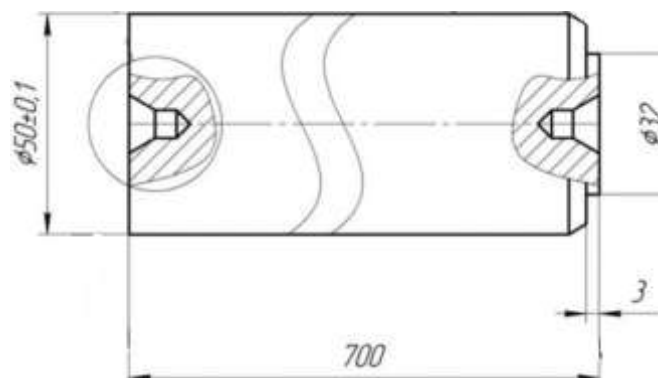


Рисунок 3.7 – Ескіз витратного електроду для розпилення

Результати впливу конструкційних змін без підвищення швидкості обертання витратного електроду (швидкість обертання становила 20 тис. хв⁻¹) на розмір фракцій розпилених порошків та розміру «негарка» від розпилених витратних електродів із никелевого та титанового сплаву наведені в таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Фракційний склад порошку і розмір нерозпиленого залишку витратного електроду після плазмового ротаційного розпилення

Стан обладнання	Сплав	Ø частинок порошку у фракції, мкм	Довжина залишку прутка («негарка»), мм
до модернізації	Ti-6Al-4V	90...220	35
	ВЖ98	120...300	40
після модернізації	Ti-6Al-4V	60...100	20
	ВЖ98	100...120	24

Як видно з даних таблиці 3.2, крім зменшення розміру нерозпиленого залишку заготовки, підвищення продуктивності процесу отримували за рахунок збільшення виходу фракції заданого розміру, оскільки при зменшенні вібрацій більш вузьким став інтервал розкиду розмірів частинок порошку в середині фракції, що в цілому підвищувало вихід порошку необхідного розміру. Щоб уникнути надмірного навантаження на шпиндель виконали закріплення витратного електроду роликами з підпружинюванням.

Для збільшення виходу дрібної фракції порошку, особливо при виготовленні порошків із високолегованих жароміцних нікелевих сплавів, необхідно подавати на плазмотрон більш високу потужність. За рахунок підвищення температури плазмового потоку (зростання температури плазми зменшує в'язкість матеріалу, що розплавляється) зростає продуктивність – швидше відбувається розплавлення електрода. Однак, робота на підвищених потужностях з часом може спричинити локальне прогоряння анода плазмотрону.

Внаслідок прогоряння вода, що надходить на анод для його охолодження, потрапляє до робочої камери. При цьому відбувається сильне окислення поверхні

частини електрода і порошку, отриманої за поточний робочий цикл, а також значне забруднення стінок камери продуктами взаємодії води з розплавом.

Для запобігання прогорянню анода і перегріву системи, що тягне за собою підвищене енергоспоживання, проведена модернізація всієї охолоджувальної системи і від одного контуру перейшли на багатоконтурне: для плазмотрона, як охолоджувальну рідину використовували дистильовану воду, в іншій системі – тосол, в результаті енергоспоживання зменшилось з 10-ти кв/год до 3-х кв/год.

Таким чином, в результаті модернізації розроблено нову конструкторську документацію, згідно з якою виготовлено нові деталі та вузли, нову систему охолодження, які впроваджено в наявне обладнання. Конструктивні зміни дозволили здійснювати на установці УЦР-4 плазмове розпилення жароміцних сплавів зі швидкостями обертання від 27 000 хв⁻¹ до 30 000 хв⁻¹. При цьому процес розпилення здійснювався стабільно, з мінімальними вібраціями та вищою продуктивністю. Збільшення швидкості обертання заготовки, що розпилюється, до 30 000 хв⁻¹ дозволило виготовляти сферичні порошки дрібніших фракцій (40...60 мкм), що відповідає вимогам адитивних технологій вирощування деталей. Однак, крім розміру частинок, до порошоків адитивного призначення висуваються ряд вимог якості (сферичність, відсутність сателітів і окислення поверхні), що докладно розглянуто в розділі 1 цієї роботи. Тому для забезпечення якості порошоків, що виробляються, необхідна оптимізація параметрів розпилення з урахуванням теплофізичних властивостей різних сплавів. Досліджували процеси ротаційного плазмового розпилення витратних електродів із нікелеких сплавів Inonel 718, ВЖ98 та титанового сплаву Ti-6Al-4V.

3.3 Висновки до розділу 3

Удосконалене технологічне обладнання для ротаційного плазмового розпилення порошоків, що дозволило підвищити швидкість обертання розпилюваної

заготовки і зменшити зношування деталей в умовах підвищених швидкостей обертання.

Модернізація обладнання полягала в змінах кінематичної схеми, а також в конструктивних допрацюваннях вузла фіксації заготовки притискним роликком – це шпindelне закріплення і нові підшипники із додатковим змащенням, що захищало їх від перегріву. Введено також додаткове охолодження камери розпилення за допомогою окремої, незалежної від плазмотрону, системи циркуляції інертного газу. Розроблено нову конструкторську документацію (кресленики зі змінами різних вузлів установки УЦР-4), згідно яким виготовлено нові деталі та вузли.

РОЗДІЛ 4. ОПТИМІЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ РОТАЦІЙНОГО ПЛАЗМОВОГО РОЗПИЛЕННЯ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ

4.1 Визначення впливу технологічних параметрів плазмового ротаційного розпилення на розмір частинок порошку

Як вже зазначалось в попередніх розділах, зменшення розміру порошку досягається за рахунок збільшення швидкості обертання витратного електроду. Фізичний сенс зменшення розміру порошку, що отримає в результаті розпилення, зводиться до збільшення кутової швидкості і прискорення, з яким частинки відриваються від розплавленого торця електрода. Чим вище швидкість відриву, тим більша кількість частинок встигне відлетіти і дрібніше вони будуть.

Для кожної кутової швидкості обертання заготовки за інших рівних умов технологічного процесу існує максимальна кількість порошку певного розміру. Цей максимум зсувається у бік зменшення розміру розпилених порошків зі збільшенням швидкості обертання.

Дослідні розпилення проводили із використанням титанового сплаву Ti-6Al-4V і жароміцних нікелевих сплавів Inconel 718 та ВЖ98. Результати варіювання швидкістю обертання заготовки та її вплив на фракційний склад та вихід порошку представлені в таблиці 4.1.

З представлених даних видно, що зі збільшенням швидкості обертання заготовки, що підлягає розпиленню, розмір порошку зменшувався, але розкид значень всередині фракції досить великий, що після розсіву зменшувало вихід порошку з необхідним розміром частинок. Вихід порошку потрібного розміру становив 60...70 % від обсягу, отриманого за одне розпилення. Такий розкид розмірів може бути пов'язаний з недостатньою потужністю плазмоутворювального газу (аргону), що призводило до нестабільності процесу.

Таблиця 4.1 – Фракційний склад порошків після розсівання розпиленої партії (% ваг.) залежно від швидкості обертання витратної заготовки

Сплав	Швидкість обертання, хв^{-1}	Задана фракція, мкм	Розміри частинок порошку після розсіву, мкм			
			-130 +100	-100 +50	-60 +30	-30
Ti-6Al-4V	27 000	-100 +150	0,1	69,4	30,4	0,1
	30 000	-60+30	–	18,5	61,2	20,3
Inconel 718	25 000	-50+30	–	27,3	59,5	13,2
	30 000	-30	–	2,1	2,8	65,1
ВЖ98	25 000	-100+50	1,0	67,2	30,8	–
	30 000	-50	0,8	10,2	58,4	26,9

При цьому для порошків із титанового сплаву були потрібні більш високі швидкості обертання заготовки (від 27 000 хв^{-1} до 30 000 хв^{-1}), що пов'язано із низькою питомою вагою титану та з більшою в'язкістю розплаву. Обидва ці фактори призводили до більш складних умов для відривання частинок розплавленого металу під дією відцентрової сили, ніж для нікелевих сплавів.

Для збільшення об'єму порошків дрібнодисперсної фракції в розпиленій партії досліджено можливість підвищення потужності за рахунок зміни складу плазмоутворювального газу: до аргону запропоновано вводити інертний газ – гелій (He) з отриманням суміші газів у певному співвідношенні.

Обидва гази також можуть бути змішані з іншим газом, який має відновлювальну здатність при взаємодії з киснем.

Фізичні властивості газів, що використовується для плазмоутворення, впливають на технологічні властивості плазми. Наприклад, у порівнянні з аргоном, гелій має більш високий потенціал іонізації та вищу теплопровідність при температурах існування плазми (таблиця 4.2).

Таблиця 4.2 – Фізичні властивості газів, що застосовуються

Параметр	Ar	He
Перший потенціал збудження, eV	11,3	19,8
Потенц. іонизац. U_i , eV	15,7	24,6
Коефіцієнт теплопровідності при 6000 К, Вт/(м·К)	0,17	1,5
Теплопровідність Вт/м·К	0,0164	0,24

При рівних умовах плазма у гелію має високу потужність. Напруга плазми в середовищі гелію приблизно в два рази вище, ніж у середовищі аргону. При цьому підвищується стабільність горіння дуги. Завдяки цьому застосування гелію забезпечує більшу проплавну здатність плазми торця витратного електроду, форма проплавлення більш рівномірна – без утворення кратеру в центральній зоні тощо. Відомо, що щільність газової суміші 70 % Ar + 30 % He близька до щільності повітря і, в порівнянні з чистим аргонем, суміш забезпечує більш глибоке проплавлення, що позитивно впливає на процес плазмового розпилення порошків. За даними роботи [120] додавання гелію дозволило знизити погонну енергію дуги, що можна пояснити більшою проникною здатністю дуги, при цьому автори зазначали, що дуга була більш стабільною (таблиця 4.3). Цей фактор враховано при плануванні дослідних розпилень.

Таблиця 4.3 – Експериментальні дані погонної енергії при різному співвідношенні захисних газів аргон-гелій для сплаву системи Ni-Cr-Al

Захисний газ Ar/He, %	Погонна енергія, Дж/мм
90/10	266
80/20	177
70/30	133

З метою підбору оптимального відсоткового співвідношення аргону та гелію для отримання високоякісних сферичних порошків різних фракційних складів проведено серію дослідних розпилень. При цьому для кожного сплаву варіювали

такими параметрами: швидкість обертання витратного електроду, ν (X_1) та вміст % He (X_2) у плазмоутворювальній газовій суміші (аргон + гелій).

Функцією відгуку обрано середній розмір частинок порошку, показником якої став параметр d_{50} , особливості визначення якого детально висвітлені в розділі 2. Показник d_{50} мкм, є розміром 50 % порошку від загального обсягу порошку, і часто використовується для позначення середнього розміру частинок порошку. Значення d_{50} також називають «медіаною», що поділяє розподіл частинок порошку за розмірами на рівні кількості частинок, що є меншими цього значення, та крупніших за частинки розміром d_{50} . Для характеристики ширини розподілу використовували стандартне відхилення навколо середнього значення $(d_{90} - d_{10}) / d_{50}$ або значення діапазону. Чим ширшим є розподіл, тим більше стандартне відхилення та діапазон фракційного складу.

Планування ортогонального експерименту проводили для двох незалежних змінних рівнях варіювання досліджуваних параметрів розпилення. Межі рівнів варіювання та крок варіювання обрані на підставі аналізу літературних даних [118-120], в яких зазначалась необхідність підвищувати швидкість обертання витратної заготовки до $30\,000\text{ хв}^{-1}$ для отримання частинок порошку діаметром $< 100\text{ мкм}$. При цьому авторами роботи [118] не конкретизувався сплав, а надана загальна рекомендація зі значенням швидкості обертання $30\,000\text{ хв}^{-1}$. Тому це значення обрано як базове для верхнього рівня варіювання, оптимальна швидкість обертання витратної заготовки визначена окремо для кожного із досліджуваних сплавів. Нижній рівень варіювання параметром швидкості обертання обрано $20\,000\text{ хв}^{-1}$ – значення, визначене експериментальним шляхом, що досягається при мінімальній частоті обертання електродвигуна $n=1500\text{ хв}^{-1}$ після модернізації обладнання УЦР-4. Також в цих публікаціях наголошувалось на можливостях зміни розмірів порошків через вплив плазмоутворювальної суміші, де співвідношення аргону до гелію становило 70%/30 %, однак обрані в даній дисертаційній роботі сплави (Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V) мають різні фізичні властивості і потребують уточнення вмісту гелію для кожного сплаву. Тому вміст гелію на рівні 30 % обрано, сприяючись на дані

досліджень [118-120] в якості нижнього рівня, а вдвічі вище значення – в якості експериментального, що стало верхнім значенням діапазону варіювання. Вище значення 60 % He не розглядали, оскільки гелій підвищує проплавляючу зданість плазми, і як наслідок, на поверхні розплавляемого торцю витратного електроду може утворитися глибокий кратер, що негативно впливає на процес розпилення і якість порошку. На підставі вище поданих результатів у роботі реалізовано ортогональний експеримент (таблиця 4.4).

Таблиця 4.4 – Кодування факторів ортогонального плану експериментів

Інтервал варіювання та рівень факторів	X_1 (V, хВ ⁻¹)	X_2 (% He)
Нижній рівень (-)	20 000	30
Нульовий рівень (0)	25 000	45
Верхній рівень (+)	30 000	60
Інтервал варіювання, Δ	5 000	15

Для переведення факторів у кодовий масштаб використовували формулу (4.1):

$$X_i = \frac{X_i - X_{i0}}{\Delta} \quad (4.1)$$

Кількість дослідних плазмових розпилень, необхідне для побудови плану, склала (4.2):

$$N = 2k - p \quad (4.2)$$

де k – число незалежних змінних;

p – кількість взаємодій у повному факторному експерименті типу 2^k , замінене новими чинниками.

Спільний вплив параметрів, що варіюються, враховували в регресійних рівняннях. Роботу проводили із застосуванням методу математичного планування

експерименту [121] при допущенні лінійної залежності від технологічних параметрів розпилення (швидкість обертання витратного електроду та вміст гелію в плазмоутворюючій газовій суміші з аргоном).

Матриця планування експерименту (таблиця 4.5) дозволила одержати математичну модель. У разі неадекватності лінійної моделі дана матриця давала можливість побудувати математичну модель другого порядку.

Таблиця 4.5 – Ортогональний центральний план експериментів

№ експерименту	X ₁ (v, хв ⁻¹)	X ₂ (He, %)
1	-	-
2	+	-
3	-	+
4	+	+

Розглядали неповну квадратичну модель, в якій поліном мав наступний вигляд (4.3):

$$Y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_1x_2 \quad (4.3)$$

Після розрахунків коефіцієнт b_3 при сумісній взаємодії обох параметрів X₁ і X₂ був статистично незначимий.

Таблиця 4.6 – Чисельні характеристики факторів, що варіюються технологічних параметрів плазмового розпилення згідно матриці планування

№ експерименту	X ₁ (v, хв ⁻¹)	X ₂ (He, %)
1	20 000	30
2	30 000	30
3	20 000	60
4	30 000	60
5 (середн.)	25 000	45

Результати визначення діаметра частинок порошків та вихід (% мас.) заданої фракції

за одне розпилення представлені в таблиці 4.7-4.9.

За даними вимірів розраховували коефіцієнти регресії, які дозволили отримати наведені нижче залежності, що варіюються в заданих межах (таблиці 4.7).

Таблиця 4.7 – Функція відгуку матриці планування експерименту – середній розмір частинок (d_{50}) порошку зі сплаву Ti-6Al-4V

№ експерименту		У (d_{50}), мкм	Середньоквадратичне відхилення, $S(zt)$
1	2	3	4
1	1.1	120	10,41
	1.2	135	
	1.3	140	
2	2.1	110	10,41
	2.2	130	
	2.3	115	
3	3.1	95	15,00
	3.2	110	
	3.3	125	
4	4.1	65	12,58
	4.2	80	
	4.3	90	
5 (серед.)	5.1	90	14,5
	5.2	105	
	5.3	115	

Аналіз даних таблиці 4.7 дозволив зробити висновок, що введення гелію до плазмоутворюючої газової суміші з аргонном позитивно впливало на зменшення розміру фракції порошку зі сплаву Ti-6Al-4V і найбільший ефект мало при досягненні 70 % He в суміші з Ar при максимальній швидкості обертання заготовки 30 тис. хв⁻¹.

На підставі дослідних розпилень згідно матриці планування експерименту, отримані залежності, що показують спільний вплив швидкості обертання електрода, що розпилюється, і вмісту гелію в плазмоутворюючій газовій суміші на розмір частинок порошків.

Залежність (4.3) розміру частинок (мкм) для порошку зі сплаву Ti-6Al-4V лінійна і мала наступний вигляд :

$$Y = 212,9 - 0,00283X_1 - 0,833X_2 \quad (4.3)$$

Графічні залежності згідно з отриманими рівняннями дозволяють обрати оптимальний режим розпилення порошків із титанового сплаву Ti-6Al-4V (рисунок 4.1).

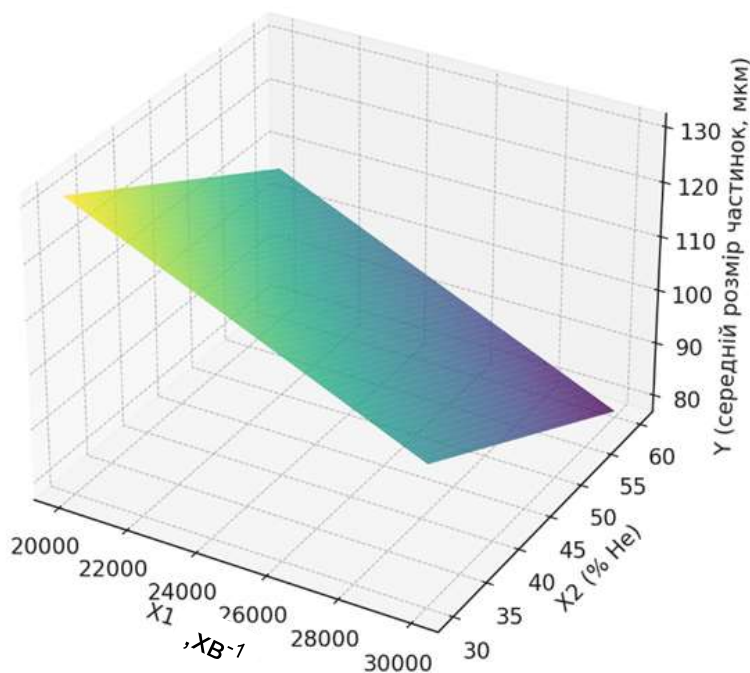


Рисунок 4.1 – Графічна залежність розміру частинок порошку зі сплаву Ti-6Al-4V від параметрів розпилення (швидкість обертання та вміст гелію)

З рисунку 4.1 видно, що такі параметри як швидкість обертання витратного електрода та вміст гелію в плазмоутворюючій газовій суміші з аргоном мають сукупний вплив на розмір частинок розпиленого порошку, що підсилюється зі збільшенням обох параметрів, створюючи лінійну залежність. Результати

дослідних розпилень порошків зі сплаву Inconel 718 із визначенням середньоквадратичного відхилення в кожному експерименті (по три розпилення на кожен рівень параметрів) наведено в таблиці 4.8.

Таблиця 4.8 – Функція відгуку матриці планування експерименту – середній розмір частинок порошку зі сплаву Inconel 718

№ експерименту	Y – середній діаметр порошку (d_{50}), мкм	Середньоквадратичне відхилення, $S(zt)$
	1.1	130
	1.2	200
	1.3	125
2	2.1	40
	2.2	55
	2.3	65
3	3.1	75
	3.2	60
	3.3	105
4	4.1	50
	4.2	45
	4.3	70
5 (середн.)	5.1	70
	5.2	65
	5.3	55

Залежність (4.4) розміру частинок для порошку зі сплаву Inconel 718 також мала лінійний характер:

$$Y = 291,04 - 0,00563X_1 - 1,375 * X_2 \quad (4.4)$$

Графічно залежність впливу швидкості обертання витратного електроду та

вмісту гелію в плазмоутворюючій суміші на розмір розпиленого порошку зі сплаву Inconel 718 представлена на рисунку 4.2.

Показана графічна залежність згідно з отриманими рівняннями дозволяє обрати оптимальний режим розпилення порошоків заданих фракцій із жароміцного нікелевого сплаву Inconel 718.

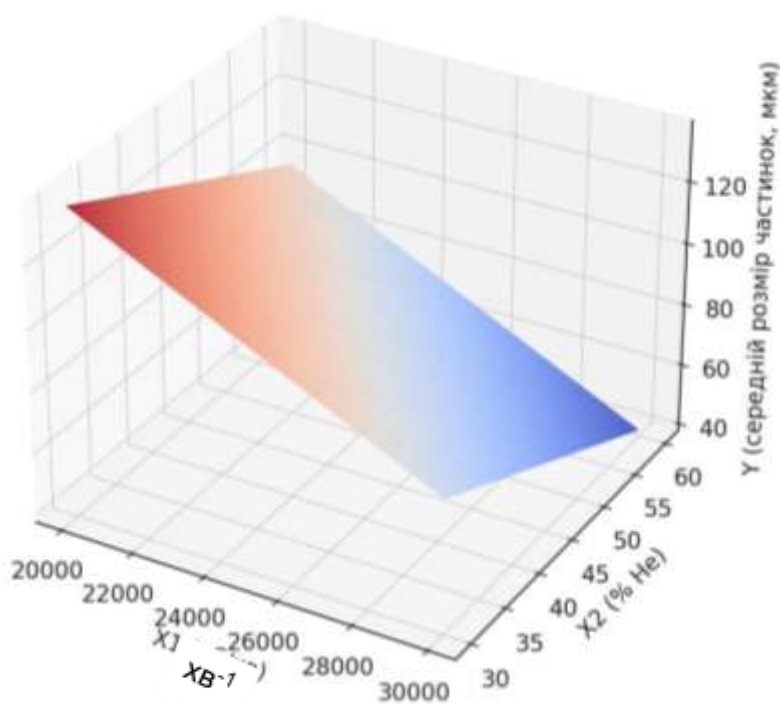


Рисунок 4.2 – Графічна залежність розміру частинок порошку зі сплаву Inconel 718 від параметрів розпилення (швидкість обертання та вміст He)

Враховуючи, що порошки із цього сплаву планується застосовувати для виготовлення деталей ГТД типу завихрювача, одержанного за адитивною технологією лазерного 3D-друку, то заданий розмір цих порошоків становив 30...50 мкм, тому оптимальними для їх одержання є наступні параметри: $\omega = 30 \text{ хв}^{-1}$; склад плазмоутворюючого газу (60 % He + 40 % Ar).

Функція відгуку матриці планування експерименту – середній розмір частинок порошку зі сплаву ВЖ98 та значення середньоквадратичного відхилення кожного експерименту представлені в таблиці 4.9.

Таблиця 4.9 – Функція відгуку матриці планування експерименту – середній розмір частинок порошку зі сплаву ВЖ98

№ експерименту		Y ₁ (d ₅₀), мкм середній діаметр порошку	Середньоквадратичне відхилення, S(zt)
1	1.1	205	15,0
	1.2	190	
	1.3	175	
2	2.1	95	15,0
	2.2	110	
	2.3	125	
3	3.1	120	7,64
	3.2	125	
	3.3	135	
4	4.1	95	15,28
	4.2	75	
	4.3	65	
5 (середн. рівень)	5.1	115	13,93
	5.2	90	
	5.3	75	

За експериментальними даними для порошоків зі сплаву ВЖ98 побудовано рівняння залежності середнього розміру частинок Y₁ (у мкм) від параметрів процесу:

Рівняння регресії описувало лінійну залежність розміру порошку зі сплаву ВЖ98 від параметрів, що досліджувалися (4.5):

$$Y = 323,96 - 0,00604X_1 - 1.208 * X_2 \quad (4.5)$$

Вільний член (323.96) у рівнянні регресії, який є теоретичним значенням середнього розміру частинок, як модель прогнозує, у випадку значення X₁ та X₂ дорівнювали нулю.

Хоча такі значення не використовувались в експерименті, коефіцієнт необхідний для побудови площини регресії, що найкраще апроксимує

експериментальні дані. Значення 0,00604 – це коефіцієнт при факторі X_1 . Це число показує, що при збільшенні швидкості обертання на 1 хв^{-1} , середній розмір частинок зменшується приблизно на 0,006 мкм, якщо інші умови залишаються незмінними.

Збільшення обертів на 1000 хв^{-1} призводить до зменшення розміру на приблизно 6.04 мкм. Коефіцієнт 1,208 - це коефіцієнт при факторі X_2 . Він показує, що зі збільшенням вмісту гелію на 1 %, розмір частинок зменшується приблизно на 1.208 мкм (при фіксованому X_1). Наприклад, збільшення X_2 з 30 % до 60 % зменшує розмір частинок в середньому на 36 мкм.

Отже, одержані рівняння показують, що збільшення швидкості обертання зменшує середній розмір частинок і збільшення вмісту гелію також зменшує середній розмір частинок.

Отримані в результаті експериментальних розпилювань залежності дозволяють прогнозувати технологічні параметри для виготовлення необхідного розміру сферичних порошків зі складнолегованих жароміцних сплавів для конкретного виробу і методу адитивного виробництва.

Графічно отримана залежність впливу швидкості обертання витратного електроду та вмісту гелію в плазмоутворюючій суміші на розмір розпиленого порошку зі сплаву ВЖ98 представлена на рисунку 4.3.

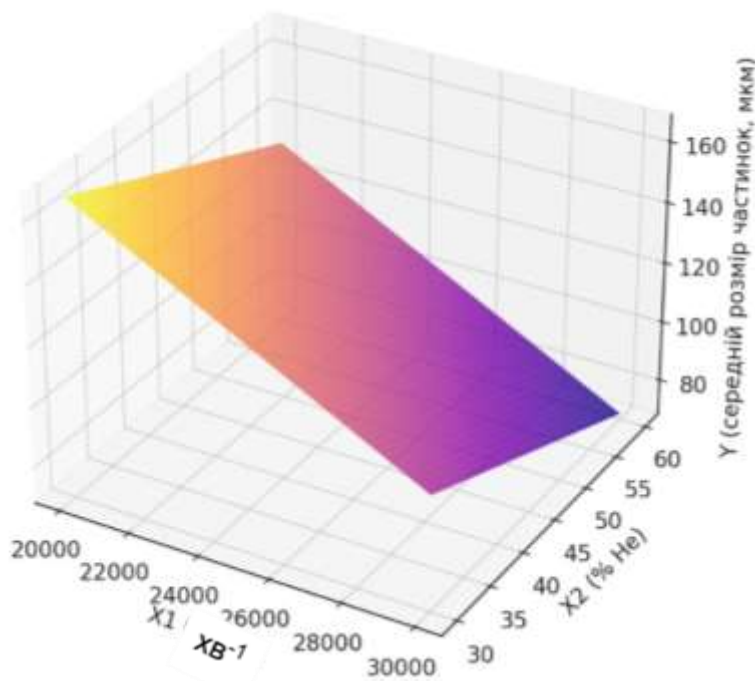


Рисунок 4.3 – Графічна залежність розміру частинок порошку зі сплаву ВЖ98

від параметрів розпилення (швидкість обертання та вміст гелію в суміші з аргонном)

За рахунок зміни співвідношення інертних газів у плазмі стало можливим впливати на швидкість розплавлення та підвищити стабільність роботи плазмотрона при одночасному підвищенні якості розпилених порошків. В результаті оптимізації технологічних параметрів розроблено вдосконалену технологію ротаційного плазмового розпилення нікелевих жароміцних та титанових сплавів за рахунок підвищення потужності плазми в поєднанні із збільшенням швидкості обертання витратної заготовки. Потужність плазми підвищували шляхом змін її теплофізичних властивостей в результаті введення до аргону інертного газу гелію в оптимальному співвідношенні. Можливість прогнозувати фракційний склад порошків, використовуючи регресійні залежності технологічних параметрів плазмового розпилення, дозволяє отримувати порошки різних розмірів, оптимальних для конкретних технологій 3D-вирощування виробів з них.

Таким чином, оптимальними режимами розпилення, що дозволяли отримати заданий розмір фракції порошку для досліджених сплавів, визначено наступні:

- для сплаву Ti-6Al-4V (30...60 мкм): $\nu = 30\ 000\ \text{хв}^{-1}$; співвідношення газів у плазмоутворюючій суміші 70% He + 30% Ar;
- для сплаву Inconel 718 (40...60 мкм): $\nu = 30\ 000\ \text{хв}^{-1}$; співвідношення газів у плазмоутворюючій суміші 60 % He + 40% Ar;
- для сплаву ВЖ98 (100...120 мкм) $\nu = 20\ 000\ \text{хв}^{-1}$; співвідношення газів у плазмоутворюючій суміші 60% He + 40% Ar.

4.2 Визначення якості сферичних порошків, виготовлених згідно з розробленими режимами на вдосконаленій установці ротаційного плазмового розпилення

Показником успішного використання сферичних порошків для виробництва

деталей відповідального призначення адитивними технологіями є їх якість. Як вже зазначалося раніше, крім розміру частинок, до порошків адитивного призначення висуваються ряд вимог до його якості, серед яких ключовими є сферичність, відсутність сателітів і окислення поверхні, відсутність внутрішньої пористості, однорідність хімічного складу і мікроструктури, а також необхідний рівень технологічних властивостей порошку.

Для забезпечення адитивної якості порошків, що виробляються, необхідна оптимізація параметрів розпилення з урахуванням теплофізичних властивостей різних сплавів. Дослідження проведено на жароміцних сплавах на основі нікелю (Inconel 718, ВЖ98) та титану (Ti-6Al-4V), порошки яких отримані на модернізованій установці УЦР-4М.

Технологічні властивості даних порошків представлені у таблиці 4.10.

Таблиця 4.10 – Технологічні властивості порошків, виготовлених на модернізованому обладнанні відцентрового плазмового розпилення УЦР-4М

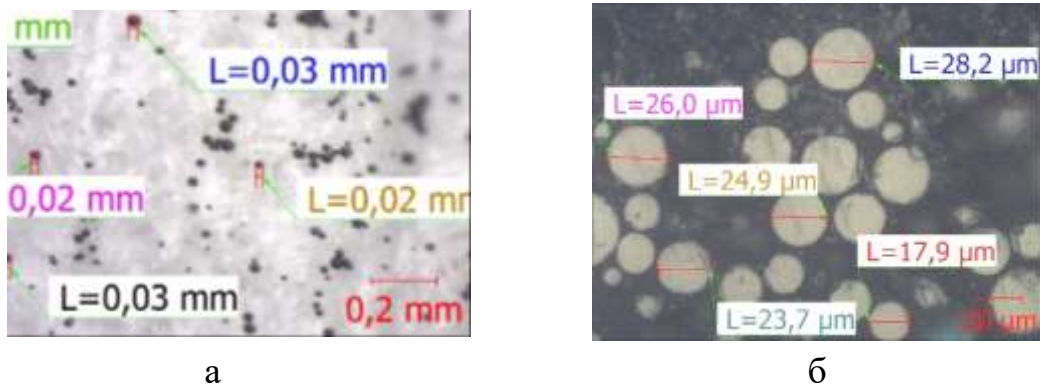
Марка Матеріалу	Фракція порошку, мкм	Текучість (на 50 г навішування), с	Насипна щільність, г/см ³
Ti-6Al-4V	-100+50	15,5	1,5
	-60+30	19,3	2,0
	-30	20,4	2,5
Inconel 718	-50+30	15,0	4,4
	-30	11,2	5,1
ВЖ98	-100+50	19,5	2,5
	-50	14,8	4,3

З даних таблиці 4.7 видно, що текучість порошків підвищувалася із зменшенням розмірів порошків, насипна щільність також збільшувалася відповідно. При цьому порошок з титанового сплаву Ti-6Al-4V характеризувався вищими значеннями текучості, ніж нікелеві сплави, але їх насипна щільність вище, ніж у титанового сплаву Ti-6Al-4V. Таку різницю в технологічних властивостях можна

пояснити різною питомою вагою досліджуваних матеріалів, а також впливом розміру частинок порошків на їх якість.

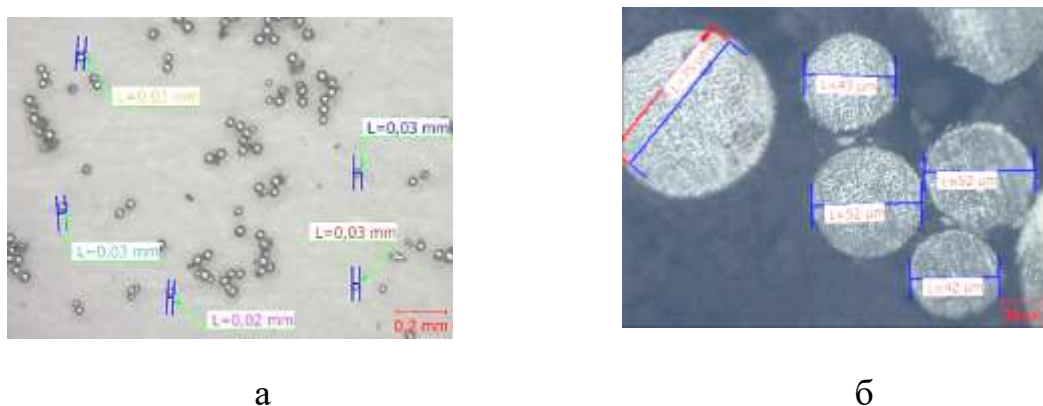
За даними різних досліджень, із зменшенням діаметра порошку зменшується ймовірність прояву таких факторів якості порошку, як наявність на поверхні сателітів, несферичність частинок порошку, внутрішня пористість, неметалічні включення. Від досліджених партій відібрано проби порошку, виготовленого за розробленими режимами, для металографічного дослідження їхньої якості. Огляд під бінокулярним мікроскопом показав, що поверхня порошків гладка, блискуча (рисунок 4.4-4.6 а).

При подальшому мікроаналізі встановлено, що виготовлені порошки мали правильну сферичну форму, без сателітів, мікропор та структурних змін на поверхні частинок (рисунок 4.4-4.6 б), що відповідало вимогам адитивних технологій на вихідний порошок.



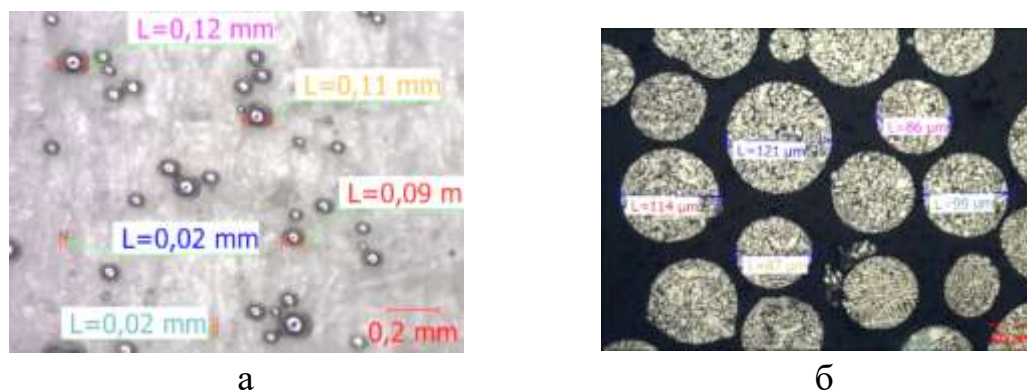
а – зображення бінокулярного мікроскопу; б – травлений шліф

Рисунок 4.4 – Порошок із титанового сплаву Ti-6Al-4V фракцію 20...-30 мкм



а – зображення бінокулярного мікроскопу; б – травлений шліф

Рисунок 4.5 – Порошок із нікелевого сплаву Inconel 718 фракцією -50...+30



а – зображення бінокулярного мікроскопу; б – травлений шліф

Рисунок 4.6 – Порошок із нікелевого сплаву ВЖ98 фракцією -120...+50

Значний інтерес до сферичних дисперсних порошоків обумовлений особливими властивостями, які набував сплав, загартований у мікрооб'ємах рідкого стану. Такі сплави відрізнялися наддрібним зерном і тонкою кристалічною структурою, що може забезпечити найкраще поєднання міцності і пластичності, тобто максимально реалізувати потенціал досліджуваних сплавів. У частинках порошоків фракцією 100 мкм і менше завдяки високій швидкості охолодження були відсутні ознаки хімічної неоднорідності, що позитивно впливає на хімічну однорідність надалі виготовлених деталей.

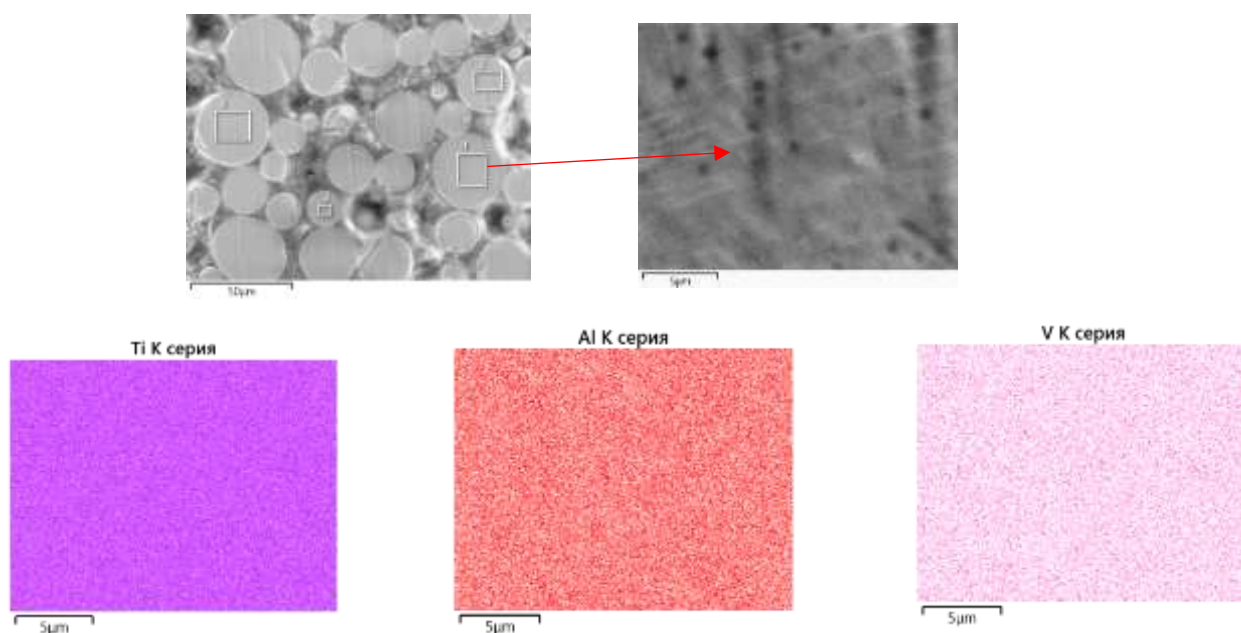


Рисунок 4.7 – Результати PCMA порошку із титанового сплаву Ti-6Al-4V

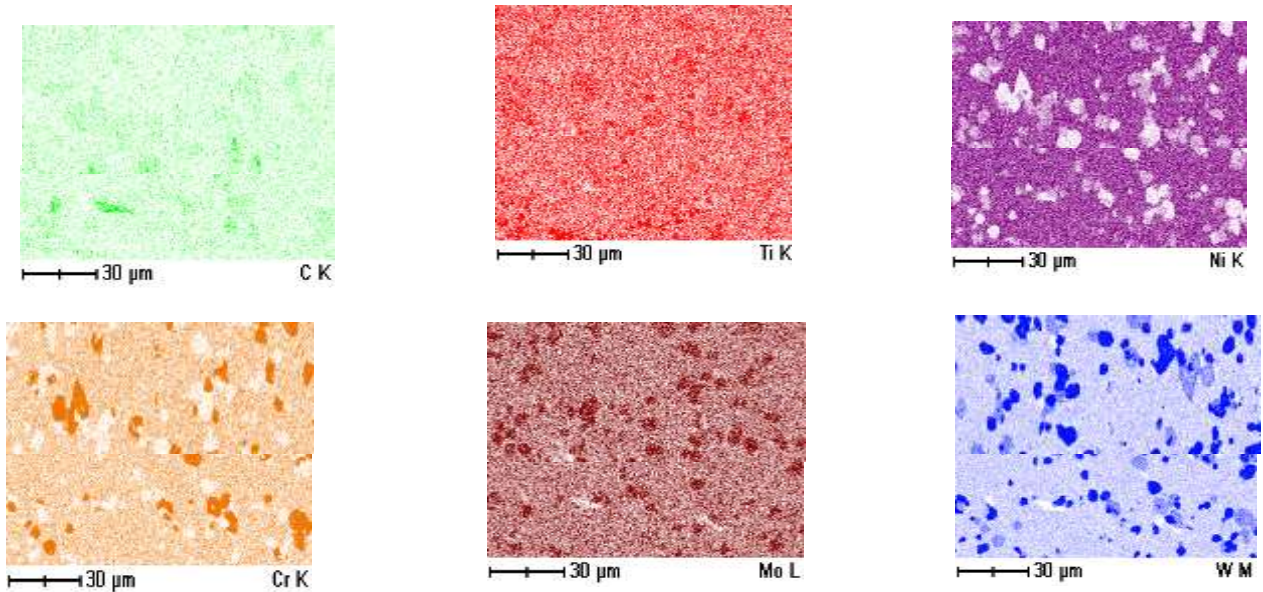


Рисунок 4.8 – Результати РСМА порошку зі сплаву ВЖ98

В умовах кристалізації сферичних частинок порошку спостерігалось більш істотне зрушення від рівноважного стану фаз у досліджуваних сплавах, ніж при кристалізації зливка. Створюються умови для утворення високодисперсних, псевдогомогенних сумішей, що підвищує механічні властивості, а також може збільшувати ефективність подальшої зміцнюючої термообробки. Однорідність мікроструктурного стану підтвердили виміри мікротвердості перерізу частинок сферичних порошків (таблиця 4.11).

Відомо, що при швидкій кристалізації збільшення її швидкості знижує ступінь дендритної ліквідації майже до аморфного стану, а зменшення відмінності в хімічному складі вісів і міжвісних просторів у цих зонах призводить до мартенситного перетворення у всьому об'ємі таких гранул. Тому в структурі частинок порошків, розмір яких менше 100 мкм, відмінності у мікроструктурі практично не фіксувалося.

Слід зазначити, що отримані значення мікротвердості характерні для прискореного охолодження даних сплавів, що можна пояснити швидкою кристалізацією крапель розплаву при плазмовому розпиленні та фіксацією структурного стану при кімнатній температурі.

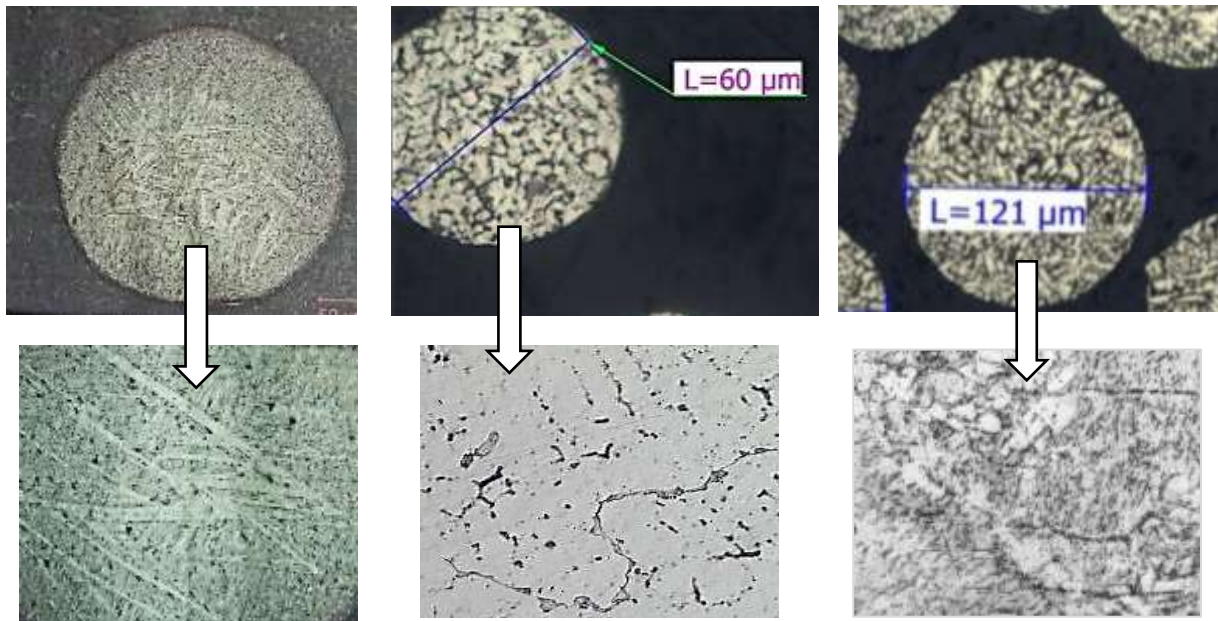
Таблиця 4.11 – Мікротвердість частинок сферичних порошків

Марка сплаву	Фракція порошку, мкм	Мікротвердість, HV ^{0,05}
Ti-6Al-4V	30...60	255...311
Inconel 718	40...60	405...492
ВЖ98	100...120	510...590

В результаті мікроструктурного дослідження із застосуванням оптичного та електронного мікроскопів встановлено, що в титановому порошку зі сплаву Ti-6Al-4V α - і β -фази мали дрібногольчасту морфологію мартенситного типу. Слід враховувати, що в процесі кристалізації крапель розплаву, крім процесів дендритної кристалізації, в титановому сплаві протікають процеси фазової перекристалізації $\beta \rightarrow \alpha + \beta$ (рисунок 4.9а).

Мартенситна структура, що утворюється, в порошках з плава Ti-6Al-4V замінює дрібнокомірчасту дендритну структуру, що утворюється в процесі кристалізації. Враховуючи, що швидкість охолодження при кристалізації крапель розплавленого металу при відцентровому плазмовому розпиленні становить не менше 104 °C/c і може досягати 107 °C/c [122], цим можна пояснити структурний стан частинок отриманого порошку.

Мікроструктура частинок порошку зі сплаву ВЖ98 та Inconel 718 складалася з дрібних дендритів γ -твердого розчину, у міжвісних просторах яких розташовувалися тонкі прошарки з металевих сполук Ni₃(Al, Ti, Nb), карбідів і карбонітридів, що дисперсійно зміцнюють сплав при подальшій термообробці (рисунок 4.9 б-в). На структуру сферичних порошків, що кристалізуються, впливає розмір частинок порошку і теплопровідність газів, в яких відбувається затвердіння. Аргон має теплопровідність, що дорівнює $14,2 \times 10^{-3}$ ккал/м год град, тоді як у гелія вона становить 123×10^{-3} м ккал/м год град. Тому в процесі відпрацювання технологічних параметрів (див. розділ 3), до яких також відносилось співвідношення аргону і гелію в плазмоутворюючій газовій суміші, мікроструктура частинок порошків досліджуваних сплавів могла відрізнитися від тієї, яка сформована при розпиленні за оптимального режиму.



а б в
а – Ti-6Al-4V, $\times 1000$; б – ВЖ98, $\times 1000$; в – Inconel 718, $\times 1000$

Рисунок 4.9 – Мікроструктура частинок сферичних порошків, виготовлених плазмовим розпиленням на установці УЦР-4М за оптимізованими режимами

У гранулах порошку з титанового сплаву Ti-6Al-4V більше 120 мкм мікроструктура біля поверхні мала дрібноголчастий характер, далі вглиб частинки мали дендритну будову з наявністю в міжвісних просторах дендритів тонкопластинчастих α/β -фаз (рисунок 4.10 а).

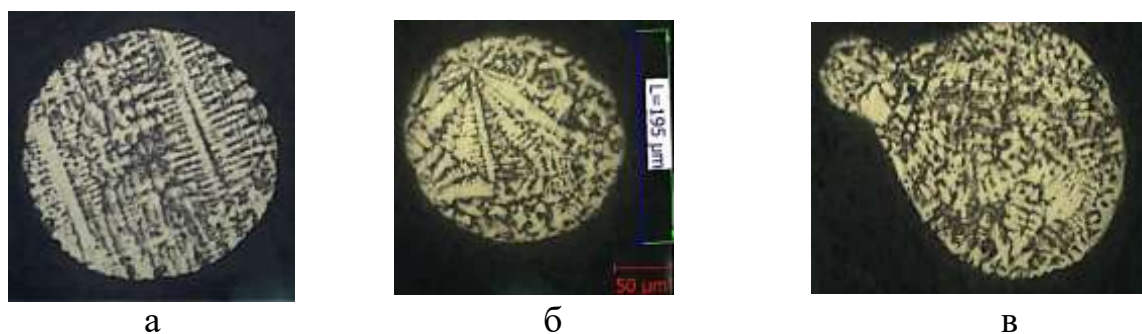
В частинках порошків із нікелевих сплавів Inconel 718 і ВЖ98 мікроструктура переходила з дрібнокомірчастого дендритного в крупнозернисте, що пов'язано, ймовірно, з більш повільним охолодженням більших частинок (рисунок 4.10 б-в). Таке припущення ґрунтується на уявленнях про теорію кристалізації Чалмерса, яка пояснює критерій переходу від плоского фронту росту фаз (G/v_ϕ) і від комірчастого до дендритного ($G/\sqrt{v_\phi}$), де G – температурний градієнт перед фронтом кристалізації, v_ϕ – швидкість кристалізації. Перехід від одного фронту до іншого, отже, і формування дисперсної структури, починається після зменшення цього критерію нижче певної величини, що залежить від сплаву.

Відповідно до цього ступінь дисперсності структури зростає з підвищенням

швидкості кристалізації. Також підвищення температурного градієнта, пов'язане з інтенсивністю тепловідведення, збільшує переохолодження на фронті кристалізації і сприяє більш швидкому переходу до дрібнодисперсної мікроструктури закристалізованого металу або подрібнення гілок дендритів, тобто впливає аналогічно підвищенню швидкості кристалізації металу.

Аналізуючи процес кристалізації частинок порошку при плазмовому розпиленні з позиції розглянутої теорії, можна дійти висновку про те, що у мікроструктурі частинок порошоків, розпорошених з меншою швидкістю обертання і нижчою енергією плазмоутворювальної газової суміші від оптимізованих, розміри частинок порошку часто перевищували 100 мкм, мали сателіти на своїй поверхні.

Слід зазначити, що на сьогоднішній день норми на тип мікроструктури матеріалу та розміри структурних складових усередині частинок порошоків адитивного призначення відсутні. Їх, можливо, належить встановити за умови забезпечення всіх інших параметрів якості порошоків. Це може стати новим напрямком подальших розробок у галузі матеріалознавства та адитивних технологій. Тому, в рамках даної роботи критерієм придатності порошку були відповідність заданої фракції та відсутність дефектів на поверхні та всередині частинок, а мікроструктура розглянута в порівняльному порядку різних режимів розпилення.



а, б – груба дендритна будова; в – частинка із сателітом

Рисунок 4.10 – Мікроструктури ($\times 200$) частинок порошоків, розпиленних з недостатньою швидкістю обертання та низькою енергією плазмоутворюючих газів

При критично недостатній швидкості обертання заготовки і вмісті понад 50 % аргону, який менш теплопровідний, ніж гелій, енергії плазми ставало недостатньо і

метал на розплавленому торці не зазнавав розпилення з формуванням дисперсних глобулярних частинок, а розтікався по краях витратної заготовки, що обертається, утворюючи після охолодження «корону» на її торці (рисунок 4.11).

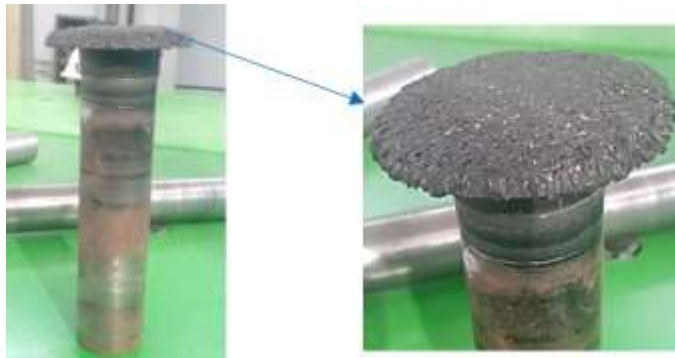


Рисунок 4.11 – Дефект у вигляді «корони» з розплавленого металу на торцевій поверхні заготовки після ротаційного плазмового розпилення

Гранулометричний склад порошків на установці УЦР-4 після модернізації контролюється протягом всього технологічного циклу, а чистота газового складу по кисню підтримується герметичною конструкцією робочої камери та системою його багаторазового використання (рециркуляція).

Вміст кисню в порошках жароміцних нікелевих і титанових сплавів не повинен перевищувати його вміст у вихідній заготовці, що розпилюється – це один з найважливіших показників якості виробу. У частинках порошку кисень може міститися як в об'ємі металу (розчинений), так і на поверхні у складі окисної плівки. Основна причина підвищення вмісту кисню у виготовленому порошку – недостатньо чиста атмосфера при розпиленні. З метою запобігання натіканню кисню або зведення його до мінімуму розроблено комплекс технологічних заходів, що включає:

- 1) прогрівання камери розпилення;
- 2) часткове розпилення частини електрода, що витрачається, великою фракцією з навмисним її окисненням киснем, що залишився в камері з подальшим її видаленням з партії.

Прогрів попередньо очищеної від відгонів камери розпилення гарячою водою (90°C) при вакуумуванні установки забезпечує перебіг процесу десорбції та видалення газових домішок. Одночасно здійснення цього заходу дозволило

зменшити вміст вологи в атмосфері розпилення. Зазначені міроприємства дозволили знизити концентрацію кисню в порошках.

Таблиця 4.12 – Вміст кисню в порошках і витратних електродах

Марка сплаву	Стан сплаву	Вміст кисню % ваг.
Ti-6Al-4V	вихідний пруток	0,30
	порошок	0,21
Inconel 718	вихідний пруток	0,15
	порошок	0,15
ВЖ98	вихідний пруток	0,10
	порошок	0,12

Для очищення атмосфери розпилення запропоновано перед виготовленням порошку промислової крупності проводиться розпилення 1/3 першої заготовки для отримання крупного порошку. Цей порошок окислюється залишками домішок кисню та вологи в атмосфері розпилення, очищуючи атмосферу, і виводиться з установки, не забруднюючи промислову партію. Якщо деяка кількість цього порошку залишиться в установці і потрапить в основну масу, то при розсіванні, при цьому більші частинки, будуть видалені. Ступінь чистоти порошку по домішковому кисню знаходилася приблизно на рівні чистоти використовуваних заготовок або мала менші значення, ніж у вихідному прутку, що можна пояснити вакуумуванням камери для розпилення та випаровуванням газових домішок. Розроблена технологія розпилення в герметичній установці та використання чистого інертного газу, застосування рециркуляції його забезпечувало відсутність окислення металу, що може мати місце у вихідній заготовці, яка розпилюється. В результаті проведених заходів чистота газового середовища, в якому проводять усі роботи з плазмової плавки та відцентрового розпилення, підвищена в 2,5 рази. Зазначений комплекс заходів дозволив знизити вміст кисню в порошках жароміцних нікелевих сплавів і його вміст у частинках порошку наблизився до концентрації його в заготовці, що

розпилюється. Такий процес дозволяв отримувати порошки високочистих металів та сплавів, оскільки розпилення відбувається після попереднього вакуумування камери та подальшого заповнення камери високочистими інертними газами. Виготовлені порошки характеризувалися сферичною формою та гладкою поверхнею. В результаті виконаних досліджень розроблені спеціальні технічні умови (окремо для жароміцних нікелевих сплавів і для титанових сплавів) та впроваджені на підприємстві АТ «Мотор Січ». Розроблені технічні умови (додатки К, Л) регламентують вимоги до хімічного складу та технологічних властивостей порошків.

Таким чином, мікроструктурний стан і хімічна однорідність частинок, відсутність газонасичення порошків і неметалевих включень показали, що модернізоване обладнання та розроблені технологічні режими дозволяють виготовляти якісні сферичні дисперсні порошки для застосування в адитивних технологіях виготовлення різних деталей.

4.3 Висновки по розділу 4

Методами активного експерименту отримані регресійні залежності впливу швидкості обертання витратного електроду та вмісту гелію в плазмоутворюючій газовій суміші на фракційний склад порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V, що дозволяють прогнозувати розмір порошків і одержувати в результаті ротаційного плазмового розпилення максимальну кількість порошку необхідної фракції.

Розроблено вдосконалену технологію ротаційного плазмового розпилення нікелевих жароміцних та титанових сплавів за рахунок підвищення потужності плазми в поєднанні із збільшенням швидкості обертання витратної заготовки. Потужність плазми підвищували в результаті введення до аргона гелію в оптимальному співвідношенні.

Визначені технологічні режими одержання сферичних порошків із жароміцних сплавів зі сплавів Inconel 718, ВЖ98 та Ti-6Al-4V різного фракційного складу, оптимального під конкретну технологію 3D-друк деталей (лазерне сплавлення, мікроплазмове та електронно-променеве пошарове формування виробу).

Експериментально підтверджено, що конструктивні зміни в комплексі з оптимізацією технологічних параметрів розпилення забезпечили необхідну якість порошків з виходом годного порошку до 93 %. Розроблені спеціальні технічні умови (окремо для жароміцних нікелевих сплавів і для титанових сплавів) та впроваджені на підприємстві АТ «Мотор Січ», що регламентують вимоги до хімічного складу та технологічних властивостей порошків.

Порошки, виготовлені згідно оптимізованим технологічним параметрам, відповідали критеріям якості порошків адитивного призначення: хімічний склад виготовлених порошків знаходився в межах норм для сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V. Частинки порошку мали правильну форму без «сателітів», характеризувались відсутністю внутрішньої пористості та неметалевих включень, розмір частинок порошку відповідав заданому рівню дисперсності.

РОЗДІЛ 5. ЗАСТОСУВАННЯ СФЕРИЧНИХ ПОРОШКІВ ЖАРОМІЦНИХ СПЛАВІВ ДЛЯ ВИГОТОВЛЕННЯ ДЕТАЛЕЙ АДИТИВНИМИ ТЕХНОЛОГІЯМИ

Як вже зазначалося в попередніх розділах, розміри сферичних порошків та вибраний метод їх консолідації технологіями 3D-друку впливають на шорсткість поверхні виробів. Деталі з більш високою чистотою поверхні формуються при використанні більш дисперсних сферичних порошків. З більш крупної фракції порошків, як правило, отримують більш шорсткі деталі. Також на ці параметри впливає теплова енергія, яка використовується в адитивній технології (лазер, електронний промінь, мікроплазма).

З приводу вивчення впливу технологічних режимів електронно-променевого процесу на стан поверхні виробу багато робіт проведено в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона НАН України, в тому числі, за участю здобувача [123]. Крім шорсткості, від розмірів порошків залежить інтенсивність їх проплавлення. Крупні частинки можуть не розплавлятися, що сприяє мікропористості виробу. Від розміру частинок порошку можуть залежати розміри структурних складових у готовому виробі (ефект структурної спадковості).

У зв'язку з цим важливо враховувати потужність джерела енергії обраного методу 3D-друку для виготовлення деталі і вибір для цього методу оптимальних розмірів частинок вихідного порошку. Інтерес також викликає можливість формування деталі з двох і більше фракцій порошку або різних сплавів у різних її зонах – застосування порошкових композицій тощо.

У цьому розділі представлені результати практичного застосування порошків, отриманих за розробленими технологічними режимами, для виготовлення дрібно-, середньо- та великогабаритних деталей різними методами 3D-друку та результати їх впровадження у виробництво, створення технічної документації на їх одержання. Застосування адитивних технологій в авіабудуванні має не лише позитивний вплив на технологічні аспекти виробництва деталей, але й сприяє швидкому зростанню ефективності цієї галузі.

5.1 Виготовлення малогабаритної деталі з високим коефіцієнтом складності форми «Завихрювач» зі сплаву Inconel 718 лазерним 3D-друком

Завихрювач є відповідальною деталлю ГТД, від правильної роботи якої залежить швидкість запуску газотурбінного двигуна. Завихрювач – це деталь камери згоряння, що приєднується пайкою в кількості чотирнадцяти деталей до жарової труби. Завихрювач має специфічну форму із тонкими стінками та внутрішніми каналами-порожнинами, яку найчастіше традиційно виготовляють високовартісною ливарною технологією із подальшим зварюванням його частин. В свою чергу, адитивне пошарове виготовлення даної деталі дозволяє підвищити коефіцієнт використання матеріалу, внутрішні порожнини друкуються на заміну хімічного витравлювання керамічних стрижнів та подальшої механічної обробки.

Розвиток 3D-принтерів призвів до появи різних способів реалізації методів пошарового створення об'єктів. Ці технології змінили підхід до планування промислового виробництва, даючи змогу виготовляти деталі з високим коефіцієнтом складності форми, їх прототипи, функціональні вироби, деталі авіадвигунів, малоресурсних газотурбінних двигунів тощо.

До таких деталей належить деталь паливної системи ГТД – завихрювач, що має повітряний канал, крізь який проходить повітря та закручується розпилене паливо з відцентрової форсунки колектора та паливоповітряний канал, у який впорскується паливо із струминної форсунки і розпилюється всередині каналу.

Виготовлення завихрювача традиційною ливарною технологією складається з багатьох операцій, до яких належать виготовлення ливарної моделі, обрубкування, зачищення облою. Механічній обробці підлягають зони, призначені для встановлення паливної форсунки додаткового колектора та місця кріплення.

Однією з головних проблем для застосування порошку є відсутність стандартизованих методів і рекомендацій для промислових підприємств. Різні постачальники можуть мати різні вимоги та специфікації щодо якості порошку. Крім того, різні галузі машинобудування можуть мати різні стандарти та правила щодо

якості деталей і сертифікації. Тому важливо встановити чіткі та послідовні критерії для управління порошком, які можуть забезпечити якість та надійність металевих виробів, надрукованих лазерним сплавленням порошку [124]. Отже, для адитивного виготовлення завихрювача за прогресивною технологією лазерного сплавлення порошоків першим етапом став вибір раціонального фракційного складу порошку зі сплаву Inconel 718. Правильний вибір дисперсності порошку впливає на технологічні особливості 3D-друку, оскільки визначає технологічні властивості сферичних порошоків – насипна щільність, текучість.

Враховуючи ці параметри, на підприємстві здійснювалось налагодження швидкості внесення порошку і потужності для розплавлення, від яких також залежала тривалість процесу, шорсткість поверхні виготовленої деталі. До того ж, вибір вихідного порошку має вплив на адгезію першого шару. Низький показник адгезії першого шару може призвести до деформації моделі, відшарування від платформи та ін., тому важливо одразу сформувати щільний шар, що сплавляється з наступним.

Досліджували вплив фракційного складу вихідного порошку зі сплаву Inconel 718 на характеристики (текучість χ , і насипна щільність ρ), від яких залежали налаштування принтеру. Для відпрацювання процесу лазерного друку завихрювачів обрані різні фракції порошку сплаву Inconel 718, наведені в таблиці 5.1. Із порошоків надруковані дослідні призматичні зразки, що підлягали всебічному дослідженню якості матеріалу.

Таблиця 5.1 – Властивості сферичних порошоків зі сплаву Inconel 718

Фракція порошку, мкм	Насипна щільність, (ρ) г/см ³	Текучість, (χ), секунди
20...40	5,1	11,2
30...45	4,9	12,0
45...60	2,9	12,2
60...100	2,2	18,0

Із даних таблиці 5.1 можна зробити висновок, що найвища насипна щільність і

відповідно ущільнюваність порошку в процесі лазерного плавлення відповідає високодисперсному порошку фракцією 20...40 мкм. При цьому текучість порошку з найменшим розміром частинок в 1.6 разів нижча за текучість найбільш крупного порошку. Тому в якості порошку, що задовільняв би вимогам до швидкості подачі порошку, що залежить від текучості, а також мав достатню насипну щільність, обрано порошки дисперсністю 45...60 мкм. Застосування порошоків діаметром крупніше за 100 мкм призводило до формування незадовільної поверхні виробу, що проявлялася у підвищеній шорсткості і наявності мікропор на поверхні деталі.

Отже, для 3D-друку деталі ГТД «Завихрювач» використовували сферичний порошок дисперсністю 45...60 мкм із нікелевого сплаву Inconel 718, виготовлений за розробленими здобувачем технологічним режимом ротаційного плазмового розпилення: швидкість обертання 30 тис. хв⁻¹, газова суміш 40 % Ar + 60 % He, напруга 50 В, сила струму 1200 А, потужність плазмотрону 65 кВт.

Хімічний склад порошку, що використовується для виробництва завихрювачів, наведено в таблиці 5.2.

Таблиця 5.2 – Фактичний хімічний склад порошку зі сплаву Inconel 718

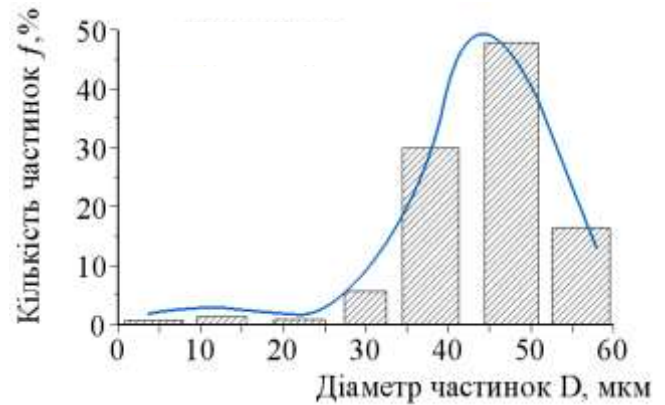
Вміст елементів, % ваг.								
Ni	Nb	Mo	Fe	Cr	Ti	Al	Si	Co
53,26	65,43	3,42	17,89	17,37	1,05	0,41	0,16	0,13
54,10	62,50	3,62	17,50	16,97	1,10	0,40	0,14	0,13
53,00	64,31	3,55	18,0	17,22	1,00	0,39	0,15	0,12
середні значення в розпиленій партії:								
53,45	64,08	3,53	17,79	17,19	1,03	0,40	0,15	0,126

Із результатів, наведених в таблиці 5.1 випливає, що хімічний склад порошку відповідав вимогам спеціальних технічних умов підприємства.

Порошок для лазерного друку завихрювачів підлягав оцінці зовнішнього стану (рисунок 5.1 а) та визначенню переважаючого розміру частинок на гістограмі розподілу (рисунок 5.1 б). При цьому встановлено, що найбільша кількість частинок мала розміри в межах 40...60 мкм.



а



б

Рисунок 5.1 – Зовнішній вигляд (а) та оцінка розмірів (б) порошку зі сплаву Inconel 718, використаного для лазерного друку завихрювача

Лазерний друк завихрювачів проводився на установці «EOSM400» методом селективного лазерного спікання (SLS). Попередньо друкувалась модель деталі із пластику, потім виготовлення здійснювали в металі (рисунок 5.2). Результати апробації виготовлених порошків для лазерного друку деталей підтверджені актами (Додатки Б, Д). Суть процесу полягала у послідовному розплавленні порошкового матеріалу за допомогою потужного лазера. Спочатку на поверхні робочої платформи спеціальним пристроєм формується рівномірний шар порошку. Потім лазер високої потужності через систему дзеркал будує створену модель. Потужність лазера підбиралася так, щоб частинки металевого порошку сплавлялися повністю в однорідний стан матеріалу.

Після формування шару металу робоча платформа зміщувалась на висоту наступного шару, а інша платформа порошку піднімалась. Так відбувалось, доки виріб не буде вирощено в повній мірі. В результаті отримано готову деталь – завихрювач, який підлягав перевірці параметрів якості, зокрема, металографічному дослідженню матеріалу на предмет наявності мікропор та ін. мікродфектів. Внутрішня будова виготовленого завихрювача в різних перетинах представлена на рисунку 5.3.

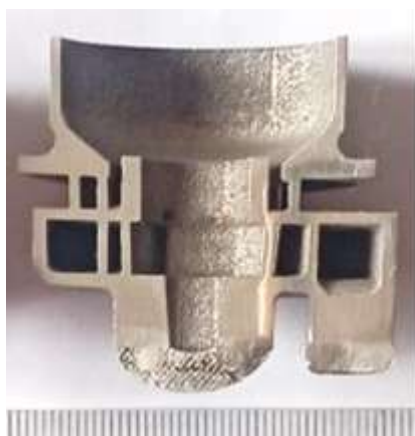


а



б

Рисунок 5.2 – Вид надрукованої моделі завихрювача із пластику (а) та надрукована деталь зі сферичного порошку зі сплаву Inconel 718



а



б

а – в осьовому перетині; б – в горизонтальному перетині

Рисунок 5.3 – Макроструктура надрукованого завихрювача зі сплаву Inconel 718

Результати металографічного дослідження завихрювача мали позитивну оцінку: матеріал створеної деталі щільний, однорідний, пори та інші несучільності, включення не виявлені. Одночасно із деталлю «Завихрювач» вирощували зразки-свідки призматичної форми розмірами $15 \times 15 \times 60$ мм для визначення механічних властивостей отриманого із порошку монолітного матеріалу. Результати механічних випробувань задовільні і відповідали вимогам встановлених стандартів, представлені в таблиці 5.3.

Таблиця 5.3 – Механічні властивості матеріалу зразків-свідків, отриманих лазерним 3D-друком із порошку сплаву Inconel 718

Б _B , МПа	Б ₀₂ , МПа	δ, %	ψ, %
Фактичні результати (середні значення):			
1489,0	1278,0	15,2	25,8
Вимоги технічних умов підприємства:			
≥ 1276,0	≥ 1274,0	≥ 12,0	≥ 15,0

Застосування даної технології дозволило скоротити час на конструктивне відпрацювання та на оптимізацію форми і розмірів деталі між циклами натурних випробувань, не потребувало додаткової підготовки виробництва, оскільки проєктування відбувалось згідно комп'ютерної моделі. Завдяки зміні конструкції з трьох частин завихрювача на одну цільну відповідно скоротилася номенклатура деталей, що входять до складу камери згоряння ГТД. При цьому вартість деталі зменшилась приблизно на 70 %, що скоротило виробничі витрати удвічі.

Метод SLS має значні переваги, серед яких важливе місце займає скорочення кількості необхідних операцій фінішної обробки. Також при виготовленні лазерним 3D-друком з'являється можливість здійснення контролю над розподілом порошків за хімічним складом та мікроструктурою шляхом друку за оптимізованими параметрами. Після завершення друку з готової деталі видаляються опори, які підтримували деталь під час цього процесу.

Результати оцінки експлуатаційних показників нового завихрювача, виготовленого лазерним друком, полягали у визначенні обсягу витрат повітря. При цьому встановлено, що відбулось покращення цього показника в тому числі за рахунок більш стабільної геометрії деталі. Також при новій технології виготовлення завихрювачів стало можливим зниження подальших постобробних етапів до 40 %.

Таким чином, в результаті порівняння існуючої та нової технологій виготовлення завихрювача, визначено переваги селективного лазерного 3D-друку, представлені нижче.

1. Зниження витрат і часу на виготовлення деталі.

Монолітний завихрювач знижував виробничі витрати на 60 %. Вилучення етапів традиційного ливарного та зварювального процесу також дозволило на 30 % скоротити час на виготовлення деталі. Надрукований завихрювач успадковує високу якість сферичного порошку для 3D-друку.

2. Стабілізація розмірів.

Селективне лазерне спікання сприяє стабільності геометрії завихрювача, підвищено коефіцієнт використання матеріалу.

3. Можливість швидко вносити зміни у конструкцію

Технологія SLS дає можливість вносити конструктивні зміни, які були б неможливі при виготовленні литвом та технологією зварювання. Це пов'язане із тим, що при лазерному друці ці зміни вимагають менших витрат часу та засобів, що дозволяє доопрацювати деталь. Завдяки цьому процес селективного лазерного спікання може бути використана для виготовлення невеликої кількості одиниць деталей, а також для крупносерійного виробництва.

5.2 Виготовлення середньогабаритних виробів із порошку нікелевого сплаву ВЖ98 із застосуванням технології мікроплазмового пошарового наплавлення

Однією з основних переваг адитивних технологій є висока точність виготовлення виробів. Проте, така точність не завжди вимагається від виробу і в ряді випадків може досягатися комплексом адитивного наплавлення і механічної обробки. Одним із шляхів подальшого зниження вартості металевих 3D виробів із одночасним підвищенням продуктивності їх виготовлення є застосування дугових методів адитивного наплавлення металів, до яких належить мікроплазмове порошкове наплавлення. В свою чергу, адитивний мікроплазмовий 3D-друк металевими порошками є інноваційною технологією на основі зварювання, яка дозволяє створювати деталі середніх габаритів зі зниженою вартістю. Склад

матеріалів підкладки і наплавочних порошкових матеріалів наведені у таблиці 5.4. Основним завданням даної роботи стало адитивне вирощування заготовок деталей ГТД методом плазмового наплавлення згідно комп'ютерної моделі на заміну традиційної заготовки під механічну обробку – поковки.

Таблиця 5.4 – Хімічний склад порошку зі сплаву ВЖ98

Склад елементів, ваг. %									
Fe	Ti	C	Si	Mn	Ni	Cr	W	P	S
Фактичний склад матеріалу порошку:									
1,1	0,4	0,02	0,2	0,23	Основа	24,3	14,8	0,001	0,001
Норми для сплаву ВЖ98, що діють на підприємстві:									
<4,0	0,3-0,7	<0,1	<0,8	<0,5	Основа	23,5-26,5	13,0-16,0	<0,013	<0,013

Як об'єкт для вирощування обрані корпусні деталі ГТД у формі кільця типу фланець. Основна мета полягала у розробці технології адитивного вирощування методом мікроплазмового наплавлення порошком із жароміцного нікелевого сплаву ВЖ98.

Для цього проводили дослідження впливу розміру присадкових порошків на технологічні параметри процесу мікроплазмового 3D-друку, кінцевою метою якого став правильний вибір фракційного складу порошку для даної адитивної технології. Результати експерименту по визначенню впливу фракційного складу присадкових порошків зі сплаву ВЖ98 на технологічні параметри наведено в таблиці 5.5.

Таблиця 5.5 – Вплив фракційного складу порошків зі сплаву ВЖ98 на технологічні показники

Фракція порошку, мкм	Насипна щільність, (ρ) г/см ³	Текучість, (χ), с	Витрати порошку, г/хв
50...100	4,5	11	2,6
64...80	4,0	15	3,0
85...110	2,5	19	3,9

З даних таблиці 5.5 видно, що тенденція, визначена для більш порошків зі сплаву Inconel 718 спостерігалась також для порошків зі сплаву ВЖ98. Чим менше розмір фракції порошку, тим вища насипна щільність і нижча текучість. Від текучості присадкового порошку також залежить технологічна характеристика обладнання мікроплазмового наплавлення – витрати матеріалу. До того ж вартість сферичних порошків із нікелевих сплавів авіаційного призначення, є суттєво вищою для високодисперсних фракцій (20...40 мкм). Отже, враховуючи, що наплавочні порошки для мікроплазмового вирощування заплановано використовувати для деталей середніх габаритів зі зниженою вартістю, то необхідно мінімізувати їх витрати і вартість при забезпеченні задовільної якості консолідованого матеріалу.

Для мікроплазмового формоутворення деталі застосовувались порошки фракцією +64...80 мкм із вказаного сплаву (рисунок 5.4), виготовлені за технологією ротаційного плазмового розпилення згідно розробленим технологічним режимам (див. розділ 3 даної роботи): швидкість обертання розпилюваної заготовки 20 тис. хв⁻¹, газова суміш 40 % Ar + 60 % He, напруга 50 В, сила струму 1200 А, потужність плазмотрону 65 кВт.

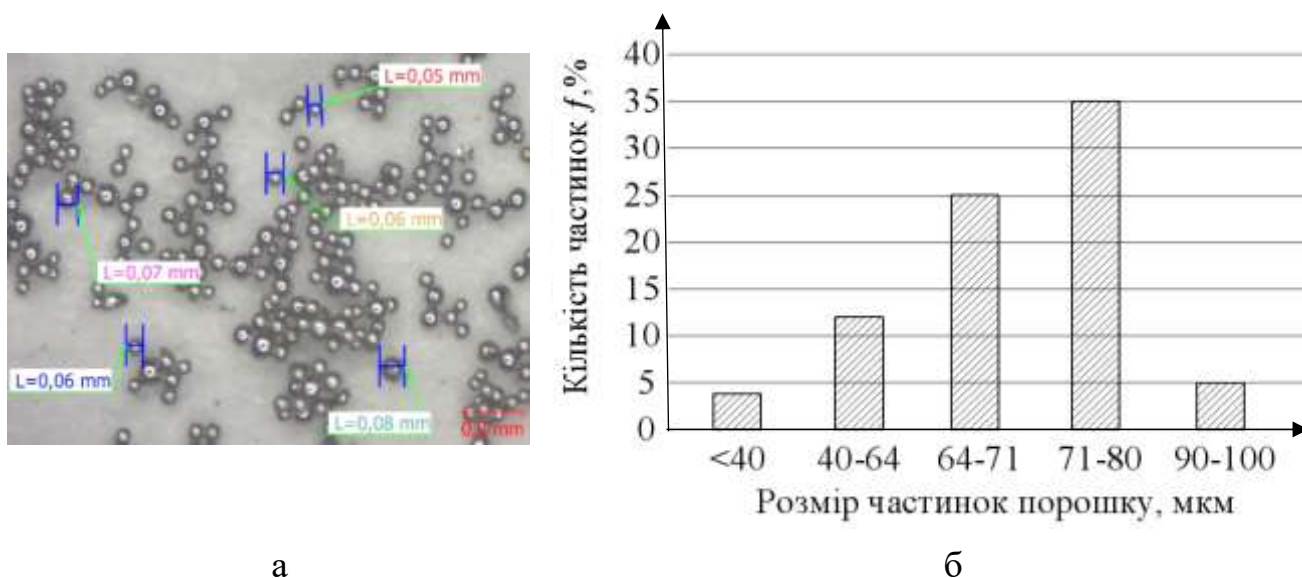


Рисунок 5.4 – Зовнішній вигляд (а) та оцінка розмірів (б) порошку зі сплаву ВЖ98 в пробі від партії розпиленого порошку

Процес мікроплазмового вирощування кільцевої заготовки здійснювали в Інституті електрозварювання ім. Є. О. Патона на установці МПУ-4.

Витрати присадкового порошку складали $G = 3,0$ г/хв. В якості мікроплазмового джерела живлення використовували обладнання «Tetrix 421 AC/DC» (фірма EWM GmbH, Німеччина), що передається через плазмовий модуль із регулювання струму в діапазоні 5-50 А. В результаті виготовлена кільцева заготовка, представлена на рисунку 5.5.



Рисунок 5.5 – Зовнішній вигляд (а) та мікроструктура (б) кільця зі сплаву ВЖ98, вирощеного адитивним мікроплазмовим наплавленням

Мікроструктура матеріалу вирощеного кільця, досліджена на поперечному шліфі. Мікроаналіз показав, що мікроструктура кільця характеризувалась зернами γ -твердого розчину, витягнутими в напрямку відведення тепла в процесі вирощування, лінії сплавлення, з наявністю інтерметалідів, карбідів, а також дефекти у вигляді неметалевих включень, ліквіаційних неоднорідностей в структурі кільця не виявлені (рисунок 5.5).

Механічні властивості матеріалу виготовленого кільця (таблиця 5.6) визначали на зразках, що підлягали стандартній термообробці по режиму: відпал $T = 1190^{+10}$ °С, витримка 1 год., охолодження на повітрі.

Таблиця 5.6 – Механічні властивості матеріалу кільця зі сплаву ВЖ98, вирощеного мікроплазмовим наплавленням

БВ, МПа	δ, %	Час до руйнування, год. при T=730 °C, σ = 186,2 МПа
647,8	59,2	147 ³⁰
605,6	51,2	102 ⁰⁰
583,1	64,8	246 ⁰⁰
Середні значення:		–
612,2	58,4	–
Вимоги спеціальних технічних умов для сплаву ВЖ98Л		
≥ 490	≥ 35,0	≥ 40,0

Механічні властивості матеріалу заготовки, вирощеної мікроплазмовим наплавленням, відповідають вимогам нормативної документації для литого сплаву, що підлягав стандартній термообробці. В результаті застосування сферичних порошків фракцією 80...130 мкм зі сплаву ВЖ98 відпрацьовано технологію адитивного вирощування методом плазмового порошкового наплавлення заготовок кільця, що входить до складу турбіни двоконтурного турбореактивного двигуна та впроваджено в серійне виробництво.

5.3 Виготовлення крупногабаритних корпусних деталей із титанового сплаву Ti-6Al-4V електронно-променевим 3D-друком

Спершу дослідженню підлягали спеціально вирощені зразки квадратного та круглого перетину, призначені для виготовлення з них зразків для механічних випробувань. Зразки одержували як циліндричні (діаметром 14 мм), так і призматичної форми (в перетині 16 мм × 16 мм). Довжина зразків становила 60 мм. Побудову зразків на 3D-принтері здійснювали у напрямку вісі Z. На іншому етапі вирощували кільцеву заготівку деталі типу «Проставка», «Фланець». Фракції

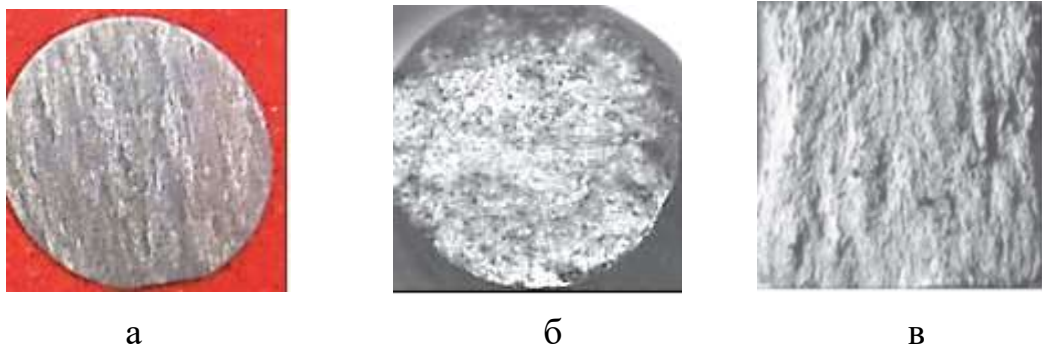
порошків, що апробовані при виготовленні зразків, становили 45...105 мкм, 100...120 мкм і 140...180 мкм. Вивчали їх вплив на насипну щільність і текучість порошків із титанового сплаву Ti-6Al-4V з метою вибору оптимального діапазону розмірів для електронно-променевого пошарового вирощування деталі. Для цього використовували серію зразків, що отримані електронно-променевим друком із порошків різних фракцій. Наукові основи вибору фракційного складу титанових порошків на стан поверхні і якість матеріалу, сформованого електронно-променевою технологією, закладені розробниками цієї технології – Інститутом електрозварювання ім. Є. О. Патона, результати цих розробок детально описані в роботах Нестеренкова В.М., Матвійчука В.А. [125, 126]. В таблиці 5.7 представлені результати визначення текучості і насипної щільності порошків зі сплаву Ti-6Al-4V дослідних фракцій. Для здійснення процесу електронно-променевого вирощування заготовки в якості витратного матеріалу використовували дисперсний сферичний порошок (розмір гранул 45...105 мкм) титанового сплаву Ti-6Al-4V, виготовлений методом ротаційного плазмового розпилення компанією ТОВ «Мультифлекс» згідно технологічному режиму, визначеному шляхом оптимізації, виконаної в розділі 3 даної роботи. Порошок, використаний для дослідних робіт, отримав позитивну оцінку від замовника (Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона) та використовується для виробництва серійних деталей ГТД. Акти впровадження наведено в додатках В, Г.

Таблиця 5.7 – Технологічні характеристики ЕЛН залежно від текучості та насипної щільності порошків зі сплаву Ti-6Al-4V та їх вплив на стан поверхні

Фракція порошку, мкм	Насипна щільність, (ρ) г/см ³	Текучість, (χ), секунди	Стан поверхні Зразка	Швидкість електронного променя, мм/с	Густина енергії променя, Дж/мм ³
45...105	3,1	14	згладжений	250	30
100...120	1,7	19	шорсткий	500	30
140...180	0,9	24	бугристий	1500	50

Отже, із даних таблиці 5.7 можна зробити висновки про те, що технологічні характеристики присаджувального порошку із титанового сплаву Ti-6Al-4V впливали на технологічні параметри процесу електронно-променевого адитивного наплавлення: зі збільшенням крупності гранул порошку потребувалось вища швидкість електронного променя і, як наслідок, більша густина енергії електронного променя. При цьому слід також враховувати стан поверхні виготовлених зразків, який умовно поділено на «шорсткий» (незадовільний), «згладжений» (задовільний) та бугристий (незадовільний). Оптимальним з точки зору задовільної гладкої поверхні та технологічним характеристикам електронно-променевого процесу для виготовлення дослідних кільцевих заготовок обрані порошки фракцією 45...105 мкм.

Макроструктура зразків, виготовлених електронно-променевим наплавленням, характеризується проявом макрозерна 1...3 балів при оцінюванні за шкалою макроструктур, прийнятої для титанових сплавів в авіаційній промисловості (рисунок 5.6 а). Тріщин, розшарувань, неметалевих включень, що не допускаються, зон ліквідаційного походження, що видимі неозброєним оком, у макроструктурі досліджуваних зразків не виявлено. Фрактографічне дослідження показало, що злами ударних та розривних зразків характеризуються дрібнокристалічною будовою (рисунок 5.6 б-в).



а – травлений шліф; б, в – поверхні руйнування зразків після механічних випробувань

Рисунок 5.6 – Досліджені зразки із титанового сплаву Ti-6Al-4V, виготовлені із заготовки, вирощеної електронно-променевим друком

Мікроструктура зразків складається із β -перетворених зерен, в середині яких знаходяться виділення пластинчатої α -фази (рисунок 5.7). Така мікроструктура є характерною для сплаву Ti-6Al-4V, що попередньо нагрівався до температур існування β -фази (рисунок 5.7)..

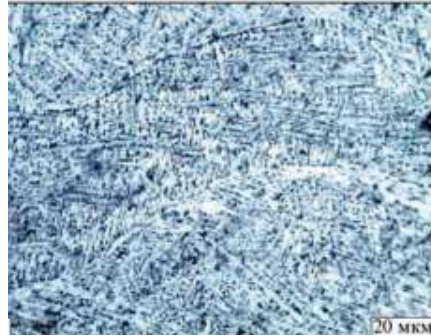


Рисунок 5.7 – Мікроструктура матеріалу зразків, виготовлених електронно-променевим 3D-друком із порошку сплаву Ti-6Al-4V

При багат шаровому мікроплазмовому наплавленні не виявлено таких дефектів, як поділ суміжних шарів усередині наплавлення через неповне розплавлення між шарами, затвердіння розплавленого матеріалу у вигляді сфер, а не суцільного шару, деформування через відмінність коефіцієнтів теплового розширення шарів металу

Зони сплавлення між шарами структурно не виявляються, в зразку спостерігається однорідна структура. Макроструктура кожного оплавленого шару не мала розтріскувань, неповного розплавлення між шарами тощо.

Результати механічних випробувань [127] виготовлених зразків із титанового сплаву представлені в таблиці 5.8.

Таблиця 5.8 – Механічні властивості матеріалу зразків, виготовлених електронно-променевим 3D-друком зі сплаву Ti-6Al-4V

Продукція	σ_B , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	КСУ, Дж/см ²
стандартний пруток AMS 4928	860	790	15	32,1
електронно-променевий друк	1032	973	12	47,9

Механічні властивості зразків, отриманих лазерним вирощуванням із порошку, відповідали вимогам стандарту AMS 4928, що застосовуються при виготовленні відповідальних деталей авіаційного призначення.

Для вирішення поставлених завдань було проведено дослідження на базі малогабаритної установки для електронно-променевого зварювання типу СВ-212М з імпульсним джерелом живлення 60 кВ / 60 кВт, електронно-променевою гарматою ЕЛА-60 та пакетом прикладних програм для керування процесом 3D-друку. Обладнання та програмне забезпечення розроблено в Інституті електрозварювання ім. Є.О.Патона. Вакуумна система забезпечує величину вакууму в камері до 10^{-4} . Процес електронно-променевого наплавлення відбувається у вакуумній камері 3D-принтера (рисунок 5.8).



Рисунок 5.8 – Виріб у вакуумній камері 3D-принтера (а) та зовнішній вигляд виробу, отриманого електронно-променевим друком із застосуванням порошку сплаву Ti-6Al-4V

Заготовка виробу у формі порожнистого циліндра (рисунок 5.10) вирощена пошарово у вакуумній камері при величині вакууму до 10^{-4} . Кожен нанесений шар порошку попередньо розігрівався під впливом електронного розфокусованого пучка, після чого проплавлявся сфокусованим електронним променем. Виконано адитивне електронно-променево наплавлення виробів заданої форми.

Позитивні результати апробації та впровадження порошків власного виробництва дозволили замінювати імпортні порошки на вітчизняні. Використання виготовлених за удосконаленими режимами порошків жароміцних сплавів сприяли впровадженню нових адитивних технологій виготовлення деталей ГТД у серійне

виробництво (лазерний друк завихрювачів, електронно-променеве та мікроплазмове вирощування деталей кільцевої форми).

5.4 Висновки до розділу 5

На підставі досліджень впливу фракційного складу сферичних порошків на технологічні параметри адитивних методів 3D-друку встановлено, що для лазерного принтингу деталей необхідний порошок розмірами 20...50 мкм із насипною щільністю $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3$ і текучістю $\chi = 12,2 \text{ с}$. Для мікроплазмового вирощування – порошки фракцією 100...120 мкм ($\rho = 4,0 \text{ г/см}^3$, $\chi = 15,0 \text{ с}$) та електронно-променевого пошарового формоутворення виробів більш ефективно при використанні порошків 45...105 мкм ($\rho = 3,1 \text{ г/см}^3$, $\chi = 14 \text{ с}$). Використання порошків із такими технологічними характеристиками забезпечувало формування виробів без дефектів поверхні та в макроструктурі. При цьому рівень механічних властивостей відповідав стандартам згідно технічних вимог креслень деталі, виготовленої традиційним шляхом (литво, деформація).

ВИСНОВКИ

1. Виконано порівняльний аналіз технологій та обладнання, що застосовується для виготовлення дисперсних металевих порошків сферичної форми. Обґрунтовано доцільність модернізації обладнання ротаційного плазмового розпилення порошків для потреб адитивного виробництва деталей авіадвигунів.

2. Удосконалено технологічне обладнання для ротаційного плазмового розпилення порошків, що дозволило підвищити швидкість обертання розпилюваної заготовки і зменшити зношування деталей в умовах критичних швидкостей обертання.

Модернізація обладнання полягала в розробці нової кінематичної схеми механізму обертання витратного електроду та конструктивних змінах вузла фіксації заготовки притискним роликом – це шпindelне закріплення і нові підшипники із додатковим змащенням, що захищало їх від перегріву. В результаті розроблено нову конструкторську документацію (креслення зі змінами різних вузлів установки УЦР-4), згідно з якими виготовлено нові деталі та вузли.

3. Методами активного експерименту отримані регресійні залежності впливу швидкості обертання витратного електроду та вмісту гелію в плазмоутворюючій газовій суміші на фракційний склад порошків зі сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V, що дозволяє прогнозувати розмір порошків і одержувати в результаті ротаційного плазмового розпилення максимальну кількість порошку необхідної фракції.

4. Розроблено вдосконалену технологію ротаційного плазмового розпилення нікелевих жароміцних та титанових сплавів за рахунок підвищення потужності плазми в поєднанні зі збільшенням швидкості обертання витратної заготовки. Потужність плазми підвищували шляхом змін її теплофізичних властивостей в результаті введення до аргону гелію в оптимальному співвідношенні.

Визначені технологічні режими одержання сферичних порошків із жароміцних сплавів Inconel 718, ВЖ98 та Ti-6Al-4V різного фракційного складу, оптимального

під конкретну технологію 3D-вирощування деталей (лазерне сплавлення, мікроплазмове та електронно-променеве пошарове формування виробу).

5. Експериментально підтверджено, що конструктивні зміни в комплексі з оптимізацією технологічних параметрів розпилення забезпечили необхідну якість порошків з виходом годного до 93 %. Розроблені спеціальні технічні умови (окремо для жароміцних нікелевих сплавів і для титанових сплавів) та впроваджені на підприємстві АТ «Мотор Січ», що регламентують вимоги до хімічного складу та технологічних властивостей порошків.

Порошки, виготовлені згідно оптимізованим технологічним параметрам, відповідали критеріям якості порошків адитивного призначення: хімічний склад виготовлених порошків знаходився в межах норм для сплавів Inconel 718, ВЖ98, Ti-6Al-4V. Частинки порошку мали правильну форму без «сателітів», характеризувались відсутністю внутрішньої пористості та неметалевих включень, розмір частинок порошку відповідав заданому рівню дисперсності.

6. На підставі досліджень впливу фракційного складу сферичних порошків на технологічні параметри адитивних методів 3D-друку встановлено, що для лазерного принтингу деталей необхідний порошок розмірами 20...50 мкм із насипною щільністю $\rho = 2,9 \text{ г/см}^3$ і текучістю $\chi = 12,2 \text{ с}$. Для мікроплазмового вирощування – порошки фракцією 100...120 мкм ($\rho = 4,0 \text{ г/см}^3$, $\chi = 15,0 \text{ с}$) та електронно-променеве пошарове формоутворення виробів більш ефективно при використанні порошків 45...105 мкм ($\rho = 3,1 \text{ г/см}^3$, $\chi = 14 \text{ с}$). Використання порошків із такими технологічними характеристиками забезпечувало формування виробів без дефектів поверхні та в макроструктурі, при цьому рівень механічних властивостей відповідав стандартам згідно технічних вимог кресленників деталі, виготовленої традиційним шляхом (литво, деформація).

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Haynes J. Additive manufacturing for liquid rocket engines. *Proceedings of the International Astronautical Congress*. No. 9. Paris. International Astronautical Federation (IAF). 2014. P. 6120-6122.
2. Additively manufactured porous tantalum implants. Wauthle R. et al. *Acta Biomaterial*. 2015. vol. 14, P. 217-225. DOI: 10.1016/j.actbio.2014.12.003
3. Nancharaiah T. A Review Paper on Metal 3D Printing Technology. *Advances in Materials Processing and Manufacturing Applications*. 2021. P. 251-259.
4. Слєпцов О. О., Осауленко С. І., Осипенко О. А., Грищенко Я. М. Інноваційні технології адитивного виробництва – проблеми та перспективи. *Освіта для сталого майбутнього: екологічні, технологічні, економічні і соціокультурні питання*. 2023. С. 80-84.
5. You J., Fang L., Zhang Q., Gao Y., Peng W. Osseointegration of multi-roots Ti6Al4V implant with porous surface based on SLM technology. *Biomedical Engineering*. 2015, vol. 34. № 3. P. 315-322. DOI: 10.1186/s12938-016-0207-9. tive
6. Gao, M., Li, L., Wang, Q., Ma, Z., Li, X., & Liu, Z. Integration of additive manufacturing in casting: advances, challenges, and prospects. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology*. 2021, P. 1-18.
7. Anderson I. E. et al. Feedstock powder processing research needs for additive manufacturing development. *Curr. Opin. Solid State Mater. Sci*. 2018. № 22 (1). P. 8-15
8. Petch M. The future of 3D printing: the forecast of additive manufacturing experts. 2022 [Electronic resource]. Access mode: <https://habr.com/ru/post/652745/>.
9. Stasyak J., Champion D., Yadati U., Weber T. HP's Metal jet 3D Printing Technology. *Injet Printing in Industry*, 2022. P. 1391-1401.
10. Sierikova O., Strelnikova E., Degtyarev K. Computer Modeling Wind Turbine Blades with Optimal Parameters. *WSEAS Transactions on fluid mechanics*, 2025. № 20, P. 51-62 DOI:10.37394/232013.2025.20.6.
11. Xiong J., Li Y.-J., Yin Z.-Q., Chen H. Determination of Surface Roughness in Wire and Arc Additive Manufacturing Based on Laser Vision Sensing. *Chinese Journal of*

Mechanical Engineering. 2018. Vol. 31, № 1. P.74. doi:10.1186/s10033-018-0276- 8.

12. Shen H., Deng R., Liu B., Tang S., Li S. Study of the Mechanism of a Stable Deposited Height During GMAW-Based. *Additive Manufacturing. Applied Sciences*. 2020. Vol. 10, № 12, P. 4322. doi:10.3390/app10124322.

13. Ishfaq K., Abas Z., Saravana Kumar M., Mahmood M. Review of recent trends in ultrasonic additive manufacturing: current challenges and future prospects. *Rapid Prototyping Journal*. 2023. № 9(6). P.1195-1211.

14. Андрощук Г.О. Адитивні технології: перспективи і проблеми 3D-друку. *Наука, технології, інновації*. 2017. Вип. 1. С. 68-77. [Електронний ресурс]. Режим доступу: http://ekmair.ukma.edu.ua/bitstream/handle/123456789/12990/Androshchuk_Adutyvni_tekhnolohii.pdf?sequence=1&isAllowed=y.

15. Slotwinski J.A. et al. Characterization of Metal Powders Used for Additive Manufacturing. *Journal of Research of the National Institute of Standards and Technology*. 2014. Vol. 119. P. 460-493.

16. Techel A. et al. Laser Additive Manufacturing of Turbine Components, Precisely and Repeatable *Fraunhofer Institute for Material and Beam Technology (IWS). Laser Institute of America*. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.lia.org/blog/category/laser-insights-2/laser-additive-manufacturing> .

17. Lin J.J., Lv.Y.H., Liu Y.X. et al. Microstructural evolution and mechanical properties of Ti-6Al-4V wall deposited by pulsed plasma arc additive manufacturing. *Materials & Design*, 2016. № 02. P. 30-40.

18. Махненко О.В., Ананченко Н.С., Кандава С.М. та ін. Прогнозування структури і механічних властивостей титанового сплаву ВТ6 при пошаровому формуванні 3D-виробів за допомогою адитивної технології електронно-променевого наплавлення. *Mechanics and Advanced Technologies*. 2019. № 3(84), С. 5-14.

19. Tokizane M., Fukam T., Inaba T. Structure and Mechanical rich TiAl Powder Produced Properties of the Hot Pressed Compactot Ti by the Plasma Rotating Electrode Process. *ISIJ International*. 1991. Vol. 31. № 10. P. 1088-1092.

20. Tofail S. et al. Additive manufacturing: scientific and technological challenges, market uptake and opportunities. *Materials today*. 2021. No.21(1). P. 22-37.

21. Boulos M. Plasma power can make better powders. *Metal Powder Report*. 2004. Vol. 59. Issue 5. P. 16-21.
22. Isonishi K., Kobayashi M., Tokizane M. Production of Ti-6Al-4V Alloy Powders by Plasma Rotating Electrode Process. *Tetsu-to-Hagan*. 1989. Vol. 75(10). P. 1913-1920.
23. Chen G. et al. Shape memory TiNi powders produced by plasma rotating electrode process for additive manufacturing. *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, 2017. Vol. 27(12). P. 2647-2655.
24. Yin J.O. et al. Microstructural characterization and properties of Ti-28Ta at. % powders produced by plasma rotating electrode process. *Journal of Alloys and Compounds*. 2017. Vol. 713. P. 222-228.
25. Global Additive Manufacturing Market and Technology Forecast to 2028. [Electronic resource]. Access mode: <https://www.marketresearch.com/Market-Info-Group-v4199/Global-Additive-Manufacturing-Technology-Forecast-13576963>.
26. Uhlmann E., Kersting R., Klein T.B., Cruz M., Borille A. Additive Manufacturing of Titanium Alloy for Aircraft Components. *Procedia CIRP*. 2015. vol. 35. P. 55-60. DOI: 10.1016/j.procir.2015.08.061.
27. Fatma N., Haleem A., Bahl S., Javaid M. Prospects of jewelry designing and production by additive manufacturing. In *Current Advances in Mechanical Engineering. Select Proceedings of ICRAMER.*, 2020. P. 869-879.
28. Powder Metalurge: Science, technology and application / H. Fngelo, R. Subramanian. 2009. 312 p.
29. "Airbus" began to print parts for the plane on a 3D printer. Correspondent, 7.05.2015. [Electronic resource]. <https://korrespondent.net/business/companies/3512098>
30. Овчинников О.В., Ольшанецкий В. Ю. Джуган А. А., Степанова Л. П., Михайлютенко О. А. Использование титановых порошков в методах 3Д печати изделий. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2016. №2. С. 77-81.
31. Access mode: «Airbus» printed more than 1 thousand. aircraft parts on a 3D printer. *Technologies and media*, May 6. 2015. [Electronic resource].

https://www.rbc.ru/technology_and_media/06/05/2015/554a58039a794738d822d40f

32. Воденнікова О.С., Воденіков С.А., Коваль М.О. Вирощування авіаційної деталі «Завихрувач» з жароміцного сплаву Inconel 718 за технологією селективного лазерного спікання. *Матеріалознавство та обробка металів*, 2022. № 2 (102). С. 12-21. <https://doi.org/10.31721/2306-5451-2022-1-55-10-15>.

33. Vodennikova O.S., Koval M.O., Vodennikov S. A. Investigation of Mechanical Properties and Structure of Inconel 718 Alloy Obtained by Selective Laser Sintering from Powder Produced by 'LPW'. *Металофізика та новітні технології*. 2021. Т 43. Вип. 7. С. 925-937. DOI: 10.15407/mfint.43.07.0925

34. Jiquan Jan Yang et al. Introduction to 3D-printing technology. *Nanjing Normal University Press*. 2016. P. 1-27. DOI:[10.1002/9781119669838.ch1](https://doi.org/10.1002/9781119669838.ch1)

35. Martina, F., Colegrove, P.A., Williams, S.W., Meyer, J. Microstructure of interpass rolled wire + arc additive manufacturing Ti-6Al-4V components. *Metall. Mater. Trans. A*, 2015. Vol.46(12). P. 6103-6118.

36. Schwab S., Selin R., Voron M. Welding materials for TIG welding, surfacing, and WAAM technology of titanium alloys. *Welding in the World*. 2023. Vol. 67(4). P. 981-986.

37. Коржик В.М., Строгонов Д.В., Бурлаченко О.М., Войтенко О.М., Куницький Д.В. Розвиток плазмово-дугових технологій отримання сферичних гранул для адитивного виробництва і гранульної металургії. *Автоматичне зварювання*. 2023. №11. С. 37-52.

38. Tkach D., Pavlenko D., Dvirnyk Y., Pedash O., Tarasov O. The main defects and ways to improve the quality of layer-by-layer sintered gas turbine parts. *Lecture Notes in Networks and Systems*, 2023. P. 525-536. https://doi.org/10.1007/978-3-031-20141-7_48

39. Gnatenko M., Naumyk V., Matkovska M. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *Materials Science and Technology*. 2019. P. 68-74.

40. Дорошенко В. С. Топологічна оптимізація конструкцій виливків при адитивному виробництві з застосуванням цифрового двійника. *Процеси лиття*, 2020. Том 142. №4. С.53-62

41. Doroshenko V.S. 3D technology for molding and casting . *Lite i metallurgiya*, 2015. №.3. P. 30-39.
42. General Electric новим гіперзвуковим двигуном зробила заявку на революцію, яка відбувається раз на півсторіччя. [Electronic resource]. <https://defence-ua.com>
43. Ngo T.D, Kashani A., Imbalzano G. et al. Additive manufacturing (3D printing): a review of materials, methods, applications and challenges. *Composites Part B: Engineering*. 2018.Vol.143. P. 172-196.
44. Shahrubudin N., Lee T.C., Ramlan R. An overview on 3D printing technology: technological, materials and applications. *Procedia Manuf.* 2019. Vol.35. P. 1286-1296.
45. Kasay, P.O., Pedash, O.O., Klochykhin, V.V., Naumyk, V.V., Naumyk, O.O. Hot Isostatic Pressing of Additive Specimens, Grown from IN718 Alloy Powder Obtained by Gas Atomization. *Strength of Materials*, 2024. 56(4). P. 722-734. DOI 10.1007/s11223-024-00686-w.
46. Kristiawan R., Imaduddin F., Ariawan D., Ubaidillah Zainal Arifin. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. *Open Engineering*. 2021. Vol. 11(1). P. 639-649.
47. Wilson S., Thomas R., Mary N. et al. Development and fabrication of fused deposition modelling 3D printer. *Materials Science and Engineering*. 2021, P.1132-2019.
48. Адитивні технології: навч. посіб. / Т. Р. Ганєєв, І. О. Прибитько, М. М. Руденко, І. О. Петренко – Чернігів: НУ «Чернігівська політехніка», 2023. 105 с.
49. Rodrigues T.A., Duarte V., Miranda R.M. et al. Current status and perspectives on wire and arc additive manufacturing (WAAM) *Materials*. 2019, Vol.12 (7), P.11-21.
50. GE Aviation испытала турбовинтовой двигатель с напечатанными на 3D-принтере деталями. Електронний ресурс. <https://vikna.if.ua/cikavo/79957/view>.
51. Ahsan M.N. et. al. A comparison of laser additive manufacturing using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. *Innovative Developments in Virtual and Physical Prototyping*. 2012. P. 625-633. doi: 10.1201/b11341-100.
52. Ríos S., Colegrove P.A., Martina F., Williams S.W. Analytical process model for wire + arc additive manufacturing. *Addit. Manuf.* 2018. Vol. 21. P. 651-657.

<https://doi.org/10.1016/j.addma.2018.04.003> .

53. Pan Z. et al. Arc welding processes for additive manufacturing: A review. *Transactions on Intelligent Welding Manufacturing*, 2018. Vol. 1. P. 3-24. DOI: 10.1007/978-981-10-5355-9_1.

54. Additive manufacturing of metallic components – process, structure and properties. *Progress in Materials Science*. 2018, Vol. 92, P. 112-224.

55. Bekker A.C.M., Verlinden J.C. Life cycle assessment of wire + arc additive manufacturing compared to green sand casting and CNC milling in stainless steel. *J. Clean. Prod.*, 2018. Vol. 177. P. 438-447.

56. Akhonin S.V., Schwab S.L. Filler flux-cored wire for tig welding and surfacing of VT22 titanium alloy. *The Paton Welding J.* 2019. Vol.6. P. 34-37. <http://dx.doi.org/10.15407/tpwj2019.06.06>.

57. Kvasnytskyi V. et al. Creation of volumetric products using additive arc cladding with compact and powder filler materials. *IEEE 10th International Conference Nanomaterials: Applications & Properties (NAP)*, 2020.

59. Yolton C.F., Francis H. (Sam) Froes. Conventional titanium powder production. *Titanium Powder Metallurgy. Science, Technology and Applications*. 2015. P. 21-31.

60. Yolton. C.F. Gas atomized titanium and titanium aluminide alloys in: F.H. Froes (Ed.) *Powder Metallurgy in Aerospace and Defense Technologies*. 1995. vol. 1. №34. P.792-794.

62. Савич В.В. Пористі матеріали з порошку титану: минуле, сьогодні і майбутнє. *Порошкова металургія*. 2013. №11/12. С.27-42.

63. Titanium Powder Metallurgy: Science, Technology and Applications / by Ma Qian, Francis H. Froes. 2015. 648 p.

64. Джуган О. А., Ольшанецький В.Ю., Капустян О.Є., Буліш С.О. Можливість використання несферичних титанових порошоків для адитивних технологій Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 27 / ДВНЗ «ПДТУ». – Маріуполь, ПДТУ, 2024. С.51-57. doi.org/10.31498/2522-9990272024303158.

65. Baraa Qaddah et al. Swirling supersonic gas flow in an EIGA atomizer for metal powder production: Numerical investigation and experimental validation. *Journal*

of Materials Processing Technology, 2023. Volume 311, P.1-23.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2022.117814>.

66. Погрелюк І.М., Д.І. Білоник, С.М. Лавриць, І.М. Білоник, Р. В. Проскурняк, О.Є. Капустян. Підвищення корозійної тривкості титану вторинного виготовлення легуванням молібденом. *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. 2025. Т. 61. № 1. С. 103-108. URL: <http://jnas.nbuiv.gov.ua/article/UJRN-0001556647>

67. Sun P., Fang Z.Z., Zhang Y., Xia, Y. Review of the methods for production of spherical Ti and Ti alloy powder. *Jom*, 2017, Vol. 69(10), P. 1853-1860.

68. Awad A. et al. 3D printing: principles and pharmaceutical applications of selective laser sintering. *International Journal of Pharmaceutics*. 2020. Vol. 586. [Electronic resource] <https://doi.org/10.1016/j.ijpharm.2020.119594>.

69. Chao C., Wei S.T., Jiayao C., Wei Z., Xingjian L., Tong L., Lihua Z., Kun Z. Comparative study on 3D printing of polyamide 12 by selective laser sintering and multi jet fusion. *Journal of Materials Processing Technology*, 2021. Vol. 288 [Electronic resource] <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2020.116882>.

70. Santos L.M.S., Ferreira J.A.M., Jesus J.S., Costa J.M., Capela C. Fatigue behaviour of selective laser melting steel components. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, 2016. Vol. 85. Part A. P. 9-15. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2016.08.011>.

71. Additive Manufacturing Consortium. [Electronic resource] Access mode: <http://ewi.org/additive-manufacturing-consortium/>.

72. Zeoli N., Tabbara H., Gu S. CFD modeling of primary breakup during metal powder atomization. *Chemical Engineering Science*. 2011. Vol. 66, Issue 24. P. 6498-6504 <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.09.014>.

73. Gülcan O., Günaydın K., Tamer A. The State of the Art of Material Jetting. A Critical Review. Process - Structure - Properties in Polymer. *Additive Manufacturing II, Polymers*, 2021. № 13 (16). P. 28-29. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13162829>.

74. Gibson I., Rosen D., Stucker B., Khorasani M. Additive Manufacturing Technologies. *Material Jetting*. 2020. P. 203-235. <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-030-56127-7>.

75. Kunchala P., Kappagantula K. 3D-printing high density ceramics using binder

jetting with nanoparticle densifiers. *Materials & Design*, 2018. Vol.155. № 5. P. 443-450. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2018.06.009>.

76. Dong H., Carr W. W. An experimental study of drop-on-demand drop formation. *Physics of Fluids*, 2006. №18. P. 72-102. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2217929>.

77. Paweł Baranowski, Jerzy Małachowski, Paweł Płatek, Aleksandra Szafrńska. LENS Ti-6Al-4V alloy material properties determination for LS-Dyna package. *AIP Conf. Proc.*, 2019. Vol. 2078, Issue 1. P. 1-8. <https://doi.org/10.1063/1.5092061>

78. Usov V. V., Shkatuliak N. M., Rybak N. I., Tsarenko M. O., Pavlenko, D. V., Tkach D., Pedash O. O. Texture and anisotropy of mechanical properties of Inconel 718 alloy products obtained by 3D-printing from powders. *Metallofizika i Noveishie Tekhnologii*. 2023. №45(1). P. 111-125. <https://doi.org/10.15407/mfint.45.01.0111>.

79. Огляд ринку 3D-друку в Україні: стан та перспективи [Electronic resource]. Access mode: <https://easy3dprint.com.ua/uk/ohlyad-rynku-3d-druku-v-ukrayini/>.

80. Ahsan M.N., Pinkerton A.J., Moat R.J., Shackleton J. A comparative study of laser direct metal deposition characteristics using gas and plasma-atomized Ti-6Al-4V powders. *Materials Science and Engineering*, 2011. P. 7648-7657. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.06.074>.

81. Laboratory of powder and special metallurgy. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ussi.zp.ua/poroshkovoy-metal/>.

82. Rudskoy A. I., Kondrat`ev S.Yu., Sokolov Yu.A. New approach to Synthesis of Powder and Composite Materials by Electron Beam. Part 1. Technological features of the process. *Met. Sci. Heat Treat*, 2016. Vol.58 (1-2). P. 27-32. DOI: 10.1007/s11041-016-9959-x.

83. В.М. Коржик та ін. Отримання сферичного порошку титану для 3D друку плазмово-дуговим розпиленням дротових матеріалів. *Сучасна електromеталургія*, 2025. № 2. С. 17-23. <https://doi.org/10.37434/sem2024.03.05>.

84. Vampton C., Goodin W., Van Daam T., Creeger G., James S. Net-shape HIP powder metallurgy components for rocket engines: *Materials Proc. Intern. Conf. on Hot Isostatic Pressing*. 2005. Paris. P. 53-62.

85. Karlsson J., Snis A., Engqvist H., Lausmaa J. Characterization and comparison

of materials produced by Electron Beam Melting (EBM) of two different Ti-6Al-4V powder fractions. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*. 2012. V.16. P. 153-162.

86. Wiggers H., Koster S., Walzel P. Experiments to liquid metal atomization with a new prefilming nozzle: *Proceedings of International Conference on Spray Deposition and Melt Forming. Bremen Universitat*, 2000. P. 569-578.

87. Ransikarbum K., Pitakaso R., Kim N. A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization. *Appl. Sci.*. 2020. vol. 10, P. 51-59.

88. О. О. Педаш, В.В. Ключихін, Т. А. Мітіна, В. Г. Шило. Вплив типу джерела енергії при 3D-прінтингу на структуру та властивості деталей зі сплаву Ti-6Al-4V. *Сучасна електromеталургія*. 2018. № 3 (131). С.27-31.

89. Нестеренков В.М., Матвейчук В.А., Русыник М.О., Овчинников А.В. Применение аддитивных электронно-лучевых технологий для изготовления деталей из порошков титанового сплава. *Автоматичне зварювання*. 2017. №3. С.5-10.

90. Korzhyk, V.M., Grynyuk, A.A., Khaskin, V.Yu. et al. Influence of the speed of plasma-arc welding at a variable polarity asymmetrical current on the formation of joints of high-strength aluminium alloys. *The Paton Welding J.* 2023. №8. P. 17-28. <https://doi.org/10.37434/tpwj2023.08.02>

91. Peleshenko, S., Korzhyk, V., Voitenko, O. et al. Analysis of the current state of additive welding technologies for manufacturing volume metallic products (review). *Eastern European J. of Enterprise Technologies*. 2017. Vol. 3/1(87). P. 42-52. <http://dx.doi.org/10.15587/1729-4061.2017.99666>.

92. Feucht T., Lange J., Erven M., Costanzi C. B., Knaack U., Waldschmitt B. Additive manufacturing by means of parametric robot programming. *Construction Robotics*. 2020. Vol. 4, № 1-2. P. 31-48. <https://link.springer.com/article/10.1007/s41693-020-00033-w>.

93. Kalinin K.V., Oglezneva S.A., Nagaev M.S. Influence of gas atomization parameters of alloy KhN60M on the characteristics of powder for laser surfacing. *Powder Metallurgy and Functional Coatings*. 2019. № 1 P. 14-21.

<https://doi.org/10.17073/1997-308X-2019-1-14-21>.

94. Korzhik, 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 J.* 2016. Vol. 5-6. P. 117-123. doi.org/10.15407/tpwj2016.06.20.

95. Saboori A., Aversa A., Marchese G. et al. Application of Directed Energy Deposition-Based Additive Manufacturing in Repair . *Applied Sciences*, 2019. Vol. 9. № 16. P. 33-16. doi:10.3390/app9163316.

96. Williams S. W., Martina F., Addison A. et al. Wire Additive Manufacturing. *Materials Science and Technology*. 2016. Vol. 32, № 7. P. 641-647. doi:10.1179/1743284715Y.000000007.

97. Hrabe N., Quin T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), part 1: Distance from build plate and part size. *Materials Science and Engineering*., 2013 № 573. P. 264-270. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.064>.

98. Hrabe N., Quinn, T. Effects of processing on microstructure and mechanical properties of a titanium alloy (Ti-6Al-4V) fabricated using electron beam melting (EBM), Part 2: Energy input, orientation, and location. *Materials Science and Engineering*. 2013. № 573. P. 271-277. <https://doi.org/10.1016/j.msea.2013.02.065>.

99. Tamayo J. A., Riascos M., Vargas C. A., Baena, L. M. Additive manufacturing of Ti6Al4V alloy via electron beam melting for the development of implants for the biomedical industry. *Heliyon*. 2021. № 7 (5), P. 1-26. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e06892>.

100. Denkena B., Krödel A., Pillkahn P. Mechanical Finishing of Wire Arc Additive Manufactured Aluminum Parts. *SSRN Electronic Journal*. 2020. Vol. 2020. P. 174-180. doi:10.2139/ssrn.3726008.

101. Oliveira J. P., Gouveia F. M., Santos T. G. Micro wire and arc additive manufacturing (μ -WAAM). *Additive Manufacturing Letters*. 2022. № 2, P. 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.addlet.2022.100032>.

102. Li B., Nagaraja K. M., Zhang R. et al. Integrating robotic wire arc additive manufacturing and machining: hybrid WAAM machining. *The International Journal of*

Advanced Manufacturing Technology. 2023. Vol. 129, № 7-8. P. 3247-3259. doi:10.1007/s00170-023-12517-4.

103. Srivastava S., Garg R. K., Sharma V. S., Sachdeva A. Measurement and Mitigation of Residual Stress in Wire-Arc Additive Manufacturing: A Review of Macro Scale Continuum Modelling Approach. *Archives of Computational Methods in Engineerin*. 2021. Vol. 28. № 5. P. 3491-3515. doi:10.1007/s11831-020-09511-4.

104. Srivastava S., Garg R. K., Sachdeva A., Sharma V. S. Distribution of Residual Stress in Wire-Arc Additively Manufactured Small-Scale Component: Single Versus Multi-Level Heat Input. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*. 2023. Vol. 145(2). P. 1-12. doi:10.1115/1.4055569.

105. Reisgen, U., Sharma, R., Oster, L. Plasma multiwire technology with alternating wire feed for tailor-made material properties in wire and arc additive manufacturing. *Metals*. 2019. 9(7). P 745. <https://doi.org/10.3390/met9070745>.

106. Yasa E., Kruth J. Application of laser re-melting on Selective laser melting parts. *Advances in Production Engineering & Management*. 2011. № 6(4). P. 259-270.

107. Chen G., Zhao S.Y., Tan P. et al. A comparative study of Ti-6Al-4V powders for additive manufacturing by gas atomization, plasma rotating electrode process and plasma atomization. *Powder Technology*. 2018. № 333, P. 38-46.

108. Entezarian M., Allaire F., Tsantrizos P., Drew R.A.L. Plasma atomization: a new process for the production of fine. Spherical Powders. *JOM*. 1996. June. P. 53-55.

109. Duriagina Z, Lemishka I, Ovchynnykov O., Yefanov, Klimczyk P. The influence of the structure and properties of powder heat-resistant alloys on the features of 3D printing of products from them. *MATEC Web of Conferences*. 2024. P. 5. <https://doi.org/10.1051/mateconf/202439004004>.

110. Bhuvanesh Kumar M., Sathiya P., Senthil S. M. A critical review of wire arc additive manufacturing of nickel-based alloys: principles, process parameters, microstructure, mechanical properties, heat treatment effects, and defects. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023. Vol. 45, № 3. P. 1-27. doi:10.1007/s40430-023-04077-1.

111. UK Government offers investment in AM. TCT additive manufacturing and

professional 3D printing, 2012. [Electronic resource]. Access mode: <http://www.tctmagazine.com/articles/uk-government-offersinvestment-in-am/>.

112. 3D-Printing Manufacturing Process is Here; Independent global forum for the Unmanned Aircraft Systems community, UAS Vision: [Electronic resource]. Access mode: <http://www.uasvision.com>.

113. Investigation of technological properties of nickel and titanium alloy powders for additive technologies. [Electronic resource]. Access mode: <https://docplayer.com/45195586-Issledovanie-tehnologicheskikh-svoystv-poroshkov-nikelevyh-i-titanovyh-splavov-dlya-additivnyh-tehnologiy.html>.

114. ДСТУ 2640-94. Порошки металеві. Визначення розміру частинок сухим просіюванням. – Київ: Інститут проблем матеріалознавства ім. І. М. Францевича Національної академії наук України, 1994.

115. Самчук Л. М. Аналіз металографічного дослідження для системи Ti-C-ШХ15, отриманої методом СВС. *Наукові нотатки*. 2014. Вип. 47. С. 172-175. http://nbuv.gov.ua/UJRN/Nn_2014_47_31.

116. Бобицький Я., Клімкевич Я. Порівняльний аналіз оптичних методів вимірювання розмірів мікрочастинок. *Вимірювальна техніка та метрологія*. 2007. № 67. С. 48-55.

117. Винарский М.С., Лурье М.В. Планирование эксперимента в технологических исследованиях. – Київ, Техніка, 1975, 168 с.

118. В.М. Коржик, Д.В. Строгонов, О.М. Бурлаченко, О.М. Войтенко, Д.В. Куницький . Развитие плазменно-дуговых технологий получения сферических гранул для аддитивного производства и гранульной металлургии. *Автоматичне зварювання*. 2023. №11, С. 37-51. <https://doi.org/10.37434/as2023.11.04>.

119. Tang J., Nie Y., Lei Q., Li Y. Characteristics and atomization behavior of Ti-6Al-4V powder produced by plasma rotating electrode process. *Advanced Powder Technology*. 2019. Vol. 30. № 10 P. 2330-2337. <https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.07.015>.

120. Gnatenko M., Naumyk V., Matkovska M. Influence of sources of heating and protective gases on the properties of the material obtained by the direct deposition. *MS and T 2019 - Materials Science and Technology*. 2019. P. 68-74.

121. Halienkova O. B., Yefanov V. S., Zavgorodny O.V. et al. Development of a titanium aluminide alloy of optimal composition by modification. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. № 3 (47). P. 245-256.

122. Ivasishin O.M., Markovsky P.E., Savvakina D.G. et al. Multi-Layered structures of Ti-6Al-4V alloy and TiC and TiB composites on its base fabricated using blended elemental powder metallurgy. *J. Mater. Proc. Technol.* 2019. Vol. 269. P. 172-181.

123. Matviichuk V., Nesterenkov V., Efanov V., Zavgorodny O., Bilyi R. Determining technological parameters for the additive electron-beam surfacing of blanks for medical implants made of Zr-Ti-Nb alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. №1/12 (133). P. 16-26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322118>.

124. Girzhon V. V., Smolyakov O.V., Ovchinnykov O.V., Zavgorodny O.V. Laser Surface Strengthening of Heat-Resistant Titanium Alloy for Gas Turbine Engines. *Metallofizika i Novejsie Tehnologii*. 2022. №3, Vol 44, P. 383-392. DOI:<https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0383>.

125. Matviichuk, V. A., Nesterenkov, V. M. Additive electron beam equipment for layer-by-layer manufacture of metal products from powder materials. *The Paton Welding Journal*. 2020. № 2. P. 41-46. <https://doi.org/10.37434/tpwj2020.02.08>

126. Markovsky P.E., Kovalchuk D.V., Akhonin S.V., Schwab S.L., Savvakina D.G., Stasiuk O. O, Orysyh D.V, Vedel D.V, Skoryk M. A, Tkachuk V.P. New approach for manufacturing Ti-6Al-4V+40%TiC metalmatrix composites by 3D printing using conic electron beam and cored wire. *Progress in Physics of Metals*. 2023. № 24 (4). P. 715-740.

127. Галєнкова О.Б., Єфанов В.С., Завгородній О.В. та ін. Комплексний вплив модифікування на властивості γ -сплаву на основі алюмініду титану. *Сучасні проблеми металургії*. 2025. № 28. С. 3-12. DOI:10.34185/1991-7848.2025.01.01.

ДОДАТОК А

СПИСОК НАУКОВИХ ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Публікації в наукових журналах, які індексуються у Scopus:

1. Girzhon V. V., Smolyakov O. V., Ovchinnykov O. V., **Zavgorodny O. V.** Laser Surface Strengthening of Heat-Resistant Titanium Alloy for Gas Turbine Engines. *Metallofizika i Novejsie Tehnologii*. 2022. № 3. Vol. 44. P. 383-392. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.44.03.0383>.

2. V. Matviichuk, V. Nesterenkov, V. Efanov, **O. Zavgorodny**, R. Bilyi. Determining technological parameters for the additive electron-beam surfacing of blanks for medical implants made of Zr-Ti-Nb alloy. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2025. №1/12 (133). P. 16 - 26. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2025.322118>.

3. Halienkova O. B., Efanov V. S., **Zavgorodny O. V.**, Kirian , Bulish S. O., Rud A. D. Development of a titanium aluminide alloy of optimal composition by modification. *Metallophysics and Advanced Technologies*. 2025. Vol. 47. № 3. P. 245 – 256. DOI: <https://doi.org/10.15407/mfint.47.03.0245>.

Публікації у наукових фахових виданнях України

4. Галенкова О. Б., Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Бронецька В. І., Шевченко В. Г. Комплексний вплив модифікування на властивості γ -сплаву на основі алюмініду титану. 2025. *Сучасні проблеми металургії.*, № 28. С. 3-12. DOI:10.34185/1991-7848.2025.01.01.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації

5. Овчинников О. В., Скребцов А. А., **Завгородній О. В.** Дослідження впливу фракції сферичного порошку на його хімічний склад. *Національний університет «Запорізька політехніка»* (8-10 жовтня 2019, м. Запоріжжя).

6. **Завгородній О.В.**, Сторчак Є. А., Буліш С. О., Білий Р. Ю. Отримання порошків з частинками сферичної форми низькомодульного біоінертного сплаву на основі системи металів Zr-Ti-Nb методом плазмового розпилення обертового електрода. *Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона НАНУ*. (27 листопада

2023 р. м. Київ).

7. Сторчак Е. А., Овчинников О. В., **Завгородній О. В.**, Білий Р. Ю., Осіпчук Р.Б. Виготовлення сферичних порошків із авіаційного сплаву Ti-6Al-4V з використанням легованого титану губчастого. *Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»* (3-6 вересня 2024 р., м. Харків).

8. **Завгородній О.В.**, Овчинников О.В., Пясецький М. М., Іванів А. ., Урекін Д. В. Вплив параметрів ротаційного плазмового розпилення на розмір сферичних порошків жароміцних сплавів *Національний аерокосмічний університет імені М. Є. Жуковського «ХАІ»* (3-6 вересня 2024р., м. Харків).

9. Бехтер Р. В., Галенкова О. Б., Білий Р. Ю., **Завгородній О. В.**, Овчинников О. В. Визначення коефіцієнту запасу міцності лопаток турбіни зі сплаву на основі алюмінію титану. *Інститут механіки ім. С. П. Тимошенка НАН України* (7-11 жовтня 2024 р., м. Київ).

10. Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Галенкова О. Б., Буліш С. О., Осіпчук Р. Б. Виготовлення стоматологічних імплантів із низькомодульного сплаву Zr-Ti-Nb за адитивною електронно-променевою технологією. [*Електронний ресурс*]. (20-22 січня 2025 р., м. Мюнхен).

11. Осипенко О. В., Сторчак Є. А., **Завгородній О. В.**, Пясецький М. М. Вплив складу українських титановмісних концентратів на вміст ванадію в тетрахлориді титану для отримання інноваційного титану губчастого. *Дніпровський металургійний інститут УДУНТ* (20 березня 2025 р., м. Дніпро).

12. Куц Д. О., Єфанов В. С., **Завгородній О. В.**, Пясецький М. М. Аспекти впровадження 3D-технологій для виготовлення деталей авіадвигунів. *Національний авіаційний інститут*. (1-4 квітня 2025 р., м. Київ).

13. Куц д. О., **Завгородній О. В.**, Іванів А. М., Білий Р. Ю. Підвищення експлуатаційних показників камери згоряння газотурбінного двигуна шляхом впровадження адитивного способу виробництва. *Національний авіаційний інститут*. (22 квітня 2025 р., м. Київ).

ДОДАТОК Б

02.02.075-210

<p style="text-align: center;">Міністерство оборони України АТ «МОТОР СІЧ»</p> <p>пр. Моторобудівників, 15, м. Запоріжжя, 69068 Факс: (061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com</p>		<p style="text-align: center;">Ministry of Defense of Ukraine MOTOR SICH JSC</p> <p>15, Motorobudivnykiv Av., Zaporizhzhia, 69068 Fax: (38061) 720-50-00 E-mail: motor@motorsich.com www.motorsich.com</p>
<p>№ _____</p> <p>На № _____</p>		<p style="text-align: center;">«ЗАТВЕРДЖУЮ»</p> <p style="text-align: center;">Головний інженер</p>



 « _____ »



АКТ
впровадження на АТ «Мотор Січ»
сферичних порошків виробництва АТ «Мультіфлекс» (Запоріжжя) для
виробництва деталей авіадвигунів адитивними технологіями

Комісії у складі:

Голови комісії – Головний інженер, к.т.н. К.Б. Балушка

Членів комісії: – Головного конструктора АТ "Мотор Січ" к.т.н Ю.Ф. Басова
 – Головного зварника АТ "Мотор Січ" к.т.н І.А. Петрика
 – Директора виробництва АТ «Мотор Січ к.т.н В.Ю. Коцюби

Склала цей акт про те, що на АТ «Мотор Січ» проводилися роботи з розробки технології адитивного вирощування методом мікроплазмового наплавлення порошками зі сплавів на нікелевій основі ЕП648-ВІ (ХН50ВМТЮБ-ВІ), ВЖ98-ВІ (ХН60ВТ для виробництва корпусних деталей газотурбінних двигунів.

Науково-дослідні роботи проводили з використанням сферичних порошків жароміцних сплавів компанії «Мультіфлекс» за темою «Ремонт та виготовлення корпусних деталей гарячого тракту авіадвигуна на установках мікроплазмового наплавлення».

Комісія встановила, що під час проведення науково-дослідних робіт реалізована технологія виробництва корпусної деталі «Кільце» із застосуванням технології 3D-вирощування мікроплазмовим наплавленням порошку зі сплаву ЕП648-ВІ виробництва АТ «Мультіфлекс».

Для реалізації цих технологій використано сферичні порошки фракційного складу 80...120 мкм, для чого Завгороднім О.В. виконана модернізація установки та технології для розпилення порошків із жароміцних сплавів ЭП648 (ХН50ВМТЮБ), ВЖ98 (ХН60ВТ).

В результаті проведених заходів та комплексу досліджень отримані наступні результати:

1) Для деталей зі сплаву ЭП648-ВИ (ХН50ВМТЮБ) підтверджена відповідність хімічного складу наплавленого металу вимогам технічної документації (ТУ 14-1-3046-97); рівень механічних властивостей корпусних деталей із наступною серійною термообробкою (гартування $T=1140^{\circ}\text{C}$ + старіння $T=900^{\circ}\text{C}$) відповідали вимогам 500ТУМ-43: $\sigma_{\text{в}}=82,5 \dots 90,8$ кгс / мм², $\delta=8,4 \dots 20,7\%$, $\Psi=13,3 \dots 26,6\%$.

2) Для деталей зі сплаву ВЖ98-ВИ (ХН60ВТ) хімічний склад відповідав вимогам тех. документації (ТУ 14-1-1531-75), структура та властивості отриманих деталей – технічним умовам 500ТУМ-43 із міцністю $\sigma_{\text{в}}=62,3 \dots 64,9$ кгс/мм² та пластичністю $\delta=8,4 \dots 20,7\%$, $\Psi=42,5 \dots 52,4\%$.

Підтверджена економічна доцільність використання адитивної мікроплазмової технології виготовлення кільця турбіни із порошків сплавів ЭП648-ВИ, ВЖ98-ВИ виробництва АТ «Мультифлекс».

Комісія ухвалила, що результати науково-дослідних робіт впроваджені у виробництво у такому вигляді:

- під керівництвом О.В. Завгороднього розроблені технічні умови ТУ У 24.4-31914753-002:2020 «Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізонікелевій основі». Вказані порошки використані для виготовлення деталі «Кільце» турбіни за розробленими адитивними технологіями та впроваджені в серійне виробництво АТ «Мотор Січ».

- випущено модифікацію креслення деталі «Кільце» турбіни, що передбачає виготовлення кільця турбіни із заготовок, вироблених методом мікроплазмового порошкового наплавлення.

Головний конструктор

Головний зварник

Директора з виробництва

Юрій БАСОВ

Ігор ПЕТРИК

Віктор КОЦЮБА

ДОДАТОК В

Акт реалізації науково-дослідних робіт з впровадження порошків із жароміцних нікелевих сплавів від компанії «Мультіфлекс» (Запоріжжя) для застосування в мікроплазмовому наплавленні деталей авіаційної техніки

Спеціалістами ІЄЗ ім. Є.О. Патона проведено комплекс тестово-оціночних робіт з визначення придатності присадних порошків нікелевих сплавів INCONEL 625, EP367, EP648 для застосування в мікроплазмовому наплавленні деталей авіадвигунобудівної галузі. При цьому використано сферичні порошки певного фракційного складу (53...63 мкм та 150...160 мкм) виробництва компанії ТОВ «Мультіфлекс».

Для отримання заданої фракції вказаних порошків Завгороднім О.В. виконана модернізація установки та технології для розпилення порошків із зазначених жароміцних сплавів, розроблено технічні умови ТУУ 24.4-31914753-002:2020 «Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізонікелевій основі». Для досліджень надано по 3 кг порошку із шкірного сплаву, що підлягав дослідженню.

Дослідні роботи передбачали оцінку форми частинок порошку на предмет сферичності та відповідності їх розмірів заявленому фракційному складу, а також визначення фізико-технологічних властивостей порошків із досліджених сплавів, визначення вмісту та розподілу в ньому домішок (вміст кисню та азоту) та визначення базових механічних властивостей наплавленого металу.

В результаті проведених заходів та комплексу досліджень встановлено, що частки дослідних порошків мали правильну сферичну форму, розмір їх відповідав заявленим фракціям. Хімічний склад порошків відповідав стандартним вимогам для сплавів INCONEL 625, EP367, EP648, при цьому вміст кисню та азоту не перевищував 0,025 ваг.% та 0,005 ваг.% відповідно (для аналізу використано 10 г порошку із шкірного сплаву). Зварювально-технологічні властивості оцінювали шляхом багатощарового наплавлення на технологічній пробі «стінка», перевірені здатність до наплавлення $I < 10 \dots 15$ А. Механічні властивості наплавленого матеріалу перевірені у стані «as bult» та після термообробки при випробуванні на статичний розтяг при кімнатній температурі та при 900°C, 975°C; на статичний загин та ударний згин. Результати всіх видів випробувань відповідали технічним умовам, тріщинам та ін. дефекти після повторного нагрівання не виявлені.

Висновок: порошки нікелевих сплавів INCONEL 625, EP367, EP648 виробництва ТОВ «Мультіфлекс» (Запоріжжя), які отримані в результаті наукових досліджень дисертаційної роботи Завгороднього Олександра Васильовича на тему: «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення» відповідають критеріям якості для застосування у мікроплазмовому наплавленні деталей відповідального призначення.

Директор Запорізького науково-інженерного центру з плазмових технологій Науково-технічного комплексу «Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона» НАН України



Тамара МІТІНА

ДОДАТОК Г

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

Голова науково-технічної ради,
В.о. Генерального директора
АТ «Івченко-Прогрес»
Член-кор НАН України, д.т.н., проф.


Ігор КРАВЧЕНКО
« » 2025 р.



АКТ

про науково-дослідну роботу з впровадження порошків
жароміцних нікелевих сплавів виробництва АТ «Мультіфлекс» для застосування
в адитивних технологіях виготовлення деталей газотурбінних двигунів

Цей акт складено про те, що АТ «Івченко-Прогрес» зацікавлено у використанні дисперсних порошків із жароміцних нікелевих сплавів виробництва компанії АТ «Мультіфлекс» для адитивного вирощування та ремонту деталей ротора турбіни газотурбінних двигунів (ГТД) зі сплавів ЖСЗДК, ВЖЛ12, Inconel 738 та ін.

У процесі ознайомлення з виробництвом встановлено, що під керівництвом Олександра Завгороднього проведено модернізацію обладнання для плазмового відцентрового розпилення, розроблено спеціальні режими для підвищення якості продукції та потужностей виробництва.

У межах наукової співпраці спеціалісти АТ «Івченко-Прогрес» відвідали виробництво АТ «Мультіфлекс», ознайомилися із особливостями виготовлення сферичних порошків. В результаті встановлено, що при виготовленні порошків застосовується новітнє високотехнологічне обладнання, а сам процес проходить при контролі параметрів атмосфери, що забезпечує високу чистоту за домішками (киснем, азотом) та неметалевим вкращенням, із відсутністю на поверхні частинок порошків окисного шару та частинок-сателітів. Якість порошків обумовлюється технічними умовами на поставку ТУ У 24.4-31914753-002:2020 «Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізонікелевій основі». АТ «Івченко-Прогрес» замовляє у компанії АТ «Мультіфлекс» порошки різних фракцій жароміцних нікелевих сплавів для виготовлення деталей ГТД адитивними технологіями, а саме:

- 40...65 мкм – для лазерного прінтингу деталей малих габаритів складної форми;
- 60...120 мкм – для електронно-променевого пошарового вирощування дрібних та середньогабаритних деталей;
- 80...120 мкм – для мікроплазмового виготовлення крупногабаритних корпусних деталей.

Секретар науково-технічної ради,
АТ "Івченко-Прогрес", к.т.н.



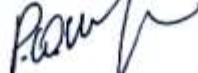
Роман ПРИДОРЖНИЙ

Заступник директора
з наукової роботи-
Начальник комплексу, к.т.н., ст. досл.



Юрій ТОРБА

Керівник групи



Руслан ШАКАЛО

ДОДАТОК Д



ТОВАРИСТВО З ОБМЕЖЕНОЮ ВІДПОВІДАЛЬНІСТЮ «Адитивні лазерні технології України»
65104, м. Одеса, проспект Небесної Сотні, будинок 103
Код ЄДРПОУ: 42177287
+38 067 166 11 73

АКТ

**про результати застосування дисперсних сферичних порошків
виробництва АТ «Мультифлекс» на підприємстві «АЛТ Україна»**

Акт складено про те, що в період 2022-2024р.р. компанією «АЛТ Україна» проводились науково-дослідні роботи за напрямом ««Отримання високоточних деталей на прецизійному лазерному принтері для авіадвигуна з використанням сферичних порошків жароміцних сплавів виробництва АТ «Мультифлекс»».

В межах даного проєкту директором АТ «Мультифлекс» О.В. Завгороднім проведена оптимізація режимів ротаційного плазмового розпилення порошків, в результаті розроблені технічні умови ТУ У 24.4-31914753-002:2020 «Порошки зі сплавів на основі нікелю та на залізонікелевій основі». Виготовлені за оновленою технологією порошки поставлені на підприємство «АЛТ Україна» згідно умов договору.

В свою чергу, компанією «АЛТ Україна» проведено дослідження якості порошків виробництва АТ «Мультифлекс» зі сплаву ЭП648-ВІІ (ХН50ВМТЮБ-ВІІ), визначено їх гранулометричний склад, відпрацьована технологія адитивного лазерного вирощування виробів та зразків із наданого порошку за технологією лазерного 3D-принтингу.

В результаті встановлено, що порошок від постачальника «Мультифлекс» зі сплаву ЭП648-ВІІ відповідав критеріям якості лазерних адитивних технологій: мав правильну сферичну форму, розмір частинок порошку знаходився в межах 40...57 мкм, на поверхні частинок порошку частинки-«сателіти» не виявлені, гранули порошку не окислені та мали світлий металевий відтінок та блиск. Внаслідок відпрацювання лазерної 3D-технології встановлені раціональні технологічні режими процесу, досягнута практично 100% (<1%) відсутність мікропор у готових виробах. При цьому, механічні властивості зразків (20°C) в стані без термообробки перевищували традиційні деформовані напівфабрикати зі сплаву ЭП648-ВІІ і складали: $\sigma_{\pm} = 874 \dots 878$ МПа, $\sigma_{0,2} = 591 \dots 615$ МПа, $\delta = 47 \dots 55\%$.

Висновок: порошки із жароміцного сплаву ЭП648-ВІІ (ХН50ВМТЮБ-ВІІ) виробництва АТ «Мультифлекс» (м. Запоріжжя) повністю відповідають критеріям якості лазерних адитивних технологій та можуть бути застосовані для вирощення високоточних деталей, в тому числі і деталей складної геометрії газотурбінних двигунів.

Директор компанії «АЛТ Україна»



Паламарчук Сергій

ДОДАТОК Ж

ЗАТВЕРДЖУЮ
 Проректор з НР
 НУ «Запорізька політехніка»
 посада керівника, назва організації (підприємства)
 Вадим ШАЛОМЄЄВ
 (Ім'я ПРІЗВИЩЕ)
 05
 М.П.
 06.2015 р.
 АКТ

про впровадження результатів НДР

05 06.2015 р.

м. Запоріжжя

Склала комісія у складі:

Голови Олексій КАПУСТЯН

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

члени комісії Ганна ЛАПТЄВА, Михайло ОСІПОВ, Ігор БІЛОНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Комісія провела роботу щодо визначення фактичного впровадження дисертаційної роботи аспіранта Завгороднього Олександра Васильовича «Вдосконалення обладнання та технології плазмового ротаційного розпилення для виготовлення металевих порошків адитивного призначення» та установила, що результати вказаної роботи впроваджені в навчальний процес кафедри «Інтегровані технології зварювання та моделювання конструкцій».

Вид та обсяг упровадження закономірності формування фракційного складу металевих порошків впроваджені в лекційний курс «Зварювальні матеріали», дослідні дані застосування сферичних порошків для виготовлення деталей адитивними технологіями в лекційний та практичний курс дисципліни «Зварювання різномірних і композитних матеріалів» та «Наплавлення спеціальних сталей і сплавів».

Досягнуті технічні результати, їхній рівень – підвищення якості підготовки студентів спеціальності 131 Прикладна механіка.


Річний економічний ефект від упровадження становить (тис. грн.)

Складено в 3 прим.: 1-й прим. у НДЧ НУ «Запорізька політехніка»

2-й прим. на підприємство

3-й прим. виконавцю

Голова комісії


 підпис

Олексій КАПУСТЯН


(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

Члени комісії


 підпис

Ганна ЛАПТЄВА

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)


 підпис

Ігор БІЛОНИК

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)


 підпис

Михайло ОСІПОВ

(Ім'я ПРІЗВИЩЕ)

ДОДАТОК К

ДКПП 24.45.12-00.00

УКНД 77.160



ПОГОДЖЕНО

Головний Інженер
АТ «Мотор Січ»

[Signature]
 К.Б. Балущок
 25.09.2020

ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
ТОВ «Мультіфлекс»
[Signature] О.В. Завгородній
 25.09.2020

ПОРОШКИ ЗІ СПЛАВІВ НА ОСНОВІ НІКЕЛЮ

ТА НА ЗАЛІЗОНІКЕЛЕВІЙ ОСНОВІ

Технічні умови

ТУ У 24.4-31914753-002:2020



(Введено вперше)

Дата надання чинності 25.09. 2020

Без обмеження терміну дії

ПОГОДЖЕНО

Директор
НДЦ «Титан Запоріжжя»
НУ «Запорізька політехніка»
[Signature] О.В. Овчинников
 10.09.2020

РОЗРОБЛЕНО

Директор
ТОВ «Мультіфлекс»
[Signature] О.В. Завгородній
 09.09.2020

Головний металург
АТ «Мотор Січ»

[Signature] В.В. Клочихін
 18.09.2020

ДОДАТОК Л

ДКПШ 24.45.30-43.00



УКНД 77.160

ПОГОДЖЕНО
Технічний директор
АТ «Мотр Січ»
10 04 20 19 р.
П.Д. Жеманюк



ЗАТВЕРДЖУЮ
Директор
ТОВ «Мультифлекс»
28 04 20 19 р.
О.В. Завгородній



**ПОРОШКИ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ СФЕРИЧНОЇ ФОРМИ ДЛЯ
АДИТИВНИХ ПРОЦЕСІВ ВИРОЩУВАННЯ**

ТЕХНІЧНІ УМОВИ

ТУ У 24.4-31914753-001:2018

(Уведено вперше)

Дата надання чинності "12" 04 20 19 р.

Без обмеження строку дії

ПОГОДЖЕНО
Директор ІДП «Титан Запоріжжя»
д.т.н., професор ЗНТУ
від 08 04 20 19 р.
О.В. Овчинников

АТ «Мотр Січ»
Головний металург
09 04 20 19 р.
В.В. Клочихін
Головний зварювальник
09 04 20 19 р.
А. Петрик

РОЗРОБЛЕНО
ТОВ «Мультифлекс»
Директор
28 04 20 19 р.
О.В. Завгородній