

ЛУЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



**ЛЕМШКА ІГОР АНАТОЛІЙОВИЧ**

УДК 669.295

**ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ МІКРОСТРУКТУРИ І ВЛАСТИВОСТЕЙ  
КОМПОЗИЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ НА ОСНОВІ ТИТАНОВИХ СПЛАВІВ  
ДЛЯ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ**

Спеціальність 05.02.01 – матеріалознавство

**АВТОРЕФЕРАТ**

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Луцьк – 2019

Дисертацією є рукопис

Робота виконана на кафедрі прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів Національного університету «Львівська політехніка» Міністерства освіти та науки України, м. Львів.

**Науковий керівник** – доктор технічних наук, професор,  
**Дурягіна Зоя Антонівна**,  
Національний університет «Львівська політехніка»  
Міністерство освіти та науки України, завідувач  
кафедри прикладного матеріалознавства та обробки  
матеріалів (м. Львів).

**Офіційні опоненти** – доктор технічних наук, професор,  
**Погрелюк Ірина Миколаївна**,  
Фізико-механічний інститут ім. Г.В. Карпенка,  
завідувач відділу № 15 високотемпературної міцності  
конструкційних матеріалів у газових і рідкометалевих  
середовищах (м. Львів).

– кандидат технічних наук, доцент,  
**Крамар Галина Михайлівна**,  
Тернопільський національний технічний університет  
імені Івана Пулюя, заступник завідувача кафедри  
будівельної механіки (м. Тернопіль).

Захист відбудеться «5» квітня 2019 року о 12:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради К 32.075.02 Луцького національного технічного університету МОН України за адресою: 43018, Волинська обл., м. Луцьк, вул. Львівська, 75, з. 216

З дисертацією можна ознайомитися у науковій бібліотеці Луцького національного технічного університету за адресою: 43018, Волинська обл., м. Луцьк, вул. Львівська, 75 та на сайті спецради К 32.075.02 (<http://lutsk-ntu.com.ua/uk/k-3207502-specialnist-050201-materialoznavstvo>).

Автореферат розісланий «1» березня 2019 року.

Учений секретар  
спеціалізованої вченої ради К 32.075.02  
кандидат технічних наук, доцент



Гусачук Д.А.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

**Актуальність теми.** Високотехнологічні галузі – машинобудування, авіабудування та космічна промисловість потребують виготовлення виробів з підвищеними експлуатаційними властивостями за мінімальних енерго-ресурсних витрат та зниження собівартості готових виробів. Досягти потрібного ефекту можна застосовуючи адитивні технології, оскільки вони дозволяють формувати вироби складної конфігурації, які не потребують фінішної механічної обробки.

Основним матеріалом для виготовлення виробів методами адитивних технологій (3D-друку) є металеві порошки. Серед них порошки титанових сплавів вважаються найбільш перспективними, оскільки вони одночасно володіють високими питомою міцністю, корозійною стійкістю та жароміцністю. На даний час для 3D-друку використовують порошки зі сферичною формою частинок. Це пов'язано з тим, що вони можуть більш компактно заповнювати визначений об'єм та забезпечувати необхідну текучість порошкової композиції в системах подачі матеріалу. Існуючі способи отримання порошків титанових сплавів з частинками сферичної форми є надзвичайно дорогими. Вони передбачають ряд складних операцій, у зв'язку з чим собівартість таких порошків становить 800-1000\$ за кг. Це вимагає розробки альтернативних технологічних підходів для отримання більш дешевої порошкової сировини для 3D-друку.

Відомі результати досліджень в цьому напрямку, представлені у роботах О.М. Івасишина, І.М. Погрелюк, В.М. Федірка, С. Ласенса, М. Пітерса, М. Квіна, Ф.Х. Фроса, М.А. Зеленка, П.Д. Жеманюка та О.В. Овчиннікова показують, що перспективною є технологія отримання порошків титанових сплавів з частинками несферичної форми методом гідрування-дегідрування. В якості альтернативної сировини в роботі досліджено порошки титанових сплавів марок VT6 та VT20, що отримані з титанової губки з заданим вмістом легувальних елементів за експериментальною технологією магнійтермічного відновлення і наступної вакуумної сепарації.

Враховуючи вище сказане, актуальним і своєчасним завданням матеріалознавства є оптимізація морфології поверхні та гранулометричного складу порошків титанових сплавів із частинками сферичної та несферичної форми для їх застосування в адитивному виробництві.

**Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.** Дисертація виконана на кафедрі прикладного матеріалознавства та обробки матеріалів Національного університету “Львівська політехніка” у відповідності до наукового напрямку кафедри “Розробка та оптимізація способів покращання функціональних властивостей матеріалів” у межах держбюджетної науково-дослідної теми: ДБ/БФМ «Моделювання та синтезування нових багатокомпонентних функціональних матеріалів з прогнозованою структурою та властивостями», 2016-2018 рр. (номер державної реєстрації № 0116U004142). У процесі виконання зазначених робіт автор брав участь у вдосконаленні методів досліджень, підготовці та проведенні експериментів, обробці одержаних результатів та написанні статей.

**Мета і завдання дослідження.** Метою роботи є оптимізація морфології поверхні, фазового, гранулометричного складу частинок порошків титанових сплавів

і мікромеханічних властивостей нарощуваних шарів на їх основі для встановлення можливості застосування таких порошків в адитивному виробництві.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні завдання:

1. Встановити вплив різних методів водневої обробки (гідруванням, гідруванням та повним дегідруванням, гідруванням та частковим дегідруванням) на фазовий склад та гранулометричні характеристики порошків отриманих з титанової губки.

2. Дослідити морфологію поверхні та гранулометричний склад порошків титанових сплавів марок VT6 та VT20 з частинками сферичної форми (за технологією відцентрового плазмового розпилення електроду) та несферичної форми (за методом гідрування-дегідрування).

3. Оцінити рівень мікромеханічних властивостей нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20» з частинками сферичної та несферичної форми.

4. Дослідити можливість застосування порошків титанового сплаву марки VT20 з частинками несферичної форми в якості альтернативної сировини для адитивного виробництва.

5. Розробити метод ідентифікації відповідності порошків титанових сплавів за морфологією поверхні, фазовим та гранулометричним складом і мікромеханічними властивостями при розв'язанні задач класифікації засобами штучного інтелекту.

**Об'єкт дослідження.** Процеси структуроутворення порошків титанових сплавів для 3D-друку та їх вплив на мікромеханічні властивості системи «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20» з частинками сферичної та несферичної форми.

**Предмет дослідження.** Морфологія поверхні, фазовий, гранулометричний склад, мікромеханічні властивості порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми, ідентифікація їх властивостей з використанням методів нейронно-мережевого моделювання та машинного навчання.

**Методи дослідження.** Оптична та сканувальна електронна мікроскопія, рентгенівський фазовий, мікрорентгеноспектральний та гранулометричний аналізи, методика пошарового нарощування титанового порошку, мікроіндентування, розв'язання задач ідентифікації засобами штучного інтелекту.

**Наукова новизна одержаних результатів.** Розширено уявлення про морфологію поверхні, фазовий склад та гранулометричні характеристики порошків титанових сплавів марок VT6 та VT20 з частинками сферичної та несферичної форми, оцінено мікромеханічні властивості нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20» з частинками сферичної та несферичної форми, здійснено комп'ютерне моделювання для ідентифікації властивостей порошкових матеріалів на основі методів нейронно-мережевого моделювання та машинного навчання.

1. *Вперше* встановлено, що використання водневої обробки методом гідрування та часткового дегідрування дозволяє отримати необхідну морфологію поверхні, фазовий та гранулометричний склад порошків отриманих з титанової губки з частинками несферичної форми. Зокрема показано, що після гідрування, в

межах фракції 10...70 мкм, домінуюча частка однорідних за розмірами частинок порошку становить 60 %. Гідрування та повне дегідрування збільшує цей параметр до 70 %, а гідрування та часткове дегідрування – до 78 %. Аналіз кривих розподілу частинок порошку за розмірами свідчить, що найменша ступінь полідисперсності (2,2 %) характерна для порошку, отриманого гідруванням та частковим дегідруванням.

2. *Отримали подальший розвиток* підходи мікроідентування для оцінки мікротвердості, рівня пластичності та границі плинності нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20» з частинками сферичної та несферичної форми. Встановлено, що найвищою мікротвердістю (HV 4,68 ГПа) характеризуються нарощувані шари порошків сплаву VT20 фракції 160...200 мкм незалежно від їх морфології. При цьому значення границі плинності (1,25-1,32 ГПа) цих шарів з несферичних частинок порошку не поступаються значенням границі плинності (0,95-1,48 ГПа) шарів зі сферичних частинок порошку незалежно від їх фракційного складу.

3. *Вперше* встановлено, що порошки сплаву марки VT20 з частинками несферичної форми можуть бути використані в якості альтернативної сировини для адитивного виробництва. Зокрема нарощувані шари з цих порошків характеризуються більш дисперсною структурою, ніж шари зі сферичних частинок.

#### **Практичне значення отриманих результатів.**

1. Для АТ «МОТОР СІЧ» розроблено рекомендації з модернізації технологічного процесу відновлення лопаток турбін авіаційних двигунів з використанням порошку титанового марки VT20 за допомогою адитивних технологій. Очікуваний економічний ефект від впровадження отриманих результатів досліджень складає 80000 грн./рік.

2. Розроблено метод ідентифікації відповідності порошкових титанових сплавів у вигляді програмного продукту на основі ймовірнісної нейронної мережі. Встановлено, що за оптимального значення ступеню експоненційного згладжування, точність результатів моделювання складає 80 %. Розроблено метод машинного навчання для ідентифікації властивостей досліджуваних порошкових матеріалів на основі комбінованого використання алгоритму «Випадкового лісу» та полінома Колмогорова-Габора, що забезпечує точність розв'язанні задачі класифікації – 96,88 %.

Застосування такого інструментарію штучного інтелекту дозволяє зменшити фінансові та часові витрати на проведення експериментів з визначення оптимальних характеристик порошкових матеріалів для адитивних технологій.

3. Одержані результати досліджень впроваджено у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні лекційних курсів та лабораторних робіт з дисциплін «Порошкові та композиційні матеріали», «Фізика та хімія поверхні», «Технології наноматеріалів» та «Комп'ютерні технології у ливарному виробництві» для спеціальностей 132 – матеріалознавство та 136 – металургія.

**Особистий внесок здобувача.** У дисертації узагальнено результати досліджень, які були виконані автором на кафедрі прикладного матеріалознавства

та обробки матеріалів Національного університету «Львівська політехніка» під керівництвом д.т.н., професора Дурягіної З.А.

Автором дисертації, разом з керівником, сформульовано основні ідеологічні підходи, мету та завдання досліджень, проаналізовано та узагальнено отримані результати. Автором особисто проведено аналіз літературних даних, підготовлені об'єкти для досліджень. Автор брав безпосередню участь у проведенні експериментів та обговоренні експериментальних результатів, написанні статей та підготовці доповідей на конференціях. В опублікованих у співавторстві статтях [1-5] здобувачем проведено дослідження морфології поверхні та гранулометричного складу порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми, а також оцінено мікромеханічні властивості нарощуваних шарів на їх основі. Показана доцільність застосування порошків титанових сплавів з частинками несферичної форми отриманих технологією гідрування-дегідрування для застосування їх в якості альтернативної сировини в адитивному виробництві. Вклад дисертанта у цих роботах був визначальним.

**Апробація результатів дисертації.** Основні результати дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на науково-технічних конференціях:

Конференція присвячена 70-річчю від дня заснування Інституту металофізики ім. Г.В. Курдюмова Національної академії наук України «Сучасні проблеми фізики металів і металевих систем» (Київ, 2016), Матеріали V Міжнародної наукової конференції «Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина» (Мінськ, 2016), Матеріали V наукової конференції «Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології» (Київ, 2016), Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції «Титан 2016: Виробництво та використання в авіабудуванні» (Запоріжжя, 2016), Матеріали доповідей Десятої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених «Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів» (Київ, 2017), Матеріали доповідей XVII Міжнародної науково-технічної конференції (AIPS 2017) «Системи та засоби штучного інтелекту» (Київ, 2017), Международная конференция «Титан 2018: Производство и применение в Украине» (Київ, 2018), 10<sup>th</sup> International conference: Advanced materials and technologies (Ninghai, 2018).

**Публікації.** Результати дисертації представлені у 13 друкованих наукових працях: 1 стаття у науковому періодичному виданні іншої держави, яке включене до міжнародної наукометричної бази даних, 2 статті у наукових фахових виданнях України, які включені до міжнародних наукометричних баз даних, 2 статті у наукових фахових виданнях України та 8 матеріалів доповідей наукових міжнародних конференцій.

**Структура та обсяг роботи.** Дисертація складається із вступу, 5 розділів, висновків та 3 додатків, викладена на 6,5 авторських аркушах, текст основної частини – 4,5 авторські аркуші, містить таблиць – 9, рисунків – 51, список використаних джерел з 180 найменувань.

## ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** представлено загальну характеристику роботи: обґрунтовано актуальність теми, визначено мету, задачі, об'єкт, предмет і методи досліджень, висвітлено наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, особистий внесок здобувача, публікації, апробацію одержаних результатів дисертації та структуру дисертації.

У **першому розділі** наведено аналітичний огляд літературних джерел, проаналізовано основні методи адитивного виробництва та матеріали, що застосовуються при 3D-друці. Проаналізовано праці О.М. Івасишина, І.М. Погрелюк, В.М. Федірка, М. Квіна, Ф. Фроса, Г. Чена, Дж. Їна, С. Плаєра, Х. Ширайші, Б. Дутта, Х. Госо та інших, що стосуються методів виготовлення порошків титанових сплавів. Розглянуто особливості застосування порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми в адитивних технологіях. Проаналізовано літературні джерела, що стосуються сучасних методів комп'ютерного моделювання для ідентифікації раціонального вибору матеріалів за їх структурою та властивостями. Показано принципову можливість застосування несферичних порошків титанових сплавів марок VT6 та VT20 для адитивного виробництва.

У **другому розділі** наведено сучасні методики для дослідження морфології поверхні, фазового складу та гранулометричних характеристик порошків титанових сплавів, методика їх пошарового нарощування, а також методи оцінки мікромеханічних властивостей отриманих шарів. Описані методики для здійснення комп'ютерного моделювання для ідентифікації відповідності порошків титанових сплавів за морфологією поверхні та гранулометричними характеристиками на основі методів нейронно-мережевого моделювання та машинного навчання.

На прикладі порошку отриманого з титанової губки була показана принципова можливість застосування водневої обробки для регулювання гранулометричних характеристик частинок порошку за рахунок цілеспрямованої зміни кількісного співвідношення між структурними складовими. В подальшому дослідження проводилися для порошків титанових сплавів марок VT6 та VT20, що отримані з титанової губки з заданим вмістом легувальних елементів за експериментальною технологією магнійтермічного відновлення і наступної вакуумної сепарації.

Морфологію поверхні порошків титанових сплавів зі сферичними та несферичними частинками, а також нарощувані шари в системі «підкладка технічного титану VT1-0 – шар порошків сплаву VT20» з частинками сферичної та несферичної форми досліджували з використанням оптичної мікроскопії на металографічному мікроскопі МІКРОТЕХ ММТ-14Ц та сканувальної електронної мікроскопії на мікроскопі EVO-40XVP. Елементний та фазовий аналіз здійснювали на енергодисперсійному спектрометрі OXFORD INCA Energy 350 та на дифрактометрі ДРОН-3М відповідно.

Розподіл порошку за фракціями виконувався за допомогою ситового аналізу. Гранулометричний склад порошоків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми визначали з використанням спеціалізованого комплексу аналізу зображень ImageJ. Ступінь неоднорідності (полідисперсність) порошку, що залежить від середнього розміру домінуючих частинок в певній фракції та стандартного відхилення розміру частинок порошку від їх середнього розміру, визначалася побудовою кривої Гауса на основі гістограм розподілу частинок в певній фракції.

Для імітації процесу 3D-друку використовували пошарове нарощування титанових порошоків різної морфології та фракційного складу на підкладку з технічного титану марки ВТ1-0. Підкладки виготовляли пресуванням порошкової суміші на гідравлічному пресі 20Т, а їх спікання виконували у шахтній вакуумній печі з молібденовим нагрівачем. Подальше пошарове нарощування на них сферичних та несферичних порошоків титанового сплаву марки ВТ20 виконувалось електронною гарматою ЕЛА-6.

Мікромеханічні властивості нарощуваних шарів оцінювали за результатами мікроіндентування, виконаних на стаціонарних мікротвердомірах ПМТ-3 та NOVOTEST ТС-МКВ1. Розрахунок характеристики пластичності  $\delta_n$  здійснювався на основі теоретичної моделі пружно-пластичного контакту при вдавлюванні жорсткими пірамідальними інденторами. Для цього в поверхневий шар покриття послідовно вдавлювали дев'ять алмазних пірамід з різними кутами між віссю пірамідальноподібного індентора і бічною гранню: 45, 50, 55, 60, 65, 70, 75, 80 та 85 град. Границю плинності нарощуваних шарів визначали на основі побудованої залежності «напруження ( $\sigma$ ) – деформація ( $\epsilon$ )» дані для якої отримували методом мікроіндентування.

У **третьому розділі** показано вплив різних методів водневої обробки на гранулометричні характеристики порошоків отриманих з титанової губки. Зокрема представлено результати досліджень морфології поверхні частинок, їх фазового та елементного складу, а також гранулометричних характеристик порошоків титанових сплавів марок ВТ6 та ВТ20 з частинками сферичної та несферичної форми.

Встановлено, що за різних методів водневої обробки (гідрування, гідрування та повного дегідрування, гідрування та часткового дегідрування), переважаюча кількість частинок порошку знаходиться в інтервалі від 3,5 до 27 мкм (Рис. 1).

Слід зазначити, що після гідрування, домінуюча частка однорідних за розмірами частинок становить 60 %. Після повного дегідрування вона складає 70 %, а після часткового дегідрування зростає до 78 % (Рис. 2).



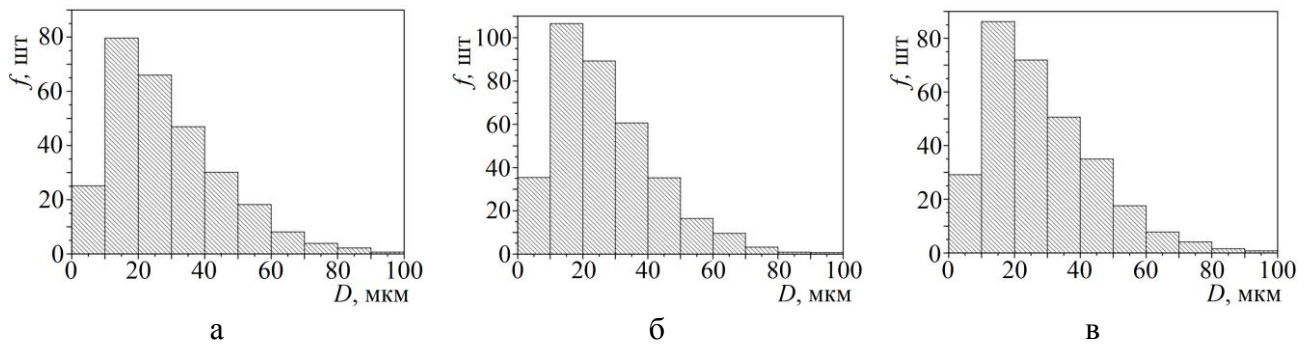


Рис. 1 – Гістограми розподілу частинок порошку ( $f$ ), отриманого з титанової губки, за діаметром Фере ( $D$ ): а – гідрованого; б – частково дегідрованого; в – повністю дегідрованого

Аналіз диференціальних кривих свідчить, що найменша ступінь полідисперсності характерна для порошку, отриманого гідруванням та частковим дегідруванням. Це свідчить про те, що процес гідрування-дегідрування частинок порошку отриманих з титанової губки можна розглядати як технологічний процес, за допомогою якого можна регулювати фракційний склад порошку.

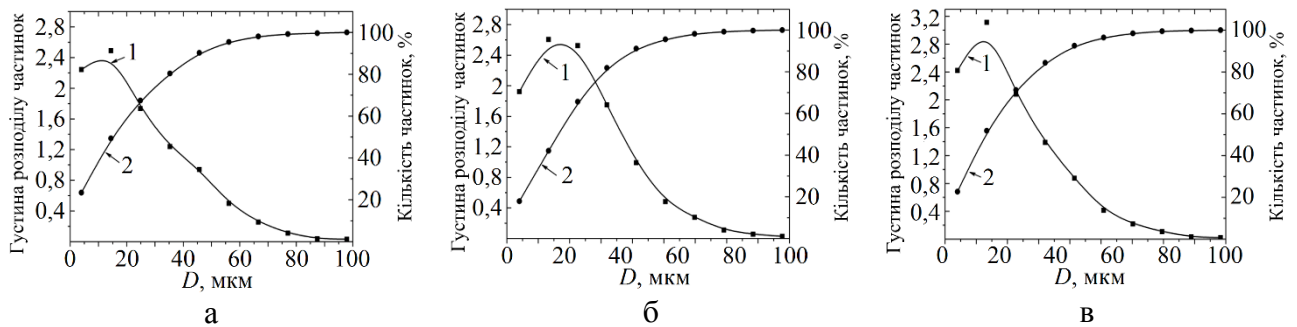


Рис. 2 – Диференціальна (1) та інтегральна (2) криві кількісного розподілу частинок порошку, отриманого з титанової губки, за діаметром Фере ( $D$ ): а – гідрованого; б – частково дегідрованого; в – повністю дегідрованого

Зокрема, результати порівняльних досліджень морфології поверхні частинок порошку отриманих з титанової губки свідчать, що присутність фази гідриду титану в структурі сприяє подрібненню частинок порошку та їх уоднорідненню за розмірами (Рис. 3).

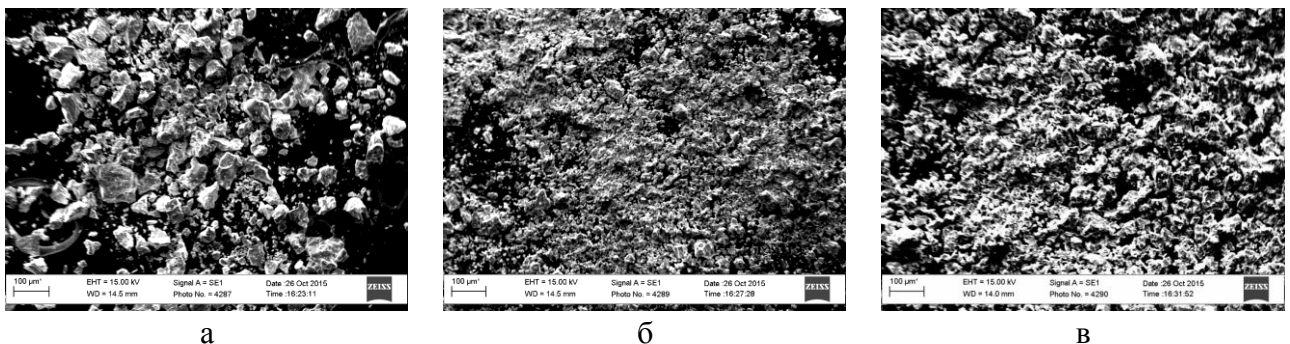


Рис. 3 – Морфологія поверхні частинок порошку отриманих з титанової губки: а – після процесу гідрування; б – після процесу гідрування та повного дегідрування; в – після процесу гідрування та часткового дегідрування

Методикою мікрорентгеноспектрального аналізу встановлено повну відповідність хімічного складу порошків з частинками сферичної та несферичної форми, що відповідає маркам VT6 та VT20 (Табл. 1).

Елементний аналіз порошків титанових сплавів марок ВТ6 та ВТ20

Марка сплаву та форма частинок порошку	Фракція, мкм	Розподіл елементів, мас. %				
		Ti	Al	V	Mo	Zr
ВТ6 (сферичний)	200...250	91,1	4,9	4,0	–	–
	160...200	90,9	5,3	3,8	–	–
	100...160	89,8	6,0	4,2	–	–
ВТ6 (несферичний)	200...250	89	6,1	4,9	–	–
	160...200	91,1	4,7	4,2	–	–
	100...160	91,3	5,6	3,1	–	–
ВТ20 (сферичний)	200...250	90,2	6,2	1,1	0,8	1,7
	160...200	90,3	5,4	1,5	1,2	1,6
	100...160	89,0	6,5	1,7	0,7	2,1
ВТ20 (несферичний)	200...250	91,8	4,3	2,1	0,7	1,1
	160...200	89,6	5,6	2,6	0,4	1,8
	100...160	89,2	6,1	1,3	2,1	1,3

Дослідження морфології поверхні сферичних частинок порошку показало, що для марки ВТ6 (Рис. 4) характерна дендритна будова поверхні сфероїдів та присутність дефектів у вигляді «сателітів». Наявність дендритів на поверхні частинок під час процесу 3D-друку може призвести до додаткового утворення дефектів у готовому виробі.

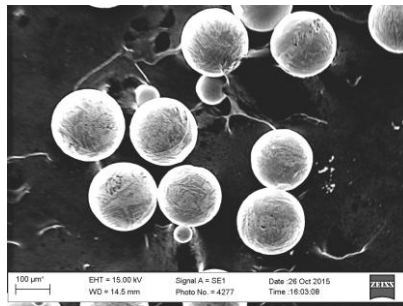
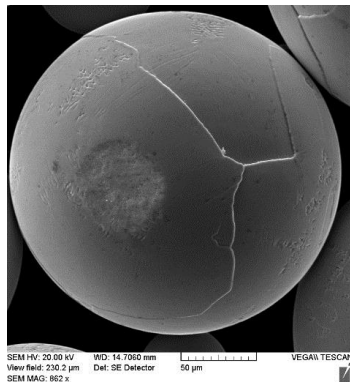
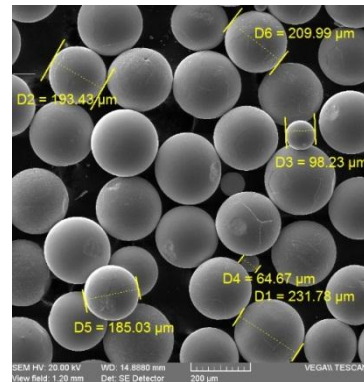


Рис. 4 – Морфологія сферичних частинок порошку сплаву марки ВТ6

Для сплаву марки ВТ20 притаманна бездефектна зеренна будова поверхні (Рис. 5, а) та відсутність конгломератів (Рис. 5, б).



а



б

Рис. 5 – Морфологія сферичних частинок порошку сплаву марки ВТ20

Дослідження кількісного розподілу частинок за розмірами дозволило встановити, що порошки титанового сплаву марки ВТ20 зі сферичними частинками характеризуються меншою ступінню полідисперсності (7,5-11,2 %), порівняно з порошками марки ВТ6 (11-15 %) (Табл. 2).

Таблиця 2

Полідисперсність порошків титанових сплавів марок ВТ20 та ВТ6 з частинками сферичної форми

Марка порошку	Фракція, мкм	Полідисперсність, %
ВТ20	200...250	7,5
	160...200	8,5
	100...160	11,2
ВТ6	200...250	11
	160...200	13,2
	100...160	15

Дослідження морфології поверхні несферичних частинок порошку показало, що деякі часточки сплаву марки ВТ6 характеризуються формою поверхні близькою до глобулярної (Рис. 6). Однак більшість частинок мають пористу чашкоподібну або пластинчасту форму. Це можна пояснити недостатнім насиченням порошків отриманих з титанової губки воднем під час гідрування, що служила вихідною сировиною для сплаву.

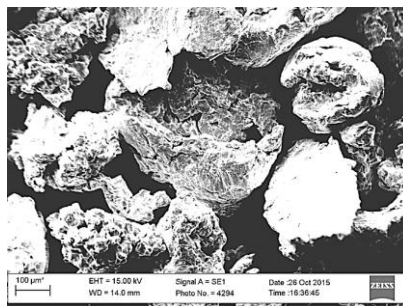
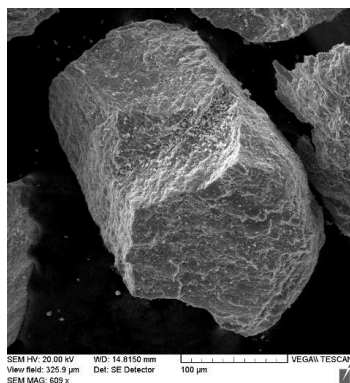
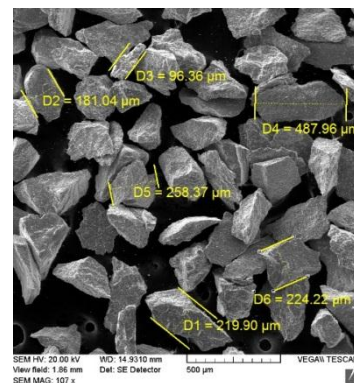


Рис. 6 – Морфологія несферичних частинок порошку сплаву марки ВТ6

Що стосується несферичних частинок порошку титанового сплаву марки ВТ20, то на їх поверхні спостерігаються характерні відколи, що свідчить про окрихнення сплаву під час гідрування (Рис. 7).



а



б

Рис. 7 – Морфологія несферичних частинок порошку сплаву марки ВТ20

Дослідження кількісного розподілу частинок за розмірами дозволило встановити, що порошки титанового сплаву марки ВТ20 з несферичними частинками характеризуються меншою ступінню полідисперсності (6,4-9,1 %), порівняно з порошками марки ВТ6 (12,8-15,6 %) (Табл. 3).

Таблиця 3

Полідисперсність порошків титанових сплавів марок ВТ20 та ВТ6 з частинками несферичної форми

Марка порошку	Фракція, мкм	Полідисперсність, %
ВТ20	200...250	6,4
	160...200	8,3
	100...160	9,1
ВТ6	200...250	12,8
	160...200	13,1
	100...160	15,6

У четвертому розділі представлено результати оцінювання мікромеханічних властивостей нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану ВТ1-0 – шар порошків сплаву ВТ20» з частинками сферичної та несферичної форми. Аналіз цих властивостей дозволив встановити залежність між фракційним складом частинок порошку, морфологією їх поверхні та границею плинності нарощуваного шару.

Показано, що структура досліджуваних шарів двофазна та складається переважно з  $\alpha$  фази і невеликої кількості  $\beta$  фази (Рис. 8). При цьому  $\alpha$ -фаза характеризується пластинчастою (ламелярною) будовою та розташовується в середині  $\beta$ -зерен.

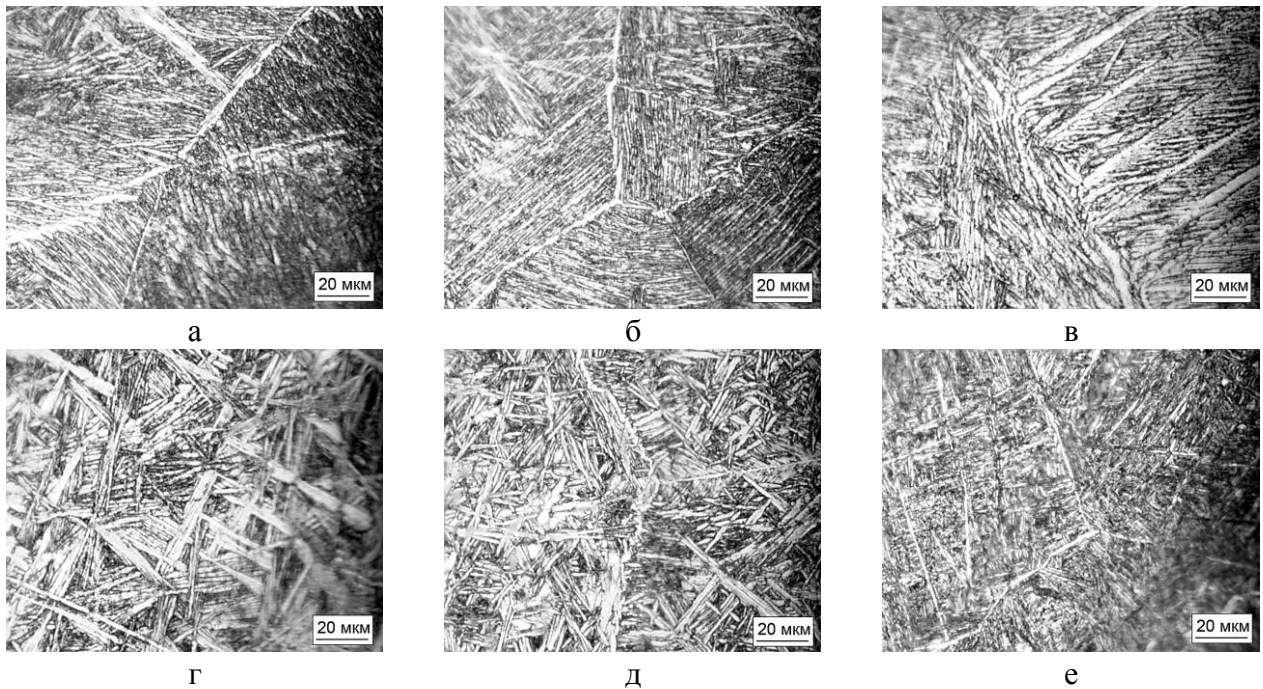


Рис. 8 – Мікроструктура нарощуваних шарів на основі порошків титанового сплаву марки ВТ20 з частинками несферичної (а, б, в) та сферичної (г, д, е) форми різних фракцій:

а, г – 200...250 мкм; б, д – 160...200 мкм; в, е – 100...160 мкм



В нарощуваних шарах, як на основі сферичних так і несферичних частинок порошків сплаву марки VT20 з фракцією 200...250 мкм металографічним аналізом встановлено присутність пор (Рис. 9).

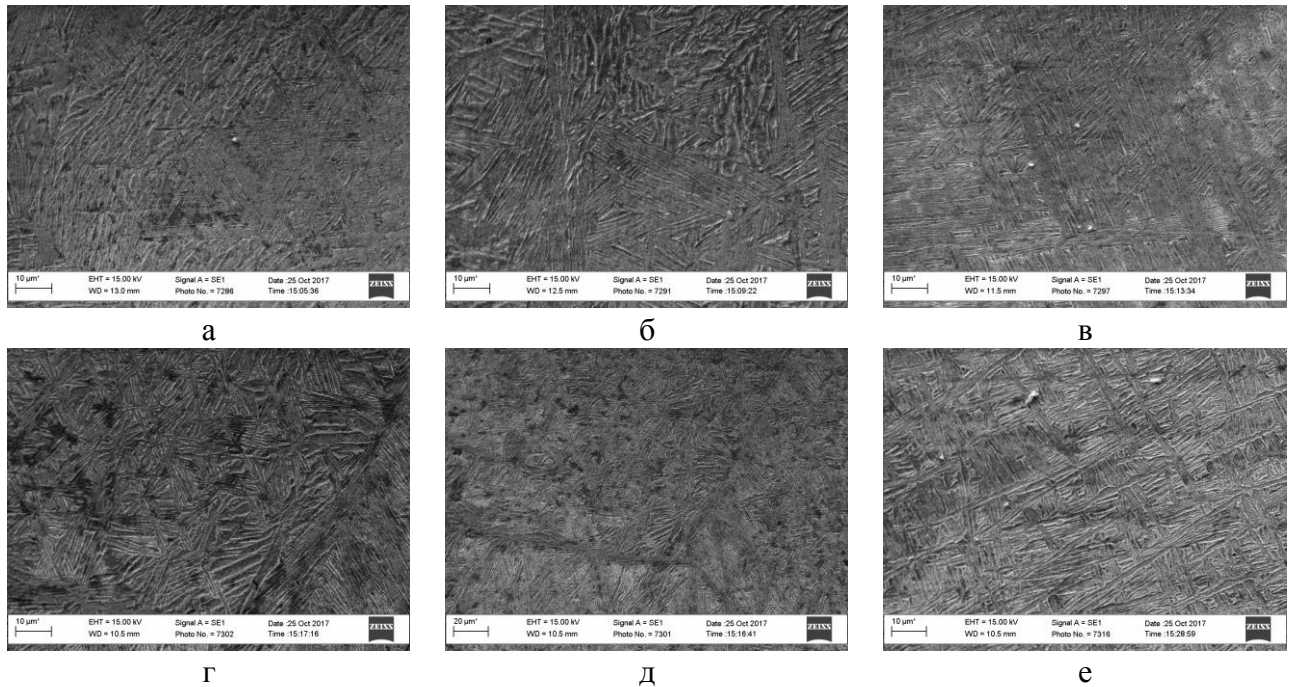


Рис. 9 – Морфологія поверхні нарощуваних шарів на основі порошків титанового сплаву марки VT20 з частинками несферичної (а, б, в) та сферичної (г, д, е) форми різних фракцій:  
а, г – 200...250 мкм; б, д – 160...200 мкм; в, е – 100...160 мкм

При цьому, на поверхні нарощуваних шарів на основі несферичних порошків титанового сплаву марки VT20 фракції 160...200 мкм пори відсутні, тоді як, на поверхні отриманої наплавленням сферичних порошків – навпаки присутні. Необхідно відмітити повну відсутність пор в нарощуваних шарах на основі порошків фракції 100...160 мкм, незалежно від морфології їх будови.

Встановлено, що найвищою мікротвердістю характеризуються нарощувані шари на основі порошків титанового сплаву марки VT20 фракції 160...200 мкм незалежно від форми частинок порошку (Табл. 4).

Таблиця 4

Значення мікротвердості та характеристики пластичності  $\delta_n$  для нарощуваних шарів на основі порошків титанового сплаву марки VT20

Форма частинок порошку	Розмір фракції, мкм	Мікротвердість HV $\pm\phi$ , ГПа	Пружна деформація ( $-\epsilon_{np}$ ), %	Загальна деформація ( $-\epsilon$ ), %	Пластична деформація ( $-\epsilon_n$ ), %	$\delta_n$
Несферична	200...250	4,30	0,19	7,56	7,75	0,975
	160...200	4,68	0,22		7,78	0,971
	100...160	4,55	0,21		7,77	0,973
Сферична	200...250	4,65	0,23		7,79	0,970
	160...200	4,68	0,22		7,78	0,971
	100...160	4,45	0,21		7,77	0,973

При цьому розраховане опосередковане значення характеристики пластичності  $\delta_n$  нарощуваних шарів досліджуваних сплавів практично не залежить від розміру та форми частинок порошку.

Отримані результати свідчать, що нарощувані шари на основі порошків з неферичними частинками за мікромеханічними властивостями (мікротвердість – 4,1-5,06 ГПа, характеристика пластичності – 0,97) не поступаються аналогічним на основі порошків зі сферичними (мікротвердість – 3,81-5,57 ГПа, характеристика пластичності – 0,97). Крім того встановлено, що нарощувані шари на основі порошків сплаву марки VT20, отримані технологією водневої обробки за механічними властивостями не поступаються своїм аналогам із сферичних порошків сплаву VT6.

На основі даних отриманих методом мікроіндентування побудовані графічні залежності «напруження ( $\sigma$ ) – деформація ( $\epsilon$ )». Встановлено, що для шарів із сферичних порошків титанового сплаву марки VT20 спостерігається зростання значень границі плинності (0,95-1,48 ГПа) при зменшенні розмірів частинок порошку (Рис. 10, а). Тобто у нарощуваних шарах з більш дрібнодисперсних фракцій сферичних порошків, розмір пор за товщиною шару зменшувався, а це, своєю чергою, сприяло підвищенню значень границі плинності. В той же час в шарах на основі неферичних порошків титанового сплаву марки VT20 різних фракцій, значення границі плинності (1,25-1,32 ГПа) майже не змінюється (Рис. 10, б).

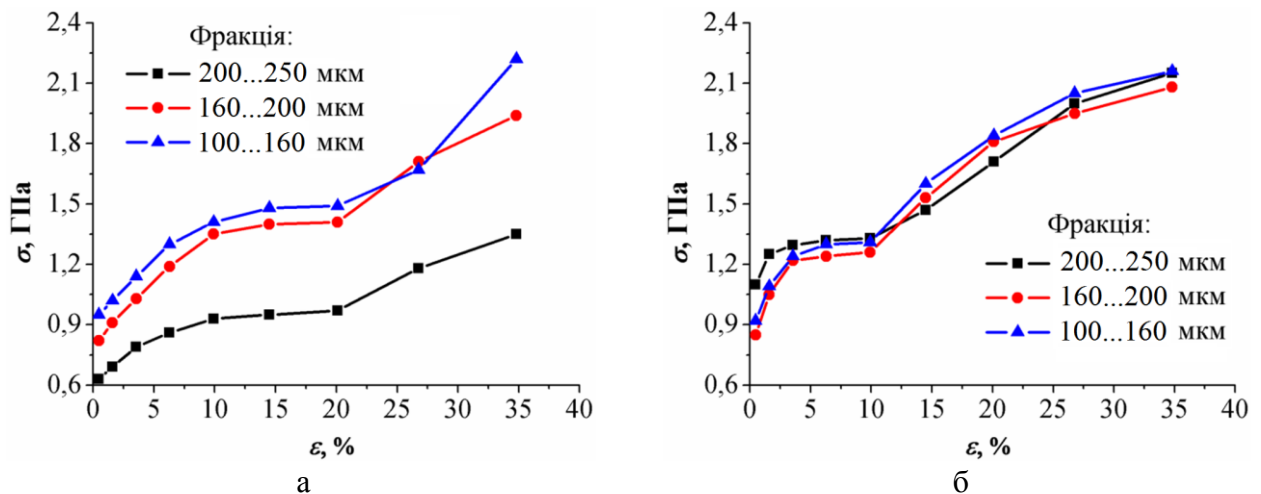


Рис. 10 – Залежність напружень від деформації, що виникають при індентуванні в нарощуваних шарах на основі порошків титанового сплаву марки VT20 з частинками сферичної (а) та неферичної (б) форми

Це може бути спричинено наявністю в їх структурі залишків гідриду титану  $TiH_{2+x}$  після процесу водневої обробки. Відомо, що наявність гідридних фаз викликає стабілізацію структури, уодноріднює розміри частинок порошку, зменшує їх схильність до конгломерації та уповільнює ріст зерен при кристалізації.

У п'ятому розділі проведено моделювання за допомогою розробленого програмного продукту на основі ймовірнісної нейронної мережі. Для реалізації процесу машинного навчання сформовано вихідну базу даних, як на основі попередньо одержаних експериментальних результатів досліджень морфології,

елементного та гранулометричного складу порошків титанових сплавів різних систем, так й з використанням даних з літературних джерел. Описано розроблений метод ідентифікації відповідності матеріалу, який базується на спільному використанні поліному Колмогорова-Габора другого степеня та алгоритмі Випадкового лісу.

Розроблено програмний продукт, що дозволяє подати окремі елементи масиву експериментальних даних у вигляді векторів багатовимірного простору (Рис. 11). Кластери точок (векторів) з близькими значеннями свідчать про певну густину ймовірності. Для кожної точки формується проста функція (наприклад функція Гауса), здійснюється зважене сумування і в результаті одержується оцінка загальної густини ймовірності.

За результатами багаторазового тестування програмного продукту на основі імовірнісної нейромережі (PNN), встановлено, що при оптимальному значенні ступеню експоненційного згладжування, точність отриманих даних за результатами моделювання сягає 80 %. Це свідчить про високий рівень відтворюваності результатів, що своєю чергою дозволяє проводити оптимізацію та прогнозування властивостей матеріалу, заощаджуючи при цьому інтелектуальні та матеріальні ресурси дослідника.

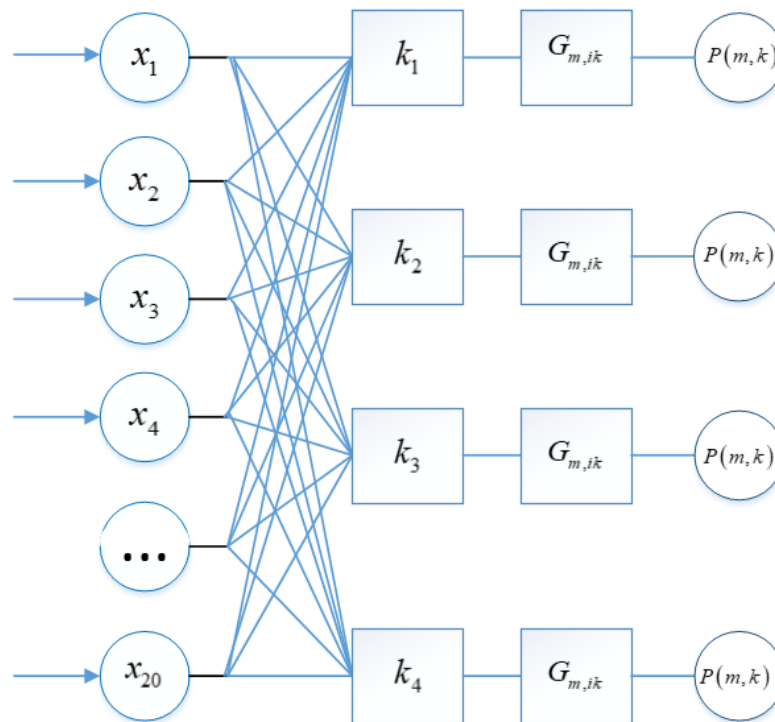


Рис.11 – Нейроподібна модель класифікації елементів на основі взаємозв'язку між ними

Наступний етап моделювання полягає у побудові навчальної та тестової вибірки на основі 20 ознак, які характеризують кожен з чотирьох класів (відмінні властивості матеріалу, оптимальні властивості матеріалу, можливі дефекти в матеріалі і бракований матеріал) порошків титанових сплавів (Рис. 12).



Рис. 12 – Схематичне представлення вихідної бази даних для моделювання

На основі цього розроблено метод ідентифікації класу матеріалу, який базується на спільному використанні поліному Колмогорова-Габора другого ступеня та алгоритмі «Випадкового лісу». Оцінка точності роботи в режимах навчання та застосування полягає у проведенні експериментального порівняння результатів роботи розробленого методу з результатами роботи існуючих методів: «Випадкового лісу», Логістичної регресії та Машини опорних векторів. Наведено візуалізацію результатів роботи усіх досліджених методів (Рис. 13). Розроблений метод керованого навчання дозволяє будувати моделі при опрацюванні великої кількості ознак кожного вхідного вектора. При цьому алгоритмом «Випадкового лісу» забезпечуються задовільні генералізуючі властивості при збереженні переваг додаткового підвищення точності на основі полінома Колмогорова-Габора.

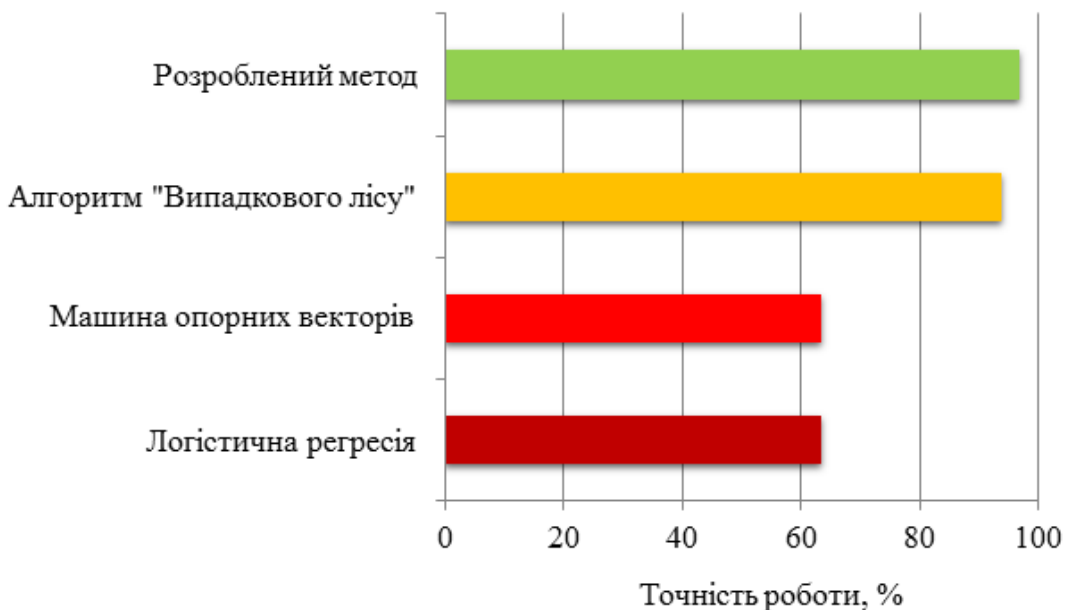


Рис. 13 – Порівняння описаних у роботі методів машинного навчання на основі візуалізації результатів їх роботи



Експериментально встановлено основні переваги розробленого методу, зокрема щодо додаткового підвищення точності розв'язання задач класифікації. Розроблений метод дозволяє підвищити точність моделювання на 34,38; 33,34 та 3,13 % порівняно з методами: Машина опорних векторів, Логістична регресія та «Випадковий ліс» відповідно. Здійснене моделювання дозволяє значно скоротити фінансові та часові витрати під час виготовлення виробів методами адитивних технологій. Застосування інструментарію штучного інтелекту зменшує трудомісткість та енерговитратність експериментів з визначення оптимальних характеристик порошкових матеріалів.

## ВИСНОВКИ

*У дисертації вирішено актуальну науково-технічну задачу, що полягає в оптимізації морфології поверхні, гранулометричного складу частинок порошків титанових сплавів (BT6, BT20) та мікромеханічних властивостей нарізаних шарів на їх основі для встановлення можливості застосування таких порошків в адитивному виробництві.*

1. Встановлено, що використання водневої обробки методом гідрування та часткового дегідрування дозволяє отримати оптимальний гранулометричний склад та морфологію поверхні несферичних за формою частинок порошку отриманого з титанової губки. Зокрема показано, що після гідрування, в межах досліджуваної фракції 10...70 мкм, домінуюча частка порошків з однорідними за розмірами частинками несферичної форми становить 60 %. Після гідрування та повного дегідрування цей параметр зростає до 70 %, а після гідрування та часткового дегідрування – до 78 %. Аналіз кривих розподілу частинок порошку за розмірами свідчить, що найменша ступінь полідисперсності (2,2 %) характерна для порошку, отриманого гідруванням та частковим дегідруванням.

2. Показано, що поверхня порошків сплаву BT6 зі сферичними частинками характеризується дендритною структурою та присутністю «сателітів», що при застосуванні їх в 3D-друці призведе до погіршення властивостей отриманого виробу. При цьому порошки сплаву марки BT20 зі сферичними частинками мають бездефектну зернисту будову поверхні, що робить їх відмінною сировиною для адитивних технологій.

3. Встановлено, що порошки сплаву марки BT6 з частинками несферичної форми характеризуються формою поверхні близькою до глобулярної, однак більшість частинок мають пористу чашкоподібну або пластинчасту форму, що спровокує появу додаткових дефектів при 3D-друці. Натомість, порошки сплаву марки BT20 з частинками несферичної форми характеризуються безпористою, рівноосною будовою, а їх форма наближається до сферичної.

4. За результатами гранулометричного аналізу сферичних порошків сплавів BT6 та BT20, що отримані методом відцентрового плазмового розпилення електроду, виявлено незначний розкид частинок за розмірами після просіювання ситовим методом в межах однієї фракції. Однак, дослідження їхньої полідисперсності показано, що ступінь неоднорідності розмірів часточок порошку сплаву BT20 (7,5-11,2 %) є нижчим, ніж у частинках порошку сплаву BT6 (11-15 %).

5. За результатами гранулометричного аналізу несферичних порошків виявлено значний розкид за розмірами частинок сплаву марки ВТ6, полідисперсність яких сягає понад 15 %. Зокрема, для порошків сплаву марки ВТ20 ступінь неоднорідності не перевищує 10 %. Таким чином, враховуючи незначний розкид за розмірами та наближеність форми частинок порошку сплаву марки ВТ20 до сферичної, такі порошки можна застосовувати як альтернативну сировину для адитивних технологій.

6. Для оцінки мікротвердості, рівня пластичності та границі плинності нарощуваних шарів в системі «підкладка технічного титану ВТ1-0 – шар порошків сплаву ВТ20» з частинками сферичної або несферичної форми застосовано методіку мікроідентування. Встановлено, що найвищою мікротвердістю (HV 4,68 ГПа) характеризуються нарощувані шари порошків сплаву ВТ20 фракції 160...200 мкм незалежно від їх морфології. При цьому значення характеристики пластичності (0,97 %) та границі плинності (1,25-1,32 ГПа) цих шарів з несферичних частинок порошку не поступаються значенням характеристики пластичності (0,97 %) та границі плинності (0,95-1,48 ГПа) шарів зі сферичних частинок порошку незалежно від їх фракційного складу.

7. Розроблено програмний продукт на основі ймовірнісної нейронної мережі. Встановлено, що за оптимального значення ступеню експоненційного згладжування, точність результатів моделювання складає 80%. Високий рівень відтворюваності експериментальних даних дозволяє повністю або частково замінити ряд експериментальних досліджень нейромережевим моделюванням помітно зменшуючи при цьому вартість одержання порошкових матеріалів з наперед означеними властивостями при збереженні показників якості.

8. Розроблено метод ідентифікації властивостей досліджуваних порошкових матеріалів на основі комбінованого використання алгоритму «Випадкового лісу» та полінома Колмогорова-Габора, що забезпечило підвищення точності розв'язанні задач класифікації до 96,88 %. Застосування такого інструментарію штучного інтелекту дозволяє зменшити фінансові та часові витрати на проведення експериментів з визначення оптимальних характеристик порошкових матеріалів для адитивних технологій.

9. Для АТ «МОТОР СІЧ» розроблено рекомендації з модернізації технологічного процесу відновлення лопаток (ВТ20) турбін авіаційних двигунів за допомогою адитивних технологій. Очікуваний економічний ефект від впровадження отриманих результатів досліджень складає 80000 грн./рік (акт про використання технічних рекомендацій додається).

10. Одержані результати досліджень впроваджено у навчальний процес Національного університету «Львівська політехніка» при викладанні лекційних курсів та лабораторних робіт з дисциплін «Порошкові та композиційні матеріали», «Фізика та хімія поверхні», «Технології наноматеріалів» та «Комп'ютерні технології у ливарному виробництві» для спеціальностей 132 – матеріалознавство та 136 – металургія (акт впровадження додається).

## СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

### *Статті у наукових виданнях що включені до міжнародних наукометричних баз даних*

1. Z. Duriagina, A. Trostyanchyn, **I. Lemishka**, A. Skrebtsov, O. Ovchinnikov. The influence of chemical-thermal treatment on granulometric characteristics of titanium sponge powder // Ukrainian Journal of Mechanical Engineering and Materials Science – 2017. – №1. – P. – 73-80. *Здобувач дослідив вплив водневої обробки на структуру, морфологію та гранулометричний склад порошків титанової губки.*

2. Z.A. Duriagina, R.O. Tkachenko, A.M. Trostianchyn, **I.A. Lemishka**, A.M. Kovalchuk, V.V. Kulyk, T.M. Kovbasyuk. Determination of the best microstructure and titanium alloy powders properties using neural network // Journal of Achievements of Materials and Manufacturing Engineering. – 2018. – 87/1. – pp. 25-31. *Здобувач сформував вихідну базу даних для досліджень та провів «навчання» ймовірнісної нейронної мережі.*

3. R. Tkachenko, Z. Duriagina, **I. Lemishka**, I. Izonin, A. Trostianchyn. Development of machine learning method of titanium alloy properties identification in additive technologies // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2018. – Vol. 3. – № 12 (93). – pp. 23-31. *Здобувач сформував вихідну базу даних та провів моделювання на основі методів машинного навчання.*

### *Статті у наукових фахових виданнях України*

4. Дурягіна З.А., Тростянчин А.М., **Лемішка І.А.**, Джуган О.А. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву ВТ6, отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – Запоріжжя. – 2017. – №1. – с. 26-28. *Здобувач дослідив морфологію та гранулометричний склад порошків титанового сплаву марки ВТ20.*

5. Дурягіна З.А., Тростянчин А.М., **Лемішка І.А.**, Скребцов А.А., Овчинников О.В. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву ВТ20 отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду // Металознавство та обробка металів. – Київ. – 2017. – №1. – с. – 45-51. *Здобувач дослідив морфологію та гранулометричний склад порошків титанового сплаву марки ВТ20.*

### *Тези конференцій*

6. Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., **Лемішка І. А.**, Джуган О. А. Вплив структурно-геометричних параметрів на властивості порошків на основі титану // Сучасні проблеми фізики металів і металевих систем. Тези доповідей – Київ: Інститут металофізики ім. Г.В. Курдюмова 2016. – с. – 138. *Здобувач дослідив фазовий склад та гранулометричні характеристики досліджуваних порошків (стендова доповідь).*

7. Z. Duriagina, A. Trostianchyn, **I. Lemishka**. The influence of chemical composition on the morphology of spherical powders based on titanium alloys //

Наноструктурные материалы – 2016: Беларусь – Россия – Украина: НАНО–2016: материалы V Междунар. науч. конф., Минск – 2016. – с. – 158-160. *Здобувач дослідив морфологію та визначив гранулометричні характеристики досліджуваних порошків* (стендова доповідь).

**8.** Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., **Лемішка І. А.**, Джуган О. А. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву VT20, одержаного методом відцентрового плазмового розпорошення електроду // Нанорозмірні системи: будова, властивості, технології. Матеріали V наукової конференції – Київ. – 2016. – с. – 61. *Здобувач дослідив морфологію та визначив гранулометричні характеристики досліджуваних порошків* (стендова доповідь).

**9.** Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., **Лемішка І. А.**, Джуган О. А. Гранулометричні характеристики порошку титанового сплаву VT6, отриманого методом відцентрового плазмового розпилення електроду // Титан 2016: Виробництво та використання в авіабудуванні. Матеріали IV міжнародної науково-практичної конференції – Запоріжжя. – 2016. – с. – 48-52. *Здобувач дослідив морфологію та визначив гранулометричні характеристики досліджуваних порошків* (усна доповідь).

**10.** Дурягіна З. А., Тростянчин А. М., **Лемішка І. А.** Дослідження гранулометричних характеристик несферичного гідрованого-дегідрованого порошку титанового сплаву марки VT20 // Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів. Матеріали доповідей Десятої міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених – Київ. – 2017. – с. – 119-121. *Здобувач дослідив морфологію та визначив гранулометричні характеристики досліджуваних порошків* (стендова доповідь).

**11.** Дурягіна З.А., Ткаченко Р.О., Тростянчин А.М., **Лемішка І.А.**, Ковальчук А.М. Прогнозування мікроструктури та властивостей титанових сплавів нейромережевим моделюванням // Системи та засоби штучного інтелекту: тези доповідей Міжнародної наукової молодіжної школи. – 2017. с. – 67-69. *Здобувач сформував пакет даних у вигляді двійкової системи для проведення «навчання» імовірнісної нейронної мережі* (стендова доповідь).

**12.** З.А. Дурягіна, А.М. Тростянчин, **І.А. Лемішка**. Вплив морфології та фракційного складу на мікротвердість та характеристику пластичності наплавлених шарів порошків титанового сплаву марки VT20 // Матеріали Міжнародної конференції «Титан 2018: Производство и применение в Украине». – 2018. – с. 44. *Здобувач дослідив структуру та морфологію поверхні наплавлених покриттів, встановив значення мікротвердості, характеристики пластичності та границі плинності досліджуваних шарів* (стендова доповідь).

**13.** Duriagina Z., **Lemishka I.**, Trostianchyn A. Investigation of the morphology of the structure and granulometric characteristics of the non-spherical powders of titanium alloy of the brand VT6 // 10<sup>th</sup> International conference: Advanced materials and technologies. –Ninghai. – 2018. – P.36. *Здобувач дослідив морфологію та визначив гранулометричні характеристики досліджуваних порошків* (усна доповідь).

## АНОТАЦІЯ

**Лемішка І.А. Оптимізація параметрів мікроструктури та властивостей композиційних матеріалів на основі титанових сплавів для адитивних технологій.** – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.02.01 – Матеріалознавство. – Луцький національний технічний університет, м. Луцьк, 2019.

У дисертаційній роботі вирішено науково-технічного завдання, що полягає в оптимізації параметрів мікроструктури та властивостей порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми для можливості застосування їх в адитивних технологіях.

В роботі проведено порівняльний аналіз порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми. Встановлено особливості морфології поверхні порошків з частинками сферичної форми отриманих за технологією відцентрового плазмового розпилення електроду та частинок несферичної форми отриманих за технологією гідрування-дегідрування. Встановлено взаємозв'язок між будовою, фазовим складом, гранулометричними характеристиками порошків титанових сплавів марок ВТ6 та ВТ20 з частинками сферичної та несферичної форми та механічними властивостями нарощуваних шарів на їх основі. За результатами досліджень було сформовано базу даних у вигляді двійкової системи. Розроблено програмний продукт, що ґрунтується на ймовірнісній нейронній мережі та проведено його «навчання». Розроблено новий метод класифікації на основі комбінованого використання алгоритму «Випадкового лісу» та полінома Колмогорова-Габора, що дозволив значно підвищити точність результатів моделювання.

На основі результатів досліджень запропоновано оптимальний гранулометричний склад порошків титанових сплавів з частинками сферичної та несферичної форми для застосування їх для виготовлення, а також відновлення деталей аерокосмічної техніки за допомогою адитивних технологій.

**Ключові слова:** порошки титану, титанові сплави, адитивні технології, гідрування-дегідрування, гранулометричний аналіз, мікроіндентування, нейронно-мережеве моделювання, методи машинного навчання.

## АННОТАЦИЯ

**Лемишка И.А. Оптимизация параметров микроструктуры и свойств композиционных материалов на основе титановых сплавов для аддитивных технологий.** - На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.02.01 – Материаловедение. – Луцкий национальный технический университет, Луцк, 2019.

В диссертационной работе решено научно-техническое задание, что заключается в оптимизации параметров микроструктуры и свойств порошков титановых сплавов с частицами сферической и несферической формы для возможности применения их в аддитивных технологиях.

В работе проведен сравнительный анализ порошков титановых сплавов с частицами сферической и несферической формы. Установлены особенности морфологии поверхности порошков с частицами сферической формы полученных по технологии центробежного плазменного распыления электрода и частиц

несферической формы полученных по технологии гидрирования-дегидрирования. Установлена взаимосвязь между строением, фазовым составом, гранулометрическими характеристиками порошков титановых сплавов марок VT6 и VT20 с частицами сферической и несферической формы и механическими свойствами наращиваемых слоев на их основе. По результатам исследований было сформировано базу данных в виде двоичной системы. Разработан программный продукт, основанный на вероятностной нейронной сети и проведено его «обучение». Разработан новый метод классификации на основе комбинированного использования алгоритма «Случайного леса» и полинома Колмогорова-Габора, который позволил значительно повысить точность результатов моделирования.

На основе результатов исследований предложен оптимальный гранулометрический состав порошков титановых сплавов с частицами сферической и несферической формы для применения их для изготовления, а также восстановления деталей аэрокосмической техники с помощью аддитивных технологий.

**Ключевые слова:** порошки титана, титановые сплавы, аддитивные технологии, гидрирования-дегидрирования, гранулометрический анализ, микроиндентирование.

## ABSTRACT

**Lemishka I.A. Optimization of microstructure parameters and properties of composite materials based on titanium alloys for additive technologies.** – Manuscript.

Thesis for degree of Candidate of technical sciences by specialty 05.02.01 – Materials Science. – Lutsk National Technical University, Lutsk, 2019.

The thesis is devoted to the solution of the scientific and technical problem, which consists in optimization of microstructure parameters and properties of powders of titanium alloys with particles of spherical and non-spherical form for the possibility of their application in additive technologies.

A comparative analysis of powders of titanium alloys with particles of spherical and non-spherical form is carried out. The peculiarities of the surface morphology of powders with particles of spherical form obtained by the technology of plasma rotating electrode process and particles of a non-spherical form obtained by hydrogenation-dehydrogenation technology are established. The relationship between structure, phase composition, granulometric characteristics of powders of titanium alloys of grades VT6 and VT20 with particles of spherical and non-spherical form and mechanical properties of expanding layers on their basis are established. According to the research results, the database was formed in the form of a binary system. A software product based on a probabilistic neural network and its "training" has been developed. A new classification method based on the combined use of the "Random forest" algorithm and the Kolmogorov-Gabor polynomial has been developed, which has significantly improved the accuracy of the simulation results.

On the basis of the results of the research, an optimum granulometric composition of titanium alloy powders with particles of spherical and non-spherical form is proposed for their application for manufacturing, as well as the restoration of aerospace engineering components with the help of additive technologies.

**Key words:** titanium powders, titanium alloys, additive technologies, hydrogenation-dehydrogenation, granulometric analysis, microindentation.