

PACS numbers: 61.43.Gt, 62.20.fg, 81.05.Rm, 81.07.Wx, 81.20.Ev, 83.60.La, 83.80.Fg

Деградаційні властивості титанового ступу Ti–6Al–4V в процесі селективного лазерного спікання

М. Ю. Єфіменко, О. О. Дмитриченко, Я. Б. Головенько, Д. С. Леонов,
М. Ю. Барабаш, Ю. І. Богомол

¹Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»,
просп. Берестейський, 37,
03056 Київ, Україна

²Технічний центр НАН України,
вул. Покровська, 13,
04070 Київ, Україна

З'ясовано вплив багаторазового використання порошку титанового ступу Ti–6Al–4V у процесі селективного лазерного топлення (SLM) на його фізико-хімічні властивості й якість одержаних виробів. Проведено комплексне дослідження гранулометричного складу, мікроструктури, хімічного складу та механічних властивостей порошку на різних етапах його експлуатації. Виявлено деградаційні процеси, такі як утворення оксидів, морфологічні зміни частинок, зростання вмісту Оксигену й агломерація, що призводять до погіршення механічних характеристик друкованих виробів. Проаналізовано методи регенерації порошку, зокрема просіювання та додавання нового матеріалу, що дають змогу частково відновити його властивості. Представлено рекомендації щодо оптимальних умов використання та регенерації порошку, які спрямовані на підвищення ефективності адитивного виробництва. Результати дослідження є корисними для промислових і медичних застосувань, де критичним є баланс між економічністю й якістю продукції.

The impact of multiple reuse of titanium Ti–6Al–4V-alloy powder in the selective laser melting (SLM) process on its physicochemical properties and the quality of the fabricated wares is revealed. A comprehensive study is concerned to the particle-sizes' distribution, microstructure, chemical composition, and mechanical properties of the powder at various stages of its usage. Degradation processes, including oxide formation, particle-morphology changes, increased oxygen content, and particle agglomeration, are identified as factors deteriorating the mechanical properties of printed products. Methods for powder regeneration, such as sieving and adding new material, are analysed and shown to restore partially its

properties. Recommendations on optimal conditions for the powder use and regeneration are provided, aiming to enhance the efficiency of additive manufacturing. The study findings are valuable for the industrial and medical applications, where a balance between cost-effectiveness and product quality is critical.

Ключові слова: Ti-6Al-4V, селективне лазерне топлення, повторне використання порошку, деградація, мікроструктура, механічні властивості, утворення оксидів, адитивне виробництво.

Key words: Ti-6Al-4V, selective laser melting, powder reuse, degradation, microstructure, mechanical properties, oxide formation, additive manufacturing.

(Отримано 24 грудня 2024 р.; після доопрацювання — 5 лютого 2025 р.)

1. ВСТУП

Адитивне виробництво, зокрема селективне лазерне топлення (SLM), активно використовується для виготовлення виробів зі стопу Ti-6Al-4V завдяки його високим механічним властивостям, корозійній стійкості та біосумісності [1, 2]. Цей титановий стоп є ключовим матеріалом для аерокосмічної, медичної й автомобільної промисловостей [3]. Однак значна вартість порошку Ti-6Al-4V зумовлює необхідність його багаторазового використання, що є важливим економічним чинником для масштабного виробництва [4].

Багаторазове використання порошку в процесі SLM призводить до деградації його характеристик, що може вплинути на:

- гранулометричний склад (розподіл розмірів частинок) [5];
- морфологію частинок (форму, поверхневі дефекти) [6];
- хемічний склад, зокрема зростання вмісту Оксигену [7];
- механічні властивості надрукованих виробів (міцність, пластичність) [8].

Накопичення оксидних плівок, агломерація частинок і порушення однорідності розподілу розмірів понижують якість і довговічність виробів [4, 9]. Відсутність чітких рекомендацій щодо обмеження циклів використання порошку та методів його регенерації створює практичну проблему у промислових умовах [10].

Метою даної роботи є дослідження впливу багаторазового використання порошку Ti-6Al-4V на його гранулометричний склад, мікроструктуру, хемічний склад і механічні властивості виробів, виготовлених методом SLM.

Для досягнення цієї мети були поставлені наступні завдання:

1. провести гранулометричну аналізу порошку на різних етапах використання;

2. дослідити мікроструктуру частинок за допомогою СЕМ для виявлення дефектів та агломерації;
3. оцінити вміст Оксигену та його вплив на якість порошку;
4. проаналізувати механічні властивості зразків після різної кількості циклів повторного використання;
5. розробити рекомендації щодо кількості циклів використання порошку та методів його регенерації.

Адитивне виробництво, зокрема селективне лазерне топлення (SLM), активно використовується для виготовлення виробів зі ступу Ti-6Al-4V завдяки його винятковим властивостям: високій питомій міцності, стійкості щодо корозії та сумісності з біологічними тканинами [11, 12]. Технологія SLM уможливорює виробляти складні деталі з високою точністю, але стабільність властивостей порошку залишається важливим чинником, особливо за його багаторазового використання [13].

В процесі повторного використання порошку Ti-6Al-4V спостерігаються такі основні зміни: збільшення вмісту Оксигену, морфологічні зміни порошку, порушення ґранулометричного складу та пониження механічних властивостей надрукованих виробів. Під впливом високих температур у камері друку відбувається поверхневе окиснення частинок, що підвищує вміст Оксигену [14, 15]. У дослідженнях Pedrazzini та ін. було встановлено, що вміст Оксигену підвищується з 0,11% до 0,15% після 20 циклів використання порошку [16]. Це призводить до утворення оксидів на поверхні частинок і пониження пластичності та міцності на розтяг.

Морфологічні зміни є ще однією істотною проблемою, що впливає на властивості порошку. За багаторазового використання порошок втрачає сферичну форму через утворення агломератів і супутників [16]. Lutter-Günther та ін. показали, що після 10 циклів кількість агломератів збільшується на 15–20%, що призводить до нерівномірного укладання порошкових шарів і пониження якості надрукованих виробів [14]. Ґранулометрична аналіза підтвердила, що у новому порошку середній розмір частинок (D50) становить 30–35 мкм; однак після кількох циклів повторного використання частка великих частинок збільшується через об'єднання й агломерацію [8]. У свою чергу, просіювання порошку дає змогу понизити D50 до 28 мкм і поліпшити однорідність розподілу частинок (SPAN < 1,0) [12].

Зміни у властивостях порошку безпосередньо впливають на механічні властивості надрукованих виробів. Moridi та ін. показали, що багаторазове використання порошку понижує міцність на розтяг на 5–10% після 30 циклів використання (з 1100 МПа до 1030 МПа), а подовження зменшується з 14% до 12% через утворення внутрішніх оксидних включень і дефектів структури

[11]. Регулярне просіювання порошку та додавання нового матеріалу компенсує часткову деградацію властивостей [6].

Одним із ефективних методів регенерації порошку є просіювання, особливо через дрібні сита (40–50 мкм), що уможлиблює видалити великі агломерати та дефектні частинки. Tang та ін. продемонстрували, що просіювання дає змогу понизити SPAN з 1,1 до 0,97 і поліпшити сипучість порошку [7]. Додавання нового порошку методом «топ-ап» (10–20% нового матеріалу після 5–7 циклів) показує позитивний вплив на відновлення механічних властивостей [12].

Попри наявність численних досліджень, що стосуються багаторазового використання порошків Ti–6Al–4V у SLM, залишаються невирішеними наступні питання. Відсутня систематична аналіза деградації порошку на різних етапах використання, включно з гранулометриєю, СЕМ-зображеннями та хемічною аналізою. Недостатньо вивчено вплив зростання вмісту Оксигену на втомну міцність виробів, а також ефективність комбінованих методів регенерації, таких як просіювання та додавання нового порошку.

Дана робота вирішує вищезазначені прогалини шляхом комплексної аналізи порошку Ti–6Al–4V на різних етапах багаторазового використання. Особливу увагу приділено змінам у гранулометричному складі, мікроструктурі та механічних властивостях надрукованих виробів, а також визначенню оптимальних умов для регенерації порошку.

2. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНА МЕТОДИКА

У цьому дослідженні використовувався порошок стопу Ti–6Al–4V Eli Grade 23, сертифікованого для медичних застосувань. Виробник заявив гранулометричний склад порошку із середнім розміром частинок (D50), що становив близько 35 мкм. Порошок застосовувався в процесі селективного лазерного топлення (SLM), яке виконувалося на установці Concept Laser M2 із постійними параметрами, зазначеними виробником. Аналізі підлягали зразки нового порошку, порошку після 30 циклів використання, а також порошку, який був визнаний непридатним для подальшого використання, тобто відсіву.

Друк зразків виконувався в умовах захисної атмосфери аргону, у якій концентрація кисню не перевищувала 0,3% під час роботи принтера. Температура платформи підтримувалася на рівні 200°C, а висота шару становила 50 мкм. У процесі багаторазового використання порошку його властивості регулювали шляхом просіювання та періодичного додавання нового порошку в об'ємі від 3 до 6 кг на кожні 3–5 циклів друку. Для оцінки впливу повторного використання порошку кожен другий запуск принтера

використовувався для виготовлення механічних зразків.

Для вивчення змін у морфології частинок порошку використовувався сканувальний електронний мікроскоп (СЕМ). Знімки виконувалися із збільшеннями у діапазоні від 50 до 1000 разів, що уможливлювало аналізувати форму частинок, наявність дефектів поверхні, супутників і агломератів. Це забезпечувало глибоке розуміння змін, які відбуваються під час багаторазового використання порошку.

Фазовий склад порошку оцінювався за допомогою рентгенофазного дифрактометра Rigaku Ultima-IV. Дослідження виконувалися в діапазоні кутів від 20 до 80°, що уможливлювало ідентифікувати основні фази, такі як α -фаза (гексагональна щільнопакована структура), β -фаза (кубічна об'ємноцентрована структура), а також можливі оксиди Титану (TiO_2). Цей метод забезпечує точну характеристику кристалічної структури матеріалу та її змін у процесі використання [11, 12].

Випробування механічних властивостей зразків проводилися відповідно до стандарту ISO 6892. Зразки для випробувань мали циліндричну форму з діаметром у 4,86 мм і висотою у 30 мм. Під час випробувань визначали міцність на розтяг (UTS) і подовження до руйнування, що дало змогу оцінити вплив змін у структурі порошку на властивості готових виробів [13, 14].

Гранулометрична аналіза виконувалася за допомогою Better-sizer S3 Plus. Порошок диспергували в ізопропіловому спирті з попереднім роз'єднанням частинок в ультразвуковій ванні. Це дало змогу уникнути агломерації та забезпечило точність вимірювань розмірів частинок. Параметри розподілу розмірів, такі як D10, D50, D90 та SPAN, використовувалися для оцінки якості порошку після кожного етапу регенерації [15, 16].

3. РЕЗУЛЬТАТИ ТА ЇХ ОБГОВОРЕННЯ

3.1. Фазовий склад

Рентгенофазна аналіза порошків Ti-6Al-4V (рис. 1) уможливила оцінити фазовий склад нового порошку, порошку після 30 циклів використання та відсіву. Дослідження показали істотні зміни у структурі частинок залежно від кількості циклів використання.

Новий порошок складався переважно з α -фази, яка характеризується гексагональною щільнопакованою структурою. Ця фаза забезпечує оптимальні механічні властивості стопу Ti-6Al-4V, що робить його придатним для медичних і промислових застосувань. Рентгенофазна аналіза не виявила β -фази чи оксидів Титану, що підтверджує високу чистоту матеріалу. Основні піки на дифрактограмі відповідають α -фазі титану, зокрема площинам

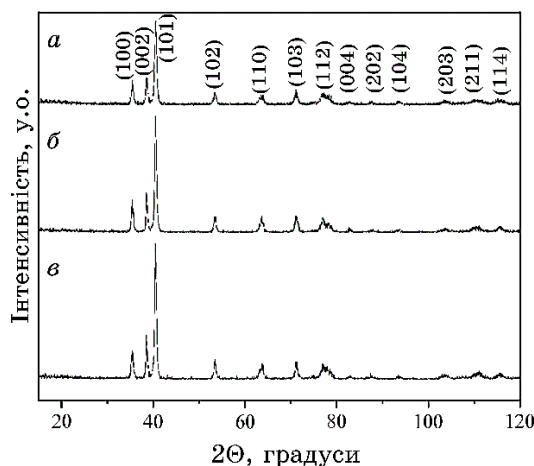


Рис. 1. Рентгенівські дифрактограми порошків Ti-6Al-4V: *а* — відсів; *б* — 30 циклів; *в* — новий.¹

(100), (002) та (101). Параметри елементарної комірки становлять $a = 2,9278(8) \text{ \AA}$, $c = 4,6646(14) \text{ \AA}$, а об'єм — $V = 34,627(16) \text{ \AA}^3$. Це свідчить про відповідність нового порошку стандартам ASTM F136, що забезпечує його придатність для використання в процесах селективного лазерного топлення (SLM).

Порошок після 30 циклів використання демонструє істотні зміни у фазовому складі. Основною зміною є поява β -фази, яка раніше була відсутня. Аналіза інтенсивності піків свідчить про те, що частка β -фази зросла до 5–8%, що вказує на структурну трансформацію під впливом термічного навантаження. Крім того, з'явилися оксиди Титану, зокрема у формі рутилу (TiO_2), що свідчить про окиснення матеріалу через залишковий кисень у камері під час багаторазового використання порошку. Параметри α -фази теж зазнали змін: $a = 2,9284(11) \text{ \AA}$, $c = 4,6638(19) \text{ \AA}$, а об'єм елементарної комірки збільшився до $V = 34,64(2) \text{ \AA}^3$. Такі зміни можуть бути зумовлені розчиненням Оксигену в α -фазі та накопиченням мікроефектів у кристалічній структурі. Хоча ці зміни погіршують властивості матеріалу, порошок після 30 циклів ще може використовуватися за умови суворого контролю якості.

Відсів порошку, який не використовується в процесі друку, демонструє найгірші результати серед усіх досліджених зразків. Основну частину його фазового складу становлять оксиди Титану (TiO_2), тоді як α -фаза збереглася у деградованій формі. Об'єм елементарної комірки α -фази зменшився до $V = 34,603(14) \text{ \AA}^3$, що свідчить про значну деградацію структури. Крім того, ширина піків рентгенограм вказує на підвищену мікроефектацію та зменшення розміру кристалітів, що є ознакою значної дефектно-

сти матеріалу. Такі зміни роблять відсів непридатним для повторного використання у процесах SLM.

Результати рентгенофазної аналізи показують, що новий порошок відповідає стандартам, необхідним для SLM, тоді як багаторазове використання порошку (30 циклів) спричиняє накопичення β -фази й оксидів, що впливають на механічні властивості. Порошок відсіву є повністю деградованим і непридатним для подальшого використання. Ці висновки підкреслюють важливість регенерації та контролю якості порошку під час його багаторазового використання.

3.2. Мікроструктура

На рисунку 2 представлено мікроструктуру порошків Ti-6Al-4V у різних станах. Новий порошок має сферичну форму із гладкою поверхнею; після 30 циклів використання спостерігається наявність супутників і дефектів; просіювання через сита (80 мкм і 50 мкм) поліпшує форму частинок, зменшуючи кількість дефектів; відсів демонструє нерівномірну форму частинок із великою кількістю агломератів, що робить його непридатним для використання.

Новий порошок (рис. 2, а) продемонстрував високу якість із переважно сферичною формою частинок і гладкою поверхнею. Відсутність дефектів, агломератів або супутників свідчить про його однорідність і придатність для використання в адитивних технологіях, забезпечуючи оптимальні умови для рівномірного укладання шарів під час друку.

Порошок після 30 циклів використання до просіювання (рис. 2, б) показав істотні морфологічні зміни. На поверхні частинок з'явилися супутники, що виникають через адгезію дрібних частинок до більших, а також ознаки пористості та шерсткості. Агломерація частинок спостерігалася значно частіше, що погіршує сипучість порошку й ускладнює його рівномірне укладання під час друку. Ці зміни можуть приводити до збільшення пористості у готових виробах.

Просіювання через стандартне сито з розміром осередків у 80 мкм (рис. 2, в) дало змогу видалити великі агломерати та значно поліпшити сферичність частинок. Проте дрібні дефекти та нерівності залишалися, що обмежувало можливість повного відновлення якості порошку лише за допомогою цього методу.

Просіювання через дрібне сито (40–50 мкм) (рис. 2, г) дало істотно ліпші результати. Кількість агломератів і супутників значно зменшилася, а поверхня частинок стала більш гладкою й однорідною. Цей метод регенерації уможливив відновити сипучість

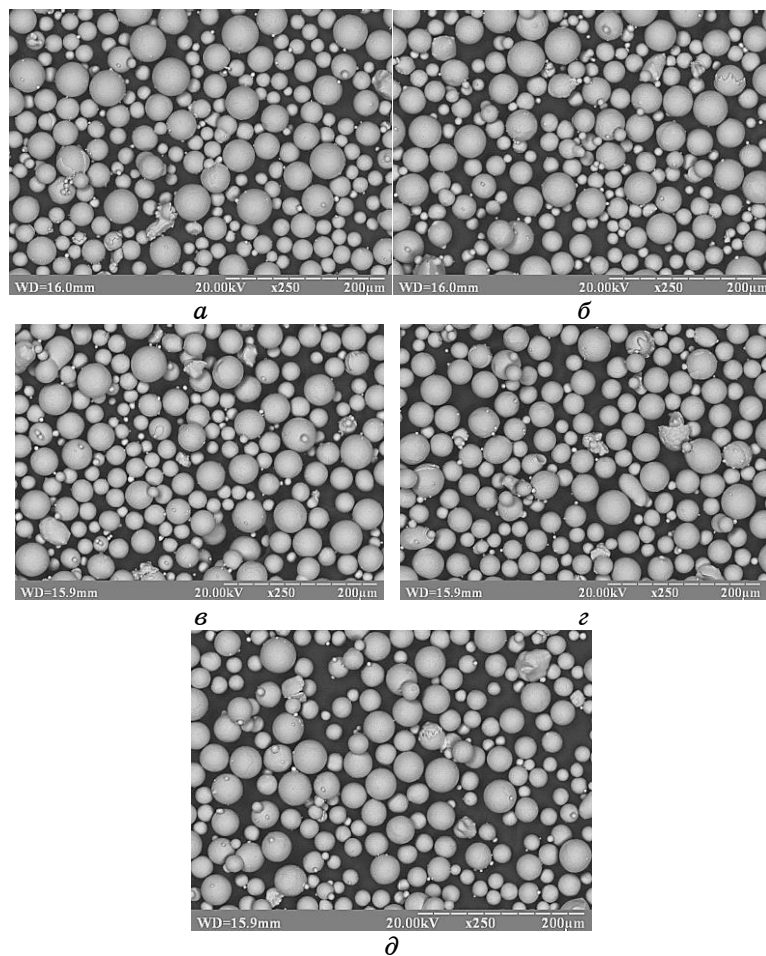


Рис. 2. Мікроструктура порошків *а* — новий порошок; *б* — після 30 циклів використання; *в* — просіяний порошок (80 мкм); *г* — просіяний порошок (50 мкм); *д* — відсів (непридатний до використання порошок).²

порошку та понизити ризик утворення дефектів у готових виробках.

Поєднання просіювання через дрібне сито з додаванням нового порошку продемонструвало найліпші результати. Частинки набули сферичної форми, майже без супутників і з мінімальними поверхневими дефектами. Такий підхід уможливив максимально наблизити якість порошку до рівня нового, поліпшивши його сипучість і зменшивши ризик утворення пористості.

Порошок (рис. 2, *д*), що був відсіяний як непридатний до подальшого використання, характеризувався великою кількістю

агломератів, пористих частинок і нерівною поверхнею. Ця морфологія вказує на значну деградацію матеріалу, що унеможливує його повторне використання в адитивних процесах.

Мікроструктурна СЕМ-аналіза підтвердила ефективність методів регенерації, таких як просіювання та додавання нового порошку, для підтримання якості порошку під час багаторазового використання. Результати показують, що комбінований підхід уможливує мінімізувати дефекти та забезпечити стабільність властивостей порошку.

3.3. Гранулометрія

Гранулометрична аналіза дала змогу дослідити розподіл розмірів частинок порошків за різних умов використання та регенерації. Основні результати наведено у табл.

Новий порошок характеризується найліпшими показниками, включаючи вузький діапазон розподілу частинок і низький SPAN (1,0). Порошок після 30 циклів має ширший розподіл розмірів через агломерацію частинок, тоді як просіювання зменшує середній розмір частинок (D50) і поліпшує їхню однорідність. Комбінація просіювання та додавання нового порошку забезпечує відновлення якості матеріалу до рівня, наближеного до нового порошку. Натомість порошок відсіву демонструє найгірші характеристики через переважання великих агломератів і дефектів.

3.4. Механічні властивості

Межа пропорційності є початковим параметром пружної поведінки матеріалу. Графік залежності $\sigma_{\text{пл}}$ від порядкової кількості циклів використання демонструє загальну тенденцію до підвищення значень у діапазоні 940–950 МПа. Ця стабільність свід-

ТАБЛИЦЯ. Гранулометрична аналіза порошків Ti-6Al-4V.³

Категорія порошку	D10, мкм	D50, мкм	D90, мкм	SPAN
Новий порошок	15	35	50	1,0
Після 30 циклів	20	36,5	55	1,1
Просіяний (80 мкм)	12	30,2	42	1,0
Просіяний (50 мкм)	10	25,7	35	0,97
Просіяний (50 мкм) + новий порошок	13	28	40	0,98
Відсів (непридатний порошок)	30	50	70	1,2

чить про однорідність матеріалу, що забезпечує передбачувану пружну деформацію без руйнування структури.

Як показано на рис. 3, залежність $\sigma_{\text{пц}}$ від кількості циклів використання демонструє стабільність у межах 940–950 МПа.

Умовна межа плинності залишається стабільною з тенденцією до незначного підвищення; значення варіюються в межах 990–1017 МПа. Це свідчить про стійкість матеріалу до пластичних деформацій під навантаженням. Така поведінка є важливою для конструкцій, які зазнають постійних навантажень.

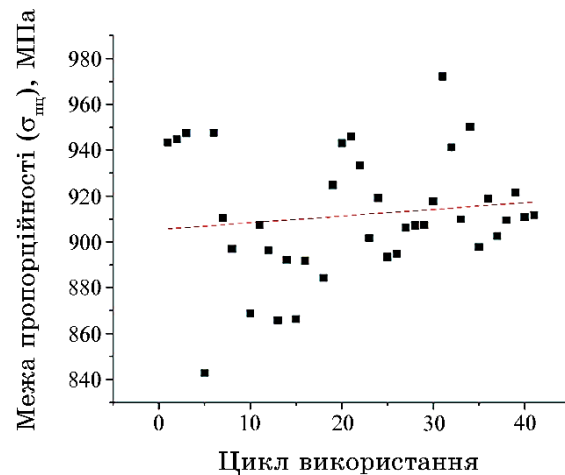


Рис. 3. Залежність межі пропорційності від кількості циклів використання.⁴

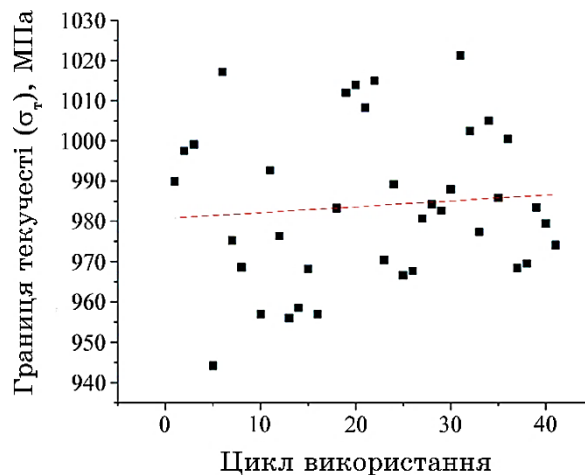


Рис. 4. Залежність межі плинності від кількості циклів використання.⁵

На рисунку 4 показано залежність σ_t від кількості циклів використання, що залишається стабільною з незначним підвищенням. На рисунку 5 зображено залежність σ_b від кількості циклів використання, що демонструє стабільність у діапазоні 1040–1070 МПа.

Загальне видовження демонструє тенденцію до пониження зі збільшенням міцності матеріалу. Значення варіюються в межах 10–14%, що є типовим для Ti-6Al-4V. Ця залежність підтверджує загальновідому обернену кореляцію між міцністю та пластичністю матеріалу.

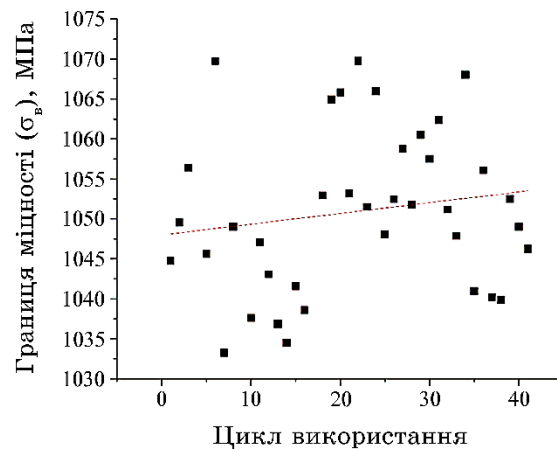


Рис. 5. Залежність межі міцності від кількості циклів використання.⁶

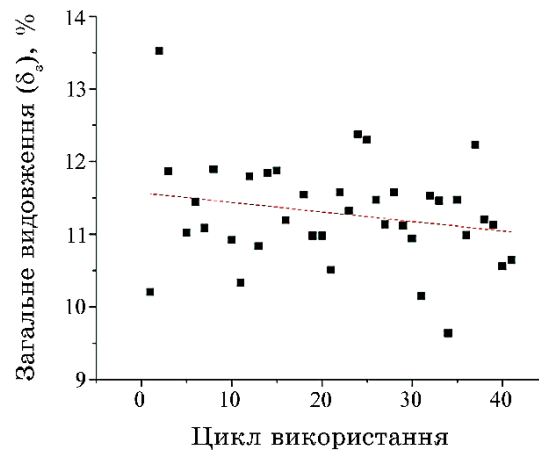


Рис. 6. Залежність загального видовження від кількості циклів використання.⁷

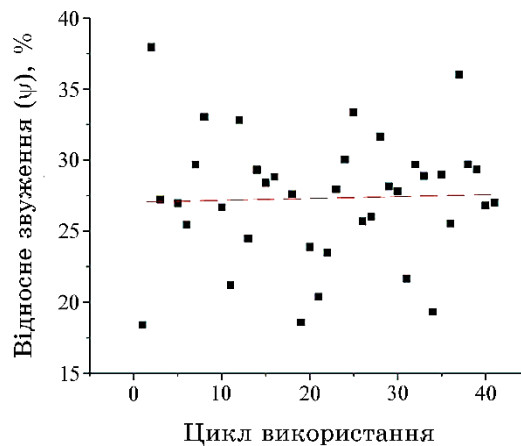


Рис. 7. Залежність відносного звуження від кількості циклів використання.⁸

На рисунку 6 наведено графік залежності δ_z від кількості циклів використання, який демонструє тенденцію до пониження зі збільшенням міцності.

Відносне звуження (ψ) є показником здатності матеріалу до адаптації під час руйнування. Значення варіюються в межах 26–38%, залишаючись стабільними. Це свідчить про високий рівень пластичності, який є важливим для уникнення крихкого руйнування у реальних умовах експлуатації.

Як показано на рис. 7, залежність ψ від кількості циклів використання залишається стабільною в межах 26–38%.

Одержані результати підтверджують стабільність і передбачуваність механічних властивостей стопу Ti-6Al-4V. Підвищення міцності супроводжується пониженням пластичності, що відповідає відомим з матеріалознавства закономірностям. Матеріал демонструє високу придатність для застосування у медичних і технічних галузях, забезпечуючи оптимальний баланс між міцністю та пластичністю.

4. ВИСНОВКИ

У дослідженні проаналізовано вплив багаторазового використання порошку Ti-6Al-4V у процесі селективного лазерного топлення (SLM) на його властивості та якість одержаних виробів. Виявлено, що основними чинниками деградації є зростання вмісту Оксигену, зміни морфології частинок, агломерація й утворення оксидів, які негативно впливають на механічні властивості друкованих деталей. Застосування методів регенерації, таких як про-

сіювання та додавання нового порошку, дає змогу частково відновити властивості матеріалу та підвищити ефективність процесу друку. Результати роботи мають практичне значення для промислових і медичних застосувань, де важливим є збереження балансу між економічністю виробництва та якістю продукції.

ЦИТОВАНА ЛІТЕРАТУРА—REFERENCES

1. Naeem Eshawish, Savko Malinov, Wei Sha, and Patrick Walls, *J. Mater. Eng. Perform.*, **30**: 5290 (2021); <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05753-w>
2. Ian Gibson, David Rosen, and Brent Stucker, *Additive Manufacturing Technologies* (New York: Springer Science + Business Media: 2015); <https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2113-3>
3. M. Peters, J. Hemptenmacher, J. Kumpfert, and C. Leyens, *Titanium and Titanium Alloys: Fundamentals and Applications* (Eds. C. Leyens and M. Peters) (Wiley-VCH Verlag, GmbH & Co.-KGaA: 2003).
4. Tejas Koushik, Haopeng Shen, Wen Hao Kan, Mu Gao, Junlan Yi, Chao Ma, Samuel Chao Voon Lim, Louis Ngai Sum Chiu, and Aijun Huang, *Sustainability*, **15**, No. 21: 15582 (2023); <https://doi.org/10.3390/su152115582>
5. Stephanie Hall, Evripides Loukaides, Stephen T. Newman, and Alborz Shokrani, *Procedia CIRP*, **86**: 139 (2019); <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.028>
6. O. Sanchez-Mata, J. A. Muñoz-Lerma, X. Wang, S. E. Atabay, M. Attarian Shandiz, and M. Brochu, *Mater. Sci. Eng. A*, **780**: 139177 (2020); <https://doi.org/10.1016/j.msea.2020.139177>
7. H. P. Tang, M. Qian, N. Liu, X. Z. Zhang, G. Y. Yang, and J. Wang, *JOM*, **67**: 555 (2015); <https://doi.org/10.1007/s11837-015-1300-4>
8. Atieh Moridi, Ali Gökhan Demir, Leonardo Caprio, A. John Hart, Barbara Previtali, and Bianca M. Colosimo, *arXiv:1905.12754v2 [physics.app-ph]*; <https://doi.org/10.48550/arXiv.1905.12754>
9. Alireza Dareh Baghi, Shahrooz Nafisi, Heike Ebendorff-Heidepriem, and Reza Ghomashchi, *Metals*, **12**: 1465 (2022); <https://doi.org/10.3390/met12091462>
10. A. V. Gusarov, I. Yadroitsev, Ph. Bertrand, and I. Smurov, *J. Heat Transfer*, **131**: 072101-1 (2009); <https://doi.org/10.1115/1.3109245>
11. Y.-J. Zhang, G. Miyamoto, K. Shinbo, and T. Furuhashi, *Acta Mater.*, **128**: 166 (2017); <http://dx.doi.org/10.1016/j.actamat.2017.02.020>
12. T. DebRoy, H. L. Wei, J. S. Zuback, T. Mukherjee, J. W. Elmer, J. O. Milewski, A. M. Beese, A. Wilson-Heid, A. De, and W. Zhang, *Prog. Mater. Sci.*, **92**: 112 (2018); <https://doi.org/10.1016/j.pmatsci.2017.10.001>
13. S. V. Adzhamsky, H. A. Kononenko, and R. V. Podolsky, *Avtom. Svarka*, **10**: 14 (2020); <https://doi.org/10.37434/as2020.10.03>
14. Oscar A. Quintana, Jorge Alvarez, Roderick Mcmillan, Weidong Tong, and Charles Tomonto, *JOM*, **70**: 1863 (2018); <https://doi.org/10.1007/s11837-018-3011-0>
15. Hui-ping Duan, Hong-xia Xu, Wen-huang Su, Yu-bin Ke, Zeng-qian Liu, and Hong-hai Song, *Int. J. Miner. Metall. Mater.*, **19**: 1128 (2012);

<https://doi.org/10.1007/s12613-012-0681-4>

16. Arash Soltani-Tehrani, Mahdi Habibnejad-Korayem, Shuai Shao, Meysam Haghshenas, Nima Shamsaei, *Addit. Manuf.*, **51**: 102584 (2022);
<https://doi.org/10.1016/j.addma.2021.102584>

¹*National Technical University of Ukraine 'Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute',
37, Beresteyskyi Prosp.,
UA-03056 Kyiv, Ukraine*

²*Technical Centre, N.A.S. of Ukraine,
13, Pokrovska Str.,
UA-04070 Kyiv, Ukraine*

- ¹ Fig. 1. X-ray diffraction patterns of Ti-6Al-4V powders: *a*—sittings; *б*—30 cycles; *в*—new.
- ² Fig. 2. Microstructure of powders: (*a*) new powder; (*б*) after 30 usage cycles; (*в*) sieved powder (80 μm); (*г*) sieved powder (50 μm); (*д*) discarded powder (unsuitable for further use).
- ³ TABLE. Granulometric analysis of Ti-6Al-4V powders.
- ⁴ Fig. 3. Graph of the dependence of the proportional limit on the number of usage cycles.
- ⁵ Fig. 4. Graph of the dependence of the yield strength on the number of usage cycles.
- ⁶ Fig. 5. Graph of the dependence of the ultimate strength on the number of usage cycles.
- ⁷ Fig. 6. Graph of the dependence of total elongation on the number of usage cycles.
- ⁸ Fig. 7. Dependence of relative contraction on the number of usage cycles.