

Published since September 2014

Issued 2 times a year
smi.nuos.mk.ua

Recommended for press by
the Academic Council of NUOS
held on 28.03.2025, protocol no. 3

Desktop publishing:
Klimenko T. O.

Proofreading:
Chudesnova I. M.

The journal is published
with the support of
Marine Engineering Bureau,
Zaliv Shipbuilding Design

The electronic copy of
the journal is posted to
the website in the public access
and stored in the national
abstract database "Ukrainika
Naukova" (free online access to
the resources on the web server
of the Vernadsky National
Library of Ukraine):

<http://www.nbu.gov.ua>

The accuracy of the facts given,
reliability of information,
and the use of the data
which is not allowed
for publication in the public
media are the responsibility
of the authors.

The content of promotional
materials is the responsibility
of the advertisers.

When reprinting materials,
a reference to the journal
"Shipbuilding and Marine
Infrastructure" is required.

The journal is registered
in the Ministry of Justice
of Ukraine

Registration of Print media
entity: Decision of the National
Council of Television and
Radio Broadcasting of Ukraine:
Decision No. 1542 as of
09.05.2024. Media ID: R30-04389.

It is included in the List
of Scientific Professional
Publications of Ukraine
(category "B") in technical
sciences in accordance
with the Order of the
Ministry of Education and
Science of Ukraine No. 409
of 17.03.2020 (Annex 1)
Specialities G2 Environmental
Protection Technology and
G19 Construction and Civil
Engineering; in accordance
with the Order of the Ministry
of Education and Science of
Ukraine No. 886
of 02.06.2020 (Annex 4)
Specialities C1 Economics,
G3 Electrical Engineering,
G4 Energy Production
(with specializations),
G8 Materials Science, G11
Mechanical Engineering (with
specializations); in accordance
with the Order of the Ministry
of Education and Science of
Ukraine
No. 11886 of 24.09.2020
(Annex 5) Specialities F3
Computer Sciences, G7
Automation,
Computer-Integrated
Technology and Robotics.

RESEARCH AND PRODUCTION, POPULAR SCIENCE PUBLICATION

Founders: Admiral Makarov National University of Shipbuilding,
Batumi Navigation Teaching University

SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE

СУДНОБУДУВАННЯ ТА МОРСЬКА ІНФРАСТРУКТУРА

№1 (20) 2025

EDITORIAL BOARD

*Staff of Admiral Makarov National University
of Shipbuilding:*

Serbin S.I., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Chief Editor;

Blintsov V.S., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Deputy Chief Editor;

Torubara V.V., Secretary of the Editorial
Board;

Kostyrko T.M., Candidate of Science
in Social Communications, Head of
Bibliometrics and Scientometrics Sector.

Section "Shipbuilding"

Niekrasov V.O., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Section Executive Editor;

Bondarenko O.V., PhD in Technical Sciences,
Associate Professor;

Zhukov Yu.D., Doctor of Technical Sciences,
Professor;

Zaitsev V.V., Doctor of Technical Sciences,
Professor;

Korostylov L.L., Doctor of Technical
Sciences, Professor;

Rashkovskiy O.S., Doctor of Technical
Sciences, Professor;

Shchedrolosiev O.V., Doctor of Technical
Sciences, Professor;

Yehorov O. H., PhD in Technical Sciences,
Marine Engineering Bureau, Odesa

Section "Materials science"

Kvasnytskyi V.F., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Section Executive Editor;

Dubovyi O.M., Doctor of Technical Sciences,
Professor.

Section "Applied mechanics"

Tkach M.R., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Section Executive Editor;

Burdun Ye.T., PhD in Technical Sciences,
Professor.

Section "Power engineering"

Trushliakov Ye.L., Doctor of Technical
Sciences, Professor;

Tymoshevskiy B.H., Doctor of Technical
Sciences, Professor.

Section "Heat power engineering"

Shevtsov A.P., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Section Executive Editor;

Dymo B.V., PhD in Technical Sciences,
Professor.

*Section "Power engineering, electrical
engineering and electromechanics"*

Pavlov H.V., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Director of Research and Education
Institute of Automatics and Electrical

Engineering of NUS, Section Executive Editor;

Riabenyki V.M., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Section Executive Editor.

*Section "Automation and computer-integrated
technologies"*

Tymchenko V.L., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Section Executive Editor;

Hordiev B.M., Doctor of Technical
Sciences, Professor.

*Section "Computer sciences and information
technologies"*

Prykhodko S.B., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Section Executive Editor;

Chernov S.K., Doctor of Technical Sciences,
Professor;

Ushkats M.V., Doctor of Technical Sciences,
Associate Professor;

Kharytonov Yu.M., Doctor of Technical
Sciences, Professor;

Haida A.Iu., PhD in Technical Sciences

Section "Economics and management"

Irtysheva I.O., Doctor of Economics,
Professor, Section Executive Editor;

Parsiak V.N., Doctor of Economics,
Professor;

Rohov H.K., Doctor of Technical Sciences,
Professor.

*Section "Environmental protection
technology"*

Trokhymenko H.H., PhD in Biology, Section
Executive Editor;

Markina L.M., PhD in Technical Sciences,
Associate Professor.

Section "History of Shipbuilding"

Horbov V.M., PhD in Technical Sciences,
Professor, Section Executive Editor;

Hal A.F., PhD in Technical Sciences,
Professor.

Members of Ukrainian organisations:

Hrinchenko V.T., Academician of NAS of
Ukraine, Institute of Fluid Mechanics of NAS
of Ukraine, Kyiv;

Kosoi B.V., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Odesa National Academy of Food
Technologies, Odesa;

Khmelnik M.H., Doctor of Technical
Sciences, Professor, Odesa National Academy
of Food Technologies, Odesa;

Kryvtun I.V., Academician of NAS of
Ukraine, E.O. Paton Electric Welding Institute,
Kyiv;

Lebediev V.O., Doctor of Technical Sciences,
Professor, E.O. Paton Electric Welding
Institute, Kyiv;

Miiusov M.V., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Odesa National Maritime Academy,
Odesa;

Panin V. V., Doctor of Technical Sciences,
Professor, State University of Infrastructure
and Transport, Kyiv;

Rudenko S.V., Doctor of Technical Sciences,
Professor, Odesa National Maritime
University, Odesa.

Foreign scientists:

Tadeusz Bohdal, Doctor of Technical
Sciences, Koszalin University of Technology,
(Koszalin, the Republic of Poland);

Zili Wang, Professor, Nanjing University of
Science and Technology (Zhanjiang, People's
Republic of China);

Xia Guihu, Professor, Harbin Engineering
University (Harbin, People's Republic of China);

Aleksander Andrzej Stachel, Professor,
West Pomeranian University of Technology
(Szczecin, the Republic of Poland);

Khvedelidze P.G., Professor, Batumi
Navigation Teaching University (Batumi,
Georgia);

Marek Dzida, Professor, Gdańsk University
of Technology (Gdańsk, the Republic of
Poland);

Lech Rowinski, Professor, Gdańsk University
of Technology (Gdańsk, the Republic of
Poland).

Видається з вересня 2014 р.,
виходить 2 рази на рік
smi.nuos.mk.ua

Рекомендовано до друку
Вченою радою НУК
імені адмірала Макарова
28.03.2025, протокол № 3

Комп'ютерне верстання
Клименко Т. О.

Коректура
Чудеснова І. М.

Журнал видається
за підтримки
Морського інженерного
бюро,
Zaliv Shipbuilding Design

Електронна копія
журналу у відкритому доступі
розміщується на сайтах, а
також зберігається
в загальнодержавній
реферативній базі
даних «Україніка наукова»
(вільний онлайн-доступ
до ресурсів на Web-сервері
Національної бібліотеки
України ім. В.І. Вернадського):
<http://www.nbu.gov.ua>

За точність наведених фактів,
достовірність інформації,
а також використання
відомостей, що не підлягають
публікації у відкритій пресі,
відповідальність несуть автори

Відповідальність за зміст
рекламних матеріалів несуть
Рекламодавці

За умов передруку матеріалів,
посилання
на журнал
«Суднобудування
та морська інфраструктура»
обов'язкове

Реєстрація суб'єкта у сфері
друкованих медіа: Рішення
Національної ради України
з питань телебачення і
радіомовлення № 1542 від
09.05.2024 року. Ідентифікатор
медіа: R30-04389.

На підставі Наказу
Міністерства освіти і науки
України № 409 від 17.03.2020
(додаток 1) включено до
категорії «Б» Переліку
наукових фахових видань
України у галузі технічних
наук зі спеціальностей
G2 «Технології захисту
навколишнього середовища»
та G19 «Будівництво та
цивільна інженерія»; на
підставі Наказу Міністерства
освіти і науки України № 886
від 02.07.2020 (додаток 4)
зі спеціальностей С1 Економіка,
G3 Електрична інженерія,
G4 Енерговиробництво
(за спеціалізацією), G8
Матеріалознавство та G11
Машинобудування (за
спеціалізацією); на підставі
Наказу Міністерства освіти
і науки України № 1188 від
24.09.2020 (додаток 5)
зі спеціальностей
F3 Комп'ютерні науки,
G7 Автоматизація,
комп'ютерно-інтегровані
технології та робототехніка.

НАУКОВО-ВИРОБНИЧЕ Й НАУКОВО-ПОПУЛЯРНЕ ВИДАННЯ

ЗАСНОВНИКИ:

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова,
Батумський навігаційно-навчальний університет

SHIPBUILDING & MARINE INFRASTRUCTURE

СУДНОБУДУВАННЯ ТА МОРСЬКА ІНФРАСТРУКТУРА

№1 (20) 2025

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Сербін С. І. – д-р техн. наук, проф.,
головний редактор
Бліщов В. С. – д-р техн. наук, проф.,
заступник головного редактора
Торубара В. В. – секретар редакційної колегії
Костирко Т. М. – канд. соц. ком., голова
сектору бібліометрії та наукометрії

Секція «Суднобудування»
Некрасов В. О. – д-р техн. наук,
проф., відповідальний редактор секції
«Суднобудування»
Бондаренко О. В. – канд. техн. наук, доц.
Жуков Ю. Д. – д-р техн. наук, проф.
Зайцев В. В. – д-р техн. наук, проф.
Коростильов Л. І. – д-р техн. наук, проф.
Рашковский О. С. – д-р техн. наук, проф.
Щедролюсов О. В. – д-р техн. наук, проф.
Єгоров О. Г. – канд. техн. наук, доц.,
Морське інженерне бюро (м. Одеса)

Секція «Матеріалознавство»
Квасницький В. Ф. – д-р техн. наук,
проф., відповідальний редактор секції
«Матеріалознавство»
Дубовий О. М. – д-р техн. наук, проф.

Секція «Прикладна механіка»
Ткач М. Р. – д-р техн. наук, проф.,
відповідальний редактор секції
«Прикладна механіка»
Бурдун Є. Т. – канд. техн. наук, проф. НУК

Секція «Енергетичне машинобудування»
Радченко М. І. – д-р техн. наук, проф.,
відповідальний редактор секції
«Енергетичне машинобудування»
Трушляков Є. І. – канд. техн. наук, проф. НУК
Тимошевський Б. Г. – д-р техн. наук, проф.

Секція «Теплоенергетика»
Шевцов А. П. – д-р техн. наук,
проф., відповідальний редактор секції
«Теплоенергетика»
Димо Б. В. – канд. техн. наук, проф.

*Секція «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»*
Павлов Г. В. – д-р техн. наук, проф.,
відповідальний редактор секції
«Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
Рябенський В. М. – д-р техн. наук, проф.

*Секція «Автоматизація та комп'ютерно-
інтегровані технології»*
Тимченко В. Л. – д-р техн. наук,
проф., відповідальний редактор секції
«Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані
технології»
Гордєєв Б. М. – д-р техн. наук, проф.

*Секція «Комп'ютерні науки та інформаційні
технології»*
Приходько С. Б. – д-р техн. наук, проф.,
відповідальний редактор секції «Комп'ютерні
науки та інформаційні технології»
Чернов С. К. – д-р техн. наук, проф.

Ушкац М. В. – д-р физ.-мат. наук, доц.
Харитонов Ю. М. – д-р техн. наук, проф.
Гайда А. Ю. – канд. техн. наук., доц.

Секція «Економіка та менеджмент»
Іртіщева І. О. – д-р екон. наук, проф.,
відповідальний редактор секції «Економіка
та менеджмент»
Парсяк В. Н. – д-р екон. наук, проф.
Рогов Г. К. – д-р екон. наук, доц.
Солесвік М. Б. – д-р екон. наук, проф.,
Бізнес-школа Норд університету (м. Бодо,
Норвегія)
Ефімова Г. В. – д-р екон. наук, доц.

*Секція «Технології захисту навколишнього
середовища»*
Трохименко Г. Г. – д-р техн. наук, проф. НУК,
відповідальний редактор секції «Технології
захисту навколишнього середовища»
Маркіна Л. М. – канд. техн. наук., доц.

Секція «Історія суднобудування»
Горбов В. М. – канд. техн. наук, проф.,
відповідальний редактор секції «Історія
суднобудування»
Галь А. Ф. – канд. техн. наук, проф. НУК

Співробітники організації України:
Грінченко В. Т. – академік НАН України,
Інститут гідромеханіки НАН України (м. Київ)
Косой Б. В. – д-р техн. наук, проф., Одеська
національна академія харчових технологій
Хмельнюк М. Г. – д-р техн. наук, проф.,
Одеська національна академія харчових
технологій
Кривцун І. В. – академік НАН України, д-р
техн. наук, проф., Інститут електрозварювання
імені Є. О. Патона (м. Київ)
Лебедев В. О. – д-р техн. наук, проф.,
Інститут електрозварювання ім. Є. О. Патона
(м. Київ)
Міусов М. В. – д-р техн. наук, проф., Одеська
національна морська академія (м. Одеса)
Панін В. В. – д-р техн. наук, проф.,
Державний університет інфраструктури та
транспорту (м. Київ)
Руденко С. В. – д-р техн. наук, проф.,
Одеський національний морський університет

Закордонні вчені:
Бохдаль Т. (Tadeusz Bohdal) – д-р техн.
наук, проф., Кошалінський технологічний
університет (м. Кошалін, Польща)
Жили Боунг (Zili Wang) – проф., Університет
науки і технології провінції Цзянсу
(м. Чженъцзян, КНР)
Ся Гуйхуа (Xia Guihua) – проф., Харбінський
інженерний університет (м. Харбін, КНР)
Стахель А. (Aleksander Andrzej Stachel) –
проф., Западно-поморанський технологічний
університет (м. Щецин, Польща)
Хведелідзе П. Г. (Parmen Khvedelidze) –
проф., Батумський навігаційно-навчальний
університет (м. Батумі, Грузія)
Дзіда М. (Marek Dzida) – проф., Гданська
Політехніка (м. Гданськ, Польща)
Ровінські Л. (Lech Rowinski) – проф.,
Гданська Політехніка (м. Гданськ, Польща)

Svitlana V. Kyrylakha
RESEARCH ON THE STRUCTURE
AND MECHANICAL PROPERTIES
OF Ti-6Al-4V ALLOY PARTS PRODUCED
BY SELECTIVE LASER SINTERING 4

**Yurii V. Yurchenko, Oleksandr V. Siora,
Mykola V. Sokolovskyi, Taras M. Nabok,
Artemii V. Bernatskyi**
DEVELOPMENT OF LASER WELDING
TECHNOLOGY FOR THIN-WALLED CYLINDRICAL
PRODUCTS MADE OF 12KH18N10T STEEL 15

**Serhiy I. Serbin, Bohdan M. Lychko,
Anatolii B. Kolesnykov**
EVALUATION OF DETAILED KINETIC
MECHANISMS FOR AMMONIA COMBUSTION
IN PREDICTING GAS TURBINE
COMBUSTION CHAMBER PERFORMANCE 27

Кирилах Світлана Вікторівна
ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ
ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ
ЗІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ
СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ 4

**Юрченко Юрій Вікторович,
Сіора Олександр Васильович,
Соколовський Микола Володимирович,
Набок Тарас Миколайович,
Бернацький Артемій Володимирович**
ВІДПРАЦЮВАННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ЛАЗЕРНОГО
ЗВАРЮВАННЯ ТОНКОСТІННИХ ЦИЛІНДРИЧНИХ
ВИРОБІВ ЗІ СТАЛІ 12Х18Н10Т 15

**Сербін Сергій Іванович,
Личко Богдан Михайлович,
Колесников Анатолій Борисович**
АНАЛІЗ МОЖЛИВОСТЕЙ ВИКОРИСТАННЯ
ДЕТАЛЬНИХ КІНЕТИЧНИХ МЕХАНІЗМІВ
ГОРІННЯ АММІАКУ ДЛЯ ПРОГНОЗУВАННЯ
ХАРАКТЕРИСТИК КАМЕРИ ЗГОРЯННЯ ГТД 27

**Denys O. Shalapko, Andrii A. Andreev,
Oleksandr O. Kukhareno**
COMPREHENSIVE REVIEW
OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE APPLICATIONS
IN THE DIAGNOSIS AND PROGNOSIS
OF SHIP POWER SYSTEMS 37

**Viktoriia V. Litvinenko,
Valentyna Ye. Kalyuzhna**
SYSTEMS FOR MONITORING
THE TECHNICAL CONDITION
OF HYDRAULIC STRUCTURES 47

ЗМІСТ

**Шалапко Денис Олегович,
Андреев Андрій Адольфович,
Кухаренко Олександр Олександрович**
КОМПЛЕКСНИЙ ОГЛЯД ЗАСТОСУВАНЬ
ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ДІАГНОСТИЦІ
ТА ПРОГНОЗУВАННІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ
СИСТЕМ СУДЕН 37

**Литвиненко Вікторія Вікторівна,
Калюжна Валентина Євгенівна**
СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ
ГІДРОТЕХНІЧНОЇ СПОРУДИ 47

ON PUBLICATION OF THE MATERIALS, PLEASE CONTACT:

e-mail: editor@smi.nuos.mk.ua

Submitted materials are reviewed



Svitlana
V. Kyrylakha
Кирилаха
Світлана
Вікторівна

УДК 669.018.9:621.9.048.3

RESEARCH ON THE STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF Ti-6Al-4V ALLOY PARTS PRODUCED BY SELECTIVE LASER SINTERING

ДОСЛІДЖЕННЯ СТРУКТУРИ ТА МЕХАНІЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ ЗІ СПЛАВУ Ti-6Al-4V ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ СЕЛЕКТИВНОГО ЛАЗЕРНОГО СПІКАННЯ

DOI [https://doi.org/10.15589/smi2025.1\(20\).01](https://doi.org/10.15589/smi2025.1(20).01)

Svitlana V. Kyrylakha Кирилаха Світлана Вікторівна,
аспірантка
lanakirilaha@gmail.com
ORCID: 0009-0001-5688-5616

National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia
Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя

Abstract. The author analyses the mechanical properties and the influence of heat treatment on Ti-6Al-4V alloy samples produced by selective laser melting (DMLS). The article discusses the equipment and specific features of the DMLS technology. Additive manufacturing was performed using an EOS M400 system with titanium alloy Ti6Al4V powders (particle size range 30–60 μm) produced by “SINO-EURO” (China). A comprehensive study was conducted, including the determination of the chemical composition of the material, analysis of its macro- and microstructure, fracture characterization, and testing of mechanical properties such as hardness, tensile strength, and impact toughness. The results showed that the chemical composition of the alloy complies with the requirements of the regulatory documentation. After manufacturing, the samples underwent a series of heat treatments, including hot isostatic pressing (HIP) at $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, followed by heat treatment at $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ for 2 hours in an inert argon atmosphere, along with subsequent mechanical processing and quality control. Special attention was paid to the influence of different heat treatment modes, including HIP, on the structure and properties of the alloy. It was demonstrated that heat treatment significantly affects microstructural characteristics, such as grain size, phase distribution, and porosity, which, in turn, determine the mechanical behavior of the material. Key factors were identified that ensure the optimization of Ti6Al4V properties when using additive manufacturing. In particular, the influence of the build orientation on the mechanical characteristics of the samples was studied. The obtained results demonstrate that a combination of selective laser melting and properly selected heat treatment modes allows achieving mechanical properties comparable to those obtained with traditional manufacturing methods. This study confirms the potential of additive manufacturing for producing high-performance Ti6Al4V alloy parts. The findings may be useful for optimizing production processes and developing new heat treatment regimes for additively manufactured materials.

Key words: titanium alloy; additive technologies; selective laser melting; mechanical properties; powder; fractions; building; microstructure; chemical composition; heat treatment.

Анотація. Проаналізовано механічні властивості та вплив термічної обробки на зразки сплаву Ti-6Al-4V, виготовлені методом селективного лазерного спікання (DMLS). У статті розглянуто обладнання та особливості технології вирощуван-

ня методом DMLS. Адитивне вирощування вироблялося на установці EOS M400 з використанням порошків із титанового сплаву Ti6Al4V фірми «SINO-EURO» (Китай), з фракцією 30...60 мкм. У ході дослідження проведено комплексний аналіз, який включав визначення хімічного складу матеріалу, дослідження його макро- та мікроструктури, оцінку характеру ізломів, а також випробування механічних властивостей, таких як твердість, міцність на розтяг та ударну в'язкість. В результаті було встановлено, що хімічний склад сплаву відповідає вимогам нормативної документації. Після вирощування була проведена серійна термічна обробка (ГПІ при $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, + термообробка $T = 800 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, $t = 2$ год, в інертному середовищі аргону, механічна обробка та контроль якості. Особливу увагу приділено впливу різних режимів термічної обробки, включаючи використання гарячого ізостатичного пресування (ГІП), на структуру та властивості сплаву. Показано, що термічна обробка суттєво впливає на мікроструктурні характеристики, такі як розмір зерен, розподіл фаз та пористість, що, у свою чергу, визначає механічну поведінку матеріалу.

Визначено ключові фактори, які забезпечують оптимізацію властивостей Ti6Al4V при використанні адитивного виробництва. Зокрема, досліджено вплив напрямку побудови зразків на їх механічні характеристики. Отримані результати демонструють, що комбінація селективного лазерного спікання з правильно підібраними режимами термічної обробки дозволяє досягти механічних властивостей, які не поступаються традиційним методам обробки. Дослідження підтверджує перспективність використання адитивного виробництва для створення деталей зі сплаву Ti6Al4V з високими експлуатаційними характеристиками. Результати роботи можуть бути корисними для оптимізації технологічних процесів виробництва та розробки нових режимів термічної обробки для адитивних матеріалів.

Ключові слова: титановий сплав; адитивні технології; селективне лазерне спікання; механічні властивості; порошок; фракція; вирощування; структура; хімічний склад; термічна обробка.

References

- [1] Roskill report. *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Edition, 2013 // Copyright © Roskill Information Services Ltd. ISBN 978 0 86214 595 8.
- [2] TITANIUM 2008: development of international titanium industry, preparation technology and applications [Liu B, Liu YB, Yang X, Liu Y.]. – *Materials Science Eng. Pow. Metall* 2008. № 14 (2). 67–73 p.
- [3] Ternovoy, Y. F., Pashetnyeva, N. N., & Vodenikov, S. A. (2010). *Semi-finished products and items made from sprayed metal powders*. Zaporizhzhia: Publishing House of Zaporizhzhia State Engineering Academy.
- [4] Jordan, C. B., & Duwez, P. (1956). Approximate phase relationships in the Ti-Al-V system at 1800° and 1400 °F. *Transactions of the American Society for Metals*, 45, 783–794.
- [5] Kubaschewski, O., Wainwright, C., & Kirby, F. J. (1960–1961). The heats of formation in the Ti-Al-V system. *Journal of the Institute of Metals*, 89, 139–144.
- [6] Crossley, F. A. (1969). Effects of the ternary additions: O, Sn, Zr, Cb, Mo, and V on the $\alpha/\alpha + \text{Ti}_3\text{Al}$ boundary of Ti-Al-base alloys. *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers (AIME)*, 245, 1963–1968.
- [7] Yanko, T. B. (2015). Investigation of the chemical composition and microstructure of sponge titanium obtained by the technology of complex alloying with aluminum and vanadium. *Bulletin of NTU “KhPI”*, (11(1120)), 3–8.
- [8] Abkowitz, S. (2016, October 18). *Stan Abkowitz, '48 – MIT Technology Review*. Retrieved from [insert URL if available].
- [9] Li, S. J., Wang, Q., Zhang, Y. L., & others. (2017). Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V manufactured by selective laser melting. *Materials Science and Engineering: A*.
- [10] Carter, V. E., & others. (2019). Chemical analysis of reused Ti–6Al–4V powder for additive manufacturing. *Journal of Materials Research*.
- [11] Wohlers, T. (2021). Fracture analysis of additively manufactured Ti–6Al–4V components. *Additive Manufacturing Review*.
- [12] Kovalenko, Y. M., & Orlov, M. G. (2020). The effect of repeated use of Ti–6Al–4V powder on the mechanical properties of products manufactured using the DMLS method. *Metallurgy and Heat Treatment of Metals*.

- [13] Pashchenko, O. S. (2021). Analysis of defects in samples manufactured by selective laser sintering from Ti–6Al–4V powders. *Materials Science: Problems and Perspectives*.
- [14] Boiko, L. I., & Sokolov, V. M. (2019). Heat treatment of titanium alloys after additive manufacturing: Effects and mechanisms. *Applied Materials and Technologies*.
- [15] Zhang, L., & Liu, L. (2021). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10), 7480–7490. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05753-w>
- [16] Liu, L., Zhang, L., & Zhang, L. (2022). Mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by laser powder bed fusion: A review focused on the processing and microstructural parameters influence on the final properties. *Metals*, 12(6), 986. <https://doi.org/10.3390/met12060986>
- [17] Zhang, L., & Liu, L. (2021). Effects of post heat treatments on microstructures and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy. *Metals*, 11(10), 1593. <https://doi.org/10.3390/met11101593>
- [18] Kononenko, G. A., Kimstach, T. V., Safronova, O. A., Podolsky, R. V., Puchikov, O. V., & Klinova, O. P. (2022). Modern perspective metal materials for armored obstacle (overview). *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (36), 325–342. Institute of Ferrous Metallurgy Z. I. Nekrasova of the National Academy of Sciences of Ukraine.
- [19] Yeoh, W. Y., Lan, B., & Lowe, M. J. S. (2023). Investigation of the Influence of Macrozones in Titanium Alloys on the Propagation and Scattering of Ultrasound. *arXiv preprint arXiv:2304.10189*.
- [20] Cherezov, N., Fadeev, A., Samokhin, A., & Alymov, M. (2024). SHS-hydrogenation, thermal dehydrogenation, and plasma spheroidization to produce spherical titanium powders from titanium sponge alloys. *Alloys*, 3(3), 246–256. <https://doi.org/10.3390/alloys3030014>

Постановка задачі. Сучасні технології адитивного виробництва, зокрема метод селективного лазерного спікання (DMLS), активно використовуються для створення високоточних виробів із порошкових матеріалів. На сьогоднішній день сплави типу Ti–6Al–4V (Ti64, Grade 5, SAT-64, T-A6V, Ti-Al-V) – вітчизняний аналог BT-6, найбільш використовуваний зарубіжний титановий сплав класу $\alpha + \beta$ і найпоширеніший з усіх титанових сплавів (займає більше 50 % світового титанового виробництва) завдяки своїм оптимальним поєднанням технологічних і механічних властивостей. Хімічний склад сплаву: ~6 % Al, ~4 % V, решта Ti, механічні властивості: $\sigma_b = 1100...1250$ МПа, $\delta = 6$ %. Робоча температура сплаву Ti–6Al–4V, яка становить ~350 °C, є оптимальною не лише для авіаційного призначення, окрім того, цей сплав може бути застосований у суднобудуванні та морській інфраструктурі, зокрема для компонентів, що піддаються впливу підвищених температур в умовах агресивного середовища. [1, 2, 18]. Низька питома вага поряд з високою механічною та втомною міцністю, а також високою корозійною та ерозійною стійкістю обумовлює його використання у таких галузях промисловості, як високоточне машинобудування, авіадвигунобудування, суднобудування

та автомобілебудування, а також космічних технологіях [3, 19]. TiAl₃ і VAl₃ утворюють безперервний ряд твердих розчинів [4, с. 585; 5, с. 585]. При 700 °C і 10 % Al в α -твердому розчині розчиняється 2 % V [6, с. 585].

Титановий сплав Ti–6Al–4V є найпопулярнішою порошковою композицією для металевих адитивних технологій, зокрема для високотехнологічних застосувань. Основними легуючими елементами для цього сплаву є алюміній та ванадій. Легування алюмінієм підвищує міцність та жароміцність, а додаткове легування ванадієм підвищує не тільки значення механічної міцності, але також призводить до збільшення пластичності [7].

Висока корозійна стійкість сплаву Ti–6Al–4V у морській воді забезпечується завдяки утворенню щільної оксидної плівки на його поверхні, яка захищає матеріал від впливу агресивного середовища. Це робить його ідеальним для виготовлення компонентів, які працюють у постійному контакті з морською водою, таких як корпуси підводних апаратів, теплообмінники, гребні гвинти та інші елементи морської інфраструктури.

Низька питома вага сплаву (~1,7 рази нижча, ніж у сталі) дозволяє зменшити масу конструкцій, що є важливим фактором у суднобудуванні, зокрема для створення

швидкохідних суден, катерів і підводних апаратів. Додатково, висока ерозійна стійкість Ti-6Al-4V робить його придатним для застосування у вузлах, які зазнають значного впливу водяного потоку, таких як насосні системи та лопаті турбін. Ці властивості сплаву Ti-6Al-4V, зокрема його термостійкість та корозійна стійкість, роблять його придатним для виготовлення критичних компонентів судових двигунів, корпусних конструкцій, теплообмінників та інших елементів морської інфраструктури, що працюють в агресивному середовищі.

Технології адитивного виробництва, зокрема DMLS, дозволяють виготовляти складнопрофільні вироби з цього сплаву, мінімізуючи втрати матеріалу та оптимізуючи конструкції для довговічності та надійності в морському середовищі.

Отримані результати можуть бути впроваджені в суднобудівну галузь, зокрема для виробництва деталей судових двигунів, гребних гвинтів, корпусних конструкцій та інших елементів морської інфраструктури, що піддаються впливу агресивного середовища та високих механічних навантажень. Використання технології отримання деталей із титанових сплавів методом селективного лазерного спікання (DMLS) дає змогу оптимізувати процеси виробництва, підвищити якість продукції та зменшити витрати матеріалів при виготовленні компонентів складної геометрії.

Випускник Массачусетського технологічного інституту 1948 року Stanley Abkowitz (1927–2017) був піонером у титановій промисловості, і йому приписують винахід Ti-6Al-4V під час його роботи в армійській лабораторії Watertown Arsenal на початку 1950-х років [8].

У рамках даного дослідження особлива увага приділена механічним характеристикам порошку сплаву Ti-6Al-4V та аналізу його поведінки під час процесу DMLS, що є критично важливим для забезпечення якості та довговічності кінцевих виробів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Адитивні технології, зокрема метод селективного лазерного спікання (DMLS), є однією з ключових інновацій у створен-

ні виробів із титанових сплавів, таких як Ti-6Al-4V. Останніми роками було проведено низку досліджень, присвячених впливу параметрів друку на хімічний склад, механічні властивості та мікроструктуру таких зразків.

У роботі [9] досліджено мікроструктуру та механічні властивості зразків Ti-6Al-4V, отриманих методом DMLS. Автори відзначили, що швидкість охолодження в процесі друку значно впливає на формування фази α' , яка визначає підвищену міцність, але знижує пластичність матеріалу. У дослідженні [10] проведено детальний хімічний аналіз порошку Ti-6Al-4V та його залишків після друку. Автори виявили, що повторне використання порошку може призводити до змін у складі, таких як підвищення вмісту кисню, що впливає на механічні властивості виробів. У роботах [15–17] розглядаються механічні властивості Ti6Al4V, виготовленого методом лазерного порошкового спікання, а також основні процеси та параметри виготовлення. Крім того, у роботі [11] виконано аналіз ізломів і встановлено, що характер руйнування залежить від макро- і мікроструктури зразків. Автори також дослідили вплив після термічної обробки, такої як відпал, на механічні властивості та дефекти структури.

У роботі [18] автори аналізують сучасні металеві матеріали, зокрема сплав Ti-6Al-4V, для виготовлення броньованих перешкод. Вони обговорюють переваги та недоліки цих матеріалів, а також перспективи їх подальшого розвитку, підкреслюючи їхню високу міцність та корозійну стійкість, що робить їх придатними для використання в суднобудуванні та морській інфраструктурі. Дослідження [19] Yeoh, Lan і Lowe (2023) аналізує вплив макрозон у Ti-6Al-4V на виявлення дефектів, таких як тріщини та пори, що важливо для удосконалення методів контролю матеріалів.

Таким чином, наукова спільнота підтверджує актуальність досліджень хімічного складу, механічних характеристик та мікроструктури зразків, виготовлених методом DMLS, особливо в контексті оптимізації параметрів друку і забезпечення якості ви-

робів. Основним завданням даної роботи є отримання адитивним вирощуванням заготовок деталей методом селективного лазерного спікання DMLS.

Відокремлення невирішених раніше частин загальної проблеми. Метод селективного лазерного спікання (DMLS) є перспективною технологією для створення виробів із порошкових матеріалів, таких як сплав Ti-6Al-4V, що широко використовується в аерокосмічній і машинобудівній галузях. Незважаючи на численні дослідження у цій сфері, залишаються невирішеними деякі аспекти, пов'язані з впливом параметрів друку та властивостей порошку на характеристики кінцевих виробів.

Зокрема, недостатньо вивчено:

1. Вплив повторного використання порошку Ti-6Al-4V на хімічний склад і механічні властивості зразків. У роботі [12] зазначено, що під час багаторазового використання порошку відбуваються зміни у складі, зокрема підвищується вміст кисню, що може знижувати пластичність виробів. Проте залишаються відкритими питання щодо точних механізмів цих змін і способів їх мінімізації.

2. Дефекти структури та їхній вплив на поведінку зразків під навантаженням. У роботі [13] проаналізовано мікроструктуру та механічні властивості, але недостатньо досліджено утворення дефектів, таких як пори чи тріщини, та їхній зв'язок із параметрами друку.

3. Мікроструктурні особливості після термічної обробки. Роботи, зокрема [14], вказують на позитивний вплив термічного відпалу на рівномірність структури та механічні властивості, однак відсутня комплексна оцінка змін фазового складу після обробки.

Таким чином, невирішеними залишаються питання оптимізації параметрів друку, контролю хімічного складу, усунення дефектів і підвищення довговічності виробів, виготовлених методом DMLS із порошку Ti-6Al-4V. Подальші дослідження в цих напрямках є актуальними для покращення якості кінцевих виробів і розширення сфери застосування технології. Основною складністю є забезпечення фі-

зико-механічних та службових властивостей вирощених зразків.

Мета дослідження. Метою дослідження є проведення досліджень хімічного складу, термооброблення (ГПП + відпал), аналізу механічних властивостей, оцінку зламів, та макро-мікроструктурного аналізу зразків із порошків сплаву Ti6Al4V, отриманого за технологією комплексного легування алюмінієм та ванадієм із заданим вмістом легувальних елементів на рівні хімічного складу сплаву BT-6 методом селективного лазерного спікання DMLS.

Методи, об'єкт та предмет дослідження. У роботі використовувалися методи оптичної та електронної мікроскопії, рентгеноструктурного аналізу, хімічного аналізу складу, метод термообробки (ГПП + відпал), також випробування на механічну міцність. Об'єктом дослідження є зразки, виготовлені методом селективного лазерного спікання (DMLS) із порошку сплаву Ti-6Al-4V. Предметом дослідження є взаємозв'язок між параметрами друку, хімічним складом, мікроструктурою, механічними властивостями та характером руйнування зразків.

Основний матеріал. У якості об'єкту для проведення досліджень використовували зразки із порошку сплаву Ti-6Al-4V (аналог BT6) для випробування механічних властивостей та мікроструктури, що були отримані методом селективного лазерного спікання (DMLS).

Виготовлення зразків проводили на установці EOS M400 (EOS DMLS) із порошків сплаву Ti6Al4V фракцією 30...60 мкм фірми «SINO-EURO» (Китай). EOS M400 – промислова установка для адитивного виробництва (3D-друку) металів, розроблена компанією EOS GmbH (EOS GmbH Electro Optical Systems).

Основні особливості EOS M400:

Адитивне виробництво: використовує технологію селективного лазерного плавлення (SLM), яка дозволяє створювати складні металеві деталі з порошкових матеріалів; високий рівень автоматизації; автоматичне навантаження та розвантаження матеріалів; інтеграція з системами управління виробничими процесами; великий робочий об'єм:

400 × 400 × 400 мм, що робить установку придатною для створення великих деталей; програмне управління: установка працює під управлінням спеціалізованого програмного забезпечення, яке оптимізує параметри друку та процеси контролю якості.

Хімічний склад матеріалу зразків відповідає вимогам AMS F2924-14 для сплаву Ti6Al4V, представлений у таблиці 1.

Зразки після ГП при $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ піддавали термічній обробці у вакуумній печі за режимом: термообробка при $T = 800 \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$, з витримкою 2 години в середовищі динамічного вакууму ($1 \cdot 10^{-1} \dots 5 \cdot 10^{-2}$ мбар), охолодження в потоці інертного газу (аргону) – це другий режим, який виконується після гарячої обробки (ГП), що включає зниження температури та подальшу обробку при 800°C .

Гіперзагартування (ГП) при температурі $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ дозволяє забезпечити максимальну міцність матеріалу за рахунок формування дрібнозернистої структури, що сприяє підвищенню його механічних характеристик, зокрема твердої та втомної міцності. Це оптимальна температура для загартування сплаву Ti-6Al-4V, яка забезпечує досягнення високоміцної структури з відносно низьким рівнем залишкових напружень.

Термообробка при температурі $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (інертна атмосфера аргону) дозволяє знизити внутрішні напруження, покращити пластичність та стійкість до тріщиноутворення при подальших механічних випробуваннях. Аргонна атмосфера використовується для уникнення окислення титану та запобігання зміні його механічних властивостей через контактування з киснем.

Температура $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ обрана через її здатність сприяти релаксації внутрішніх напружень після попереднього загартування, зменшення хрупкості та підвищення пластичності матеріалу. Це забезпечує досяг-

нення оптимальних властивостей для випробувань на розрив та ударну в'язкість. Тривалість термообробки (2 години) гарантує рівномірне прогрівання зразків. Попередня гаряча обробка при $920\text{ }^{\circ}\text{C}$ забезпечує необхідну міцність, що дозволяє зразку витримувати значні навантаження під час наступних механічних випробувань.

Далі обробка при $800\text{ }^{\circ}\text{C}$ в інертній атмосфері дозволяє знизити залишкові напруження та покращити пластичність, що важливо для забезпечення надійності матеріалу під час реальних експлуатаційних умов (наприклад, у суднобудуванні). Остаточне тестування після термічної обробки дозволяє отримати точні дані про механічні властивості матеріалу в залежності від температури і напрямку виготовлення зразків (горизонтальне або вертикальне).

Вибір режимів термічної обробки Ti-6Al-4V ґрунтується на необхідності досягнення оптимальних механічних властивостей для подальшого використання в умовах суднобудування та морської інфраструктури, де матеріал піддається високим механічним навантаженням і агресивному середовищу. Режими ГП і термообробки при 800°C забезпечують потрібний баланс між міцністю, пластичністю та втомною міцністю, що робить матеріал придатним для виготовлення критичних елементів судових конструкцій та інших морських компонентів. Результати механічних випробувань зразків при $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ наведено в таблиці 2. Примітка: Дані, представлені в таблиці 2–3, були отримані після проведення експериментальних досліджень, включаючи ГП при температурі $920\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ + термообробку при $800\text{ }^{\circ}\text{C} \pm 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ в інертному середовищі аргону.

Як видно з даних таблиці 2, механічні властивості зразків у вихідному стані (без ГП і без т/о) за характеристиками міцності (σ_b , $\sigma_{0,2}$) та відносного звуження відповідають вимогам ASTM F2924-14, відносно по-

Таблиця 1. Хімічний склад дослідних зразків

Найменування	Зміст елементів, мас. %					
	Al	V	Fe	C	O ₂	N ₂
зразок	5,98	4,47	<0,3	0,05	0,0913	0,0055
Норми ASTM F2924-14	5,5–6,75	3,5–4,5	£0,3	£0,08	£0,2	£0,05
Нормы AMS 4928, ASTM F1472-14 для сплаву Ti6Al4V	5,3–6,8	3,5–5,3	£0,6	£0,10	£0,2	£0,05

Таблиця 2. Механічні властивості зразків у вихідному стані при $T = 20^\circ$

Номер зразка	Стан зразків	Напрямок вирізки	$t\text{ }^{\circ}\text{C}$	$\sigma_{\text{в}}, \text{МПа}$	$\sigma_{0,2}, \text{МПа}$	$\delta, \%$	$\psi, \%$	KCU, кгс/см ²	НВ, Остп, мм
1	вихідне (без ГП і без т/о)	горизонтальне	20	1268	1112	8,8	35,3	—	—
2				1263	1121	8,0	34,6	—	—
3				—	—	—	—	3,00	3,20
		сер. знач.		1266	1117	8,4	35,0	3,00	3,20
4		вертикальне	20	1283	1148	8,8	36,0	—	—
5				1283	1162	12,0	31,4	—	—
6				—	—	—	—	2,88	3,20
		сер. знач.		1283	1155	10,4	33,7	2,88	3,20
Норми ASTM F2924-14			20	≥895	≥825	≥10	≥15	—	—

Таблиця 3. Механічні властивості зразків (ГП + т/о і т/о) при $T = 20^\circ\text{C}$

Номер зразка	Стан зразків	Напрям вирізки	t °C	$\sigma_{\text{в}}$, МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	d , %	y , %
1	ГП при 920°C ± 10 °C + термообробка $T = 800 \pm 10$ °C, $t = 2$ год, в інертному середовищі аргону	горизонтальне	20	942	885	16,8	36,4
2				945	884	16,7	36,0
3		вертикальне	20	947	868	20,1	32,8
4				944	868	16,7	38,0
5	термообробка $T = 800 \pm 10$ °C, $t = 2$ год, в інертному середовищі аргону	горизонтальне	20	1025	976	22,0	36,0
6				1024	976	20,0	37,8
7		вертикальне		1011	954	20,0	36,2
8				1018	965	20,1	36,2
Норми ASTM F2924-14			20	≥895	≥825	≥10	≥15

довження зразків – дещо нижче норм ASTM F2924-14.

Показники міцності зразків з горизонтальною побудовою незначно (до 2,5 %) перевищують властивості зразків з вертикальною побудовою, інші властивості знаходяться приблизно на одному рівні.

Як видно з даних таблиці 3, механічні властивості зразків відповідають вимогам ASTM F2924-14, при цьому зразки після відпалу ($T = 800^\circ\text{C}$) мають вищі значення межі міцності та плинності (на 7...11 %) порівняно зі зразками, що пройшли ГП ($T = 920^\circ\text{C}$) + т/о ($T = 800^\circ\text{C}$). Показники пластичності перебувають приблизно на одному рівні.

Обговорення отриманих результатів. Макроструктура досліджена на зламах зразків, зруйнованих при механічних випробуваннях, а також на шліфах, виготовлених у поздовжньому напрямі розривних та ударних зразків. Злами всіх досліджуваних зразків світлі, дрібнокристалічні, з наявністю окремих темних точок – імовірно, дрібних пор (рис. 1, 2).

Мікроаналіз шліфів, виготовлених у поздовжньому напрямку зразків, показав, що мікроструктура зразків у вихідному стані (без ГП та без т/о) має голчасту будову,

характерну для прискореного охолодження сплаву ВТ6 (рис. 3–4, а; б).

Після відпалу при $T = 800^\circ\text{C}$ мікроструктура зразків придбала тонкопластинчасту будову α/β -фаз, границі β -перетвореного зерна не виявлено (рис. 5–6, а; б).

Після ГП ($T = 920^\circ\text{C}$) + відпал ($T = 800^\circ\text{C}$) мікроструктура зразків відрізняється від відпаленого стану більш широкими пластинами α/β -фаз (рис. 7–8, а; б).

Результати показали, що термічна обробка значно впливає на мікроструктуру сплаву Ті6А14V, зменшуючи пористість і покращуючи розподіл фаз.

Результати дослідження показують, що термообробка значно впливає на зменшення пористості та підвищення механічних властивостей матеріалу. Під час термообробки при температурі 800°C протягом 2 годин спостерігається значне зменшення пористості з початкових 8 % до 2 %. Це відбувається завдяки термічному процесу, що сприяє ущільненню структури та виведенню пор, які утворюються під час адитивного виробництва.

Термообробка впливає на зменшення пористості завдяки активації дифузійних процесів, які сприяють заповненню пор

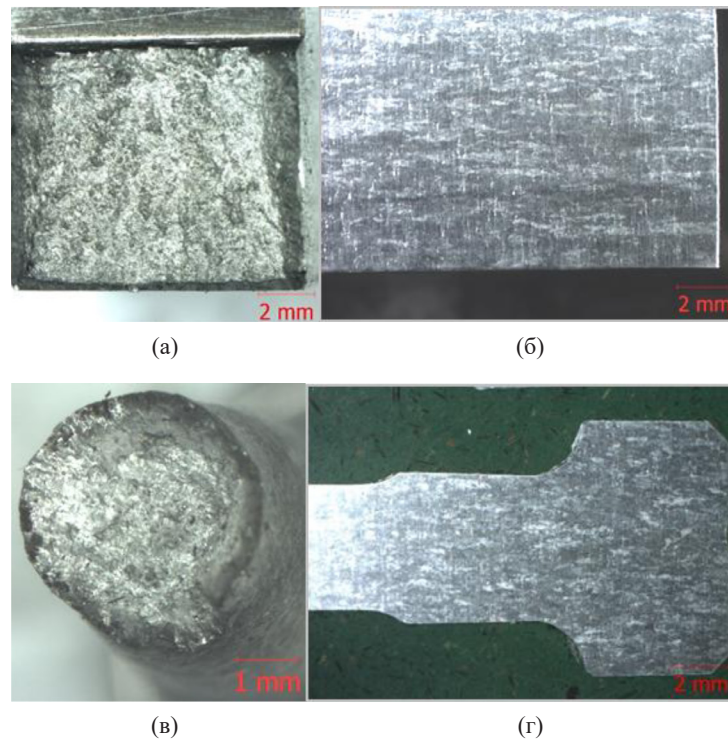


Рис. 1. Злами зразків, що отримані за технологією DMLS до термообробки, вирощених вертикально (а) 1; (б) 2; (г) – 3), $\times 6,5$; (в) 4, $\times 10$

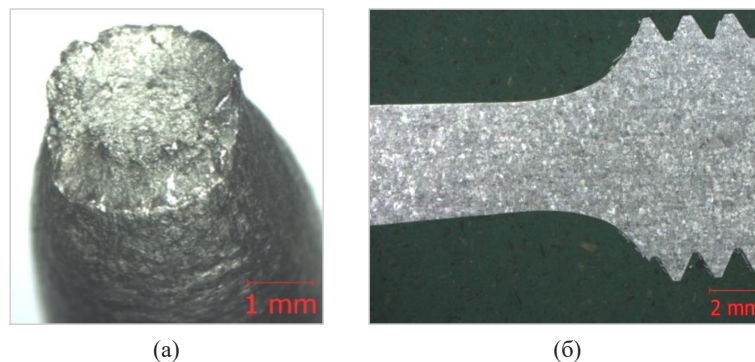


Рис. 2. Злами зразків після випробувань при $T = 300\text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГП 920 $^{\circ}\text{C}$ + відпал $T = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$) (а) 1 $\times 10$; (б) 2 $\times 6,5$

матеріалом. Висока температура знижує внутрішні напруження, підвищує пластичність і сприяє перекристалізації, що веде до ущільнення структури. Також відбувається

випаровування залишкових газів і закриття пор під дією поверхневого натягу. У результаті структура стає щільнішою, а механічні властивості покращуються.

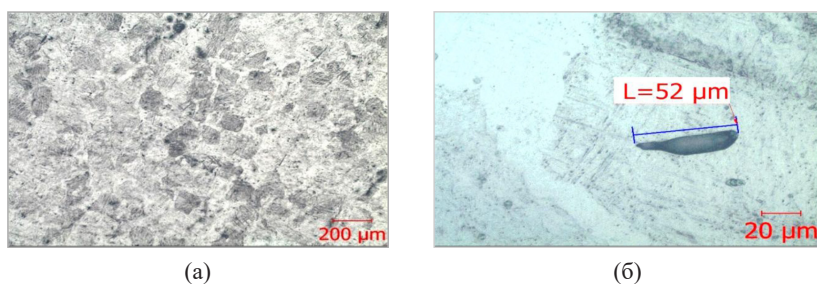


Рис. 3. Мікроструктура зразків (до термообробки), вирощених горизонтально методом селективного лазерного спікання (DMLS) (а) поздовжній, $\times 50$; (б) поздовжній, $\times 500$ — голчаста будова

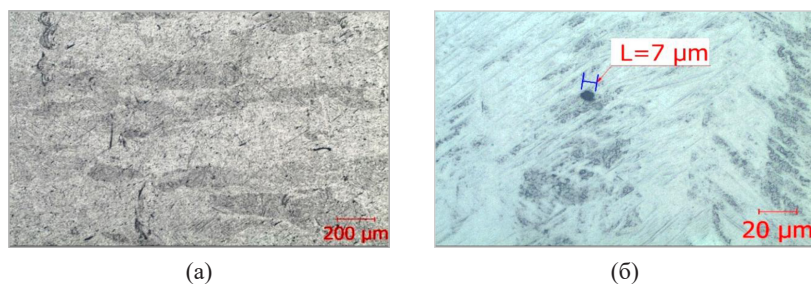


Рис. 4. Мікроструктура зразків (до термообробки), вирощених вертикально методом селективного лазерного спікання (DMLS) (а) поздовжній, $\times 50$; (б) поздовжній, $\times 500$ — голчаста будова

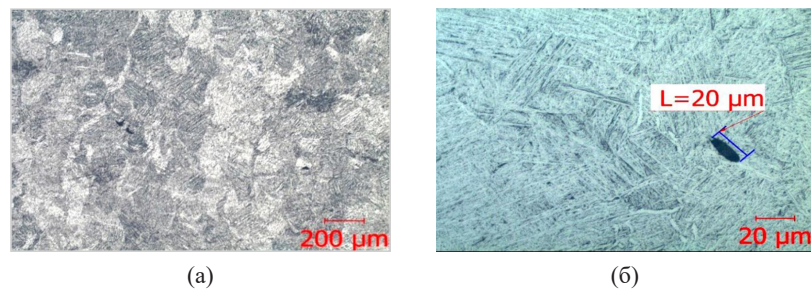


Рис. 5. Мікроструктура зразків після відпалу $T = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) $\times 50$; (б) $\times 500$ тонкопластинчаста будова

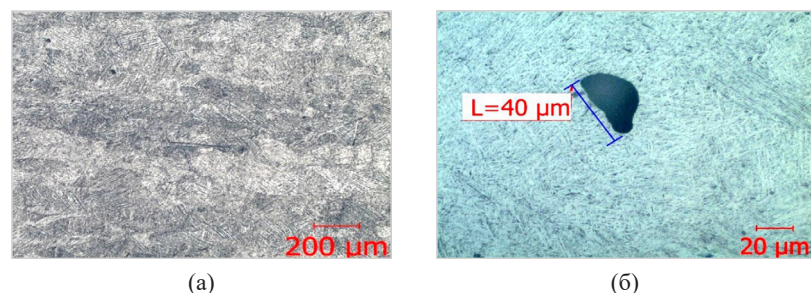


Рис. 6. Мікроструктура зразків після відпалу $T = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (а) $\times 50$; (б) $\times 500$

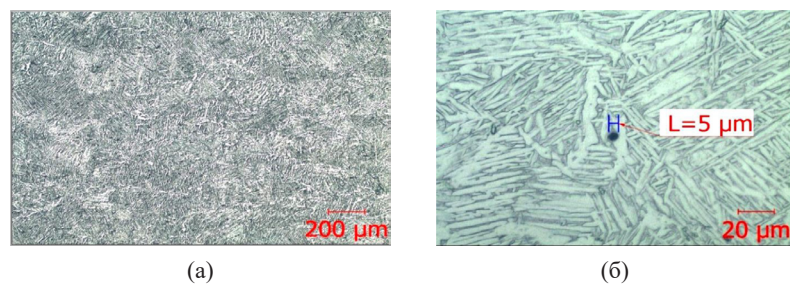


Рис. 7. Мікроструктура зразків, що отримані за технологією DMLS після випробувань при $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГП 920 $^{\circ}\text{C}$ + відпал $T = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (а) $\times 50$; (б) $\times 500$

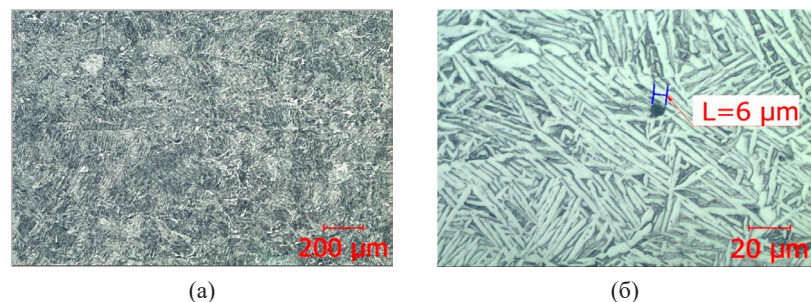


Рис. 8. Мікроструктура зразків, що отримані за технологією DMLS після випробувань при $T = 300 \text{ }^{\circ}\text{C}$ (ГП 920 $^{\circ}\text{C}$ + відпал $T = 800 \text{ }^{\circ}\text{C}$) (а) $\times 50$; (б) $\times 500$

Що стосується механічних властивостей, після проведеної термообробки межа міцності σ_B зросла з 942 МПа до 1025 МПа, межа текучості матеріалу ($\sigma_{0.2}$) з 886 МПа зросла на 977 МПа а відносне подовження матеріалу підвищилось з 4 % до 6 %. Це свідчить про підвищення пластичності та втомної міцності матеріалу, що є важливим для його використання в конструкціях, що піддаються високим механічним навантаженням.

Показники міцності зразків з горизонтальною побудовою незначно (до 2,5 %) перевищують властивості зразків з вертикальною побудовою, інші властивості знаходяться приблизно на одному рівні.

Актуальність дослідження полягає в оптимізації технології адитивного виробництва для виготовлення високоякісних деталей зі сплаву Ti6Al4V, що забезпечить підвищення їх механічних властивостей та довговічності при використанні в аерокосмічній галузі.

Подальші дослідження будуть спрямовані на оптимізацію параметрів селективного лазерного спікання для покращення механічних та термічних характеристик сплаву Ti6Al4V. Планується дослідити вплив постобробки, зокрема термічної та механічної, на мікроструктуру та властивості матеріалу.

Особливу увагу буде приділено аналізу довговічності та корозійної стійкості зразків у реальних експлуатаційних умовах.

Дослідження проводилося відповідно до Плану заходів, які передбачають впровадження технології одержання деталей із титанових сплавів методом селективного лазерного спікання DMLS порошків на установці EOS M400.

Висновки. 1. Хімічний склад матеріалу зразків, виготовлених на установці EOS M400 методом селективного лазерного спікання DMLS із порошків сплаву Ti6Al4V (аналог BT6) фракцією 30...60 мкм фірми «SINO-EURO» (Китай) відповідає вимогам ASTM F2924-14.

2. Механічні властивості зразків у вихідному стані (без ГІП і без т/о) за характеристиками міцності (σ_B , $\sigma_{0.2}$) та відносному звуженню відповідають вимогам ASTM F2924-14.

Після відпалу та обробки (ГІП + відпал) властивості зразків відповідають вимогам ASTM F2924-14, при цьому зразки після відпалу мають вищі значення межі міцності та плинності (на 7...11 %) в порівнянні зі зразками, що пройшли ГІП + відпал.

3. Макроструктура зразків характеризується проявом макрозерна завбільшки 2–3 балів. Тріщин, розшарування, металевих та неметалевих включень, ділянок ліквідаційного походження в макроструктурі досліджуваних зразків не виявлено.

4. Мікроструктура зразків у вихідному стані має голчасту будову, характерну для прискореного охолодження сплаву BT6. Після відпалу при $T = 800^\circ\text{C}$ мікроструктура зразків придбала тонкопластинчасту будову α/β -фаз.

Після ГІП + відпал мікроструктура зразків відрізняється від відпаленого стану більш широкими пластинами α/β -фаз.

5. Слід зазначити, що у зразках у вихідному стані та після відпалу виявлено поодинокі мікропори переважно округлої форми розмірами $\varnothing 20...95$ мкм. У зразках після ГІП розмір мікропор становить $\varnothing 6...9$ мкм.

Список літератури

- [1] Roskill report. *Titanium Metal: Market Outlook to 2018*. Sixth Edition, 2013 // Copyright © Roskill Information Services Ltd. ISBN 978 0 86214 595 8.
- [2] TITANIUM 2008: development of international titanium industry, preparation technology and applications [Liu B, Liu YB, Yang X, Liu Y.]. – *Materials Science Eng. Pow. Metall* 2008. № 14(2). 67–73 p.
- [3] Терновой, Ю. Ф. Полуфабрикаты и изделия из распыленных металлических порошков [Текст] / Ю. Ф. Терновой, Н. Н. Пашетнева, С. А. Воденников. – Запорожье : Изд-во Запорожской государственной инженерной академии, 2010. 180 с.
- [4] Jordan, Ch. B., Duwez, P. Approximate phase relationships in the Ti-Al-V-system at 1800° and 1400° F. *Trans. ASM* 4S (1956) 783-794. (S. 585).

- [5] Kubaschewski, O; Wainwright, C, Kirby, F.J.: The heats of formation in the Ti-Al-V –system, J.Inst.of Metals 89 (1960 und 1961) 139–144 (S. 585).
- [6] Crossley, F.A. Effects of the ternary additions: O, Sn, Zr, Cb, Mo, and V on the $\alpha/\alpha + \text{Ti}_3\text{Al}$ boundary of Ti-Al-base-alloys, Trans. AIME 245(1969) 1963–1968.
- [7] Янко Т.Б. Дослідження хімічного складу та мікроструктури губчастого титану, отриманого за технологією комплексного легування алюмінієм та ванадієм. Вісник НТУ «ХПІ». 2015. № 11(1120). С. 3–8.
- [8] “Stan Abkowitz, ‘48 – MIT Technology Review”. 18 October 2016.
- [9] Li S.J., Wang Q., Zhang Y.L. et al., “Microstructure and mechanical properties of Ti–6Al–4V manufactured by selective laser melting”, *Materials Science and Engineering: A*, 2017.
- [10] V.E. Carter et al., “Chemical analysis of reused Ti–6Al–4V powder for additive manufacturing”, *Journal of Materials Research*, 2019.
- [11] T. Wohlers, “Fracture analysis of additively manufactured Ti–6Al–4V components”, *Additive Manufacturing Review*, 2021.
- [12] Коваленко Ю.М., Орлов М.Г. «Вплив повторного використання порошку Ti–6Al–4V на механічні властивості виробів, виготовлених методом DMLS». *Металознавство та термічна обробка металів*, 2020.
- [13] Пащенко О.С. «Аналіз дефектів у зразках, виготовлених методом селективного лазерного спікання з порошків Ti–6Al–4V». *Матеріалознавство. Проблеми та перспективи*, 2021.
- [14] Бойко Л.І., Соколов В.М. «Термічна обробка титанових сплавів після адитивного виробництва: ефекти та механізми». *Прикладні матеріали і технології*, 2019.
- [15] Zhang, L., & Liu, L. (2021). Microstructure and mechanical properties of Ti-6Al-4V manufactured by selective laser melting. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 30(10), 7480–7490. <https://doi.org/10.1007/s11665-021-05753-w>
- [16] Liu, L., Zhang, L., & Zhang, L. (2022). Mechanical properties of Ti6Al4V fabricated by laser powder bed fusion: A review focused on the processing and microstructural parameters influence on the final properties. *Metals*, 12(6), 986. <https://doi.org/10.3390/met12060986>
- [17] Zhang, L., & Liu, L. (2021). Effects of post heat treatments on microstructures and mechanical properties of selective laser melted Ti6Al4V alloy. *Metals*, 11(10), 1593. <https://doi.org/10.3390/met11101593>
- [18] Kononenko, G.A., Kimstach, T. V., Safronova, O. A., Podolsky, R. V., Puchikov, O. V., & Klinova, O. P. (2022). Modern perspective metal materials for armored obstacle (overview). *Fundamental and Applied Problems of Ferrous Metallurgy*, (36), 325–342. Institute of Ferrous Metallurgy Z.I.Nekrasova of the National Academy of Sciences of Ukraine.
- [19] Yeoh, W.Y., Lan, B., & Lowe, M.J.S. (2023). Investigation of the Influence of Macrozones in Titanium Alloys on the Propagation and Scattering of Ultrasound. *arXiv preprint arXiv:2304.10189*.
- [20] Cherezov, N., Fadeev, A., Samokhin, A., & Alymov, M. (2024). SHS-hydrogenation, thermal dehydrogenation, and plasma spheroidization to produce spherical titanium powders from titanium sponge alloys. *Alloys*, 3(3), 246–256. <https://doi.org/10.3390/alloys3030014>

© Кирилах С.В.

Дата надходження статті до редакції: 08.01.2025

Дата затвердження статті до друку: 26.01.2025