

Національний університет «Запорізька політехніка»

**НОВІ МАТЕРІАЛИ І ТЕХНОЛОГІЇ
В МЕТАЛУРГІЇ
ТА МАШИНОБУДУВАННІ**

**NEW MATERIALS AND TECHNOLOGIES
IN METALLURGY AND MECHANICAL
ENGINEERING**

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВИХОДИТЬ ЧОТИРИ РАЗИ НА РІК

№ 4'2024

Заснований у грудні 1997 року

Засновник та видавець – Національний університет «Запорізька політехніка»

Запоріжжя
2024

p-ISSN 1607-6885
e-ISSN 2786-7358

УДК 669+621.002+621.002.3

Наказом Міністерства освіти і науки України № 1471 від 26.11.2020 р. «Про затвердження рішень Атестаційної колегії Міністерства щодо діяльності спеціалізованих вчених рад від 26 листопада 2020 року» журнал «Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні» (скорочена назва – НМТ) включений до переліку наукових фахових видань України в категорії «Б», в яких можуть публікуватися результати дисертаційних робіт на здобуття наукових ступенів доктора наук і доктора філософії (кандидата наук).

Інтернет-сторінка журналу: <http://nmt.zntu.edu.ua>

Наукове видання включено до міжнародних (INSPEC, CrossRef) і національних («Джерело», Національна бібліотека України імені В. І. Вернадського НАН України) реферативних та наукометричних баз даних.

Опублікованим статтям присвоюється унікальний ідентифікатор цифрового об'єкта DOI.

Журнал розповсюджується за Каталогом періодичних видань України (передплатний індекс – 23271).

Науковий журнал друкує оригінальні та оглядові статті науковців ВНЗ і установ України та інших країн відповідно до рубрик:

- теорія будови та структурних змін у металах, сплавах та композитах. Вплив термічної, хіміко-термічної та термомеханічної обробки на характер структури і фізико-механічні властивості матеріалів;

- конструкційні та функціональні матеріали. Механічні властивості сталей, сплавів та композитів. Технологічне забезпечення надійності та довговічності деталей енергетичних установок. Методи механічного оброблення. Технології зміцнювальних обробок. Характеристики поверхневих шарів та захисних покриттів деталей машин і виробів;

- металургійне виробництво. Теплофізика та теплоенергетика. Ресурсозберігальні технології. Порошкова металургія.

Промтранспорт. Рациональне використання металів;

- механізація, автоматизація та роботизація. Вдосконалення методів дослідження та контролю якості металів. Моделювання процесів у металургії та машинобудуванні.

РЕДАКЦІЙНА КОЛЕГІЯ

Головний редактор: д-р техн. наук, професор Сергій Беліков (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

Заступники гол. редактора: д-р техн. наук, професор Вадим Ольшанецький (НУ «Запорізька політехніка»), Україна
д-р техн. наук, професор Валерій Наумик (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

Редакційно-видавнича рада: Сергій Беліков, Вадим Ольшанецький, Валерій Наумик, Антон Матюхін, Наталія Савчук, Катерина Бондарчук, Наталя Висоцька

Члени редколегії:

канд. техн. наук Віктор Грешта (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

д-р фіз.-мат. наук, чл.-кор. НАН Казахстан

Г. Ш. Яр-Мухамедова (Казахський національний університет ім. Аль-Фарабі), Казахстан

д-р техн. наук Юрій Внуков (незалежний вчений), США

Dr. of Chemistry, Ph.D. Alec Groysman (Institute of Technology Faculty of Chemical Engineering Haifa), Ізраїль

Doc. Ing. Ľuboš Kaščák, PhD (Technical University of Košice), Словаччина

PhD Peter Arras, (KU Leuven, Sint-Katelijne-Waver), Бельгія

PhD, eng., DSc Dariusz Rozumek (Opole University of Technology Department of Mechanics and Machine Design), Польща

Prof. Jogaq Kacani (Academy of Sciences of Albania), Албанія

Dr hab. inż., prof. PCz Anna Kawalek (Politechnika Częstochowska, Częstochowa), Польща

Dr hab. inż., prof. PCz Marcin Knopiński (Politechnika Częstochowska, Częstochowa), Польща

д-р техн. наук Наталія Калініна (ДНУ), Україна

д-р техн. наук Сергій Гоменюк (ЗНУ), Україна

д-р техн. наук Сергій Гребенюк (ЗНУ), Україна

д-р техн. наук Владислав Мазур (НТУУ «КПІ»), Україна

чл.-кор. НАН України Віктор Федірко (ФМІ ім. Г. В. Карпенка НАН України)

д-р техн. наук Зоя Дурягіна (НУ «Львівська політехніка»), Україна

д-р техн. наук Діана Глушкова (ХНАДУ), Україна

д-р фіз.-мат. наук Володимир Данільченко (Інститут металофізики ім. Г. В. Курдюмова НАН України)

д-р хім. наук Михайло Турчанін (ДДМА), Україна

д-р техн. наук Вадим Шаломєєв (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

д-р техн. наук Михайло Бриков (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

д-р техн. наук Валерій Міщенко (НУ «Запорізька політехніка»),

д-р техн. наук Олексій Качан (НУ «Запорізька політехніка»),

Україна

Україна д-р фіз.-мат. наук Степан Лоскутов (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

Україна

д-р техн. наук Георгій Слинько (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

д-р фіз.-мат. наук Володимир Пожуєв (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

Рукописи надісланих статей проходять додаткове незалежне рецензування з залученням провідних фахівців України та інших країн, за результатами якого редакційна колегія ухвалює рішення щодо можливості їх опублікування. Рукописи не повертаються.

Рекомендовано до видання Вченою радою Національного університету «Запорізька політехніка», протокол № 6 від 28 січня 2025 року.

Журнал набраний та зверстаний у редакційно-видавничому відділі Національного університету «Запорізька політехніка»

Комп'ютерний дизайн та верстання: Наталія Савчук

Адреса редакції: 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, тел. (061) 769-82-96, редакційно-видавничий відділ

e-mail: rvv@zp.edu.ua

© Національний університет «Запорізька політехніка», 2024

p-ISSN 1607-6885
e-ISSN 2786-7358

UDC 669+621.002+621.002.3

By order of the Ministry of Education and Science of Ukraine No. 1471 of November 26, 2020 "On approval of decisions of the Attestation Board of the Ministry regarding the activities of specialized scientific councils of November 26, 2020", the journal "New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering" (abbreviated name - NMT) is included in the list of scientific professional publications of Ukraine in the category "B", in which the results of dissertations for the scientific degrees of Doctor of Science and Doctor of Philosophy (candidate of science) can be published.

Internet page of the journal: <http://nmt.zntu.edu.ua>

The scientific publication is included in international (INSPEC, CrossRef) and national (Dzherelo, National Library of Ukraine named after V. I. Vernadsky of the National Academy of Sciences of Ukraine) abstract and scientometric databases.

Published articles are assigned a unique DOI digital object identifier.

The journal is distributed according to the Catalog of Periodicals of Ukraine (subscription index - 23271).

The scientific journal publishes original articles by scientists from universities and organizations of Ukraine and other countries in accordance with the headings:

- theory of structure and structural changes in metals, alloys and composites. Influence of thermal, chemical-thermal and thermomechanical treatment on the nature of the structure and physical and mechanical properties of materials;
- structural and functional materials. Mechanical properties of steels, alloys and composites. Technological support of reliability and durability of parts of power plants. Methods of mechanical processing. Hardening technologies. Characteristics of surface layers and protective coatings of machine parts and products;
- metallurgical production. Thermal physics and heat power engineering. Resource-saving technologies. Powder metallurgy. Promtransport. Rational use of metals;
- mechanization, automation and robotization. Improvement of methods for research and quality control of metals. Modeling of processes in metallurgy and mechanical engineering.

EDITORIAL TEAM

Chief editor: Dr. Sc., Professor Sergiy Byelikov (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Deputy chiefs editor: Dr. Sc., Professor Vadim Ol'shanetskii (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine
Dr. Sc., Professor Valeriy Naumyk (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Editorial and Publishing Council: Sergiy Byelikov, Vadim Ol'shanetskii, Valeriy Naumyk, Anton Matiukhin, Nataliia Savchuk, Katerina Bondarchuk, Natalya Vysotska

Members of the editorial board:

Cand. Sc. Victor Greshta (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Member NAS of Kazakhstan G. Sh. Yar-Mukhamedova (Al-Farabi Kazakh National University), Kazakhstan

Dr. tech. Sci. Yu. M. Vnukov (independent studies), USA

Dr. of Chemistry, Ph.D. Alec Groysman (Institute of Technology Faculty of Chemical Engineering Haifa), Israel

Doc. Ing. Ľuboš Kaščák, PhD (Technical University of Košice), Slovakia

PhD Peter Arras, (KU Leuven, Sint-Katelijne-Waver), Belgium

Ph.D., eng., DsC Dariusz Rozumek (Opole University of Technology Department of Mechanics and Machine Design), Poland

Prof. Jogaq Kacani (Academy of Sciences of Albania), Albania

Dr hab. inż., prof. PCz Anna Kawalek (Politechnika Częstochowska, Częstochowa), Poland

Dr hab. inż., prof. PCz Marcin Knopiński (Politechnika Częstochowska, Częstochowa), Poland

Dr. Sc. Nataliia Kalinina (DNU), Ukraine

Dr. Sc. Sergiy Gomenyuk (ZNU), Ukraine

Dr. Sc. Sergiy Grebenyuk (ZNU), Ukraine

Dr. Sc. Vladislav Mazur (NTUU "KPI"), Ukraine

Corresponding Member NAS of Ukraine V. N. Fedirko (FMI named after G. V. Karpenko NAS of Ukraine)

Dr. Sc. Zoya Duryagina (NU "Lviv Polytechnic"), Ukraine

Dr. Sc. Diana Hlushkova (KhNADU), Ukraine

Dr. Sc. Volodymyr Danilchenko (Institute of Metal Physics named after G. V. Kurdyumov of the National Academy of Sciences of Ukraine)

Dr. Sc. Michael Turchanin (DSMA), Ukraine

Dr. Sc. Vadim Shalomeev (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Michael Brykov (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Valeriy Mishchenko (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Oleksiy Kachan (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Stepan Loskutov (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Georgiy Slynko (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Dr. Sc. Volodymyr Pozhnev (NU Zaporizhzhia Polytechnic), Ukraine

Manuscripts of submitted articles undergo additional independent review with the involvement of leading experts from Ukraine and other countries, based on which the editorial board decides on the possibility of their publication. Manuscripts are not returned.

Recommended for publication by the Academic Council of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Protocol N 6, January 28, 2025.

The journal was typed and typeset in the editorial and publishing department of the National University Zaporizhzhia Polytechnic

Computer design and layout: Nataliia Savchuk

Editorial address: 69063, Zaporizhzhia, st. Zhukovsky, 64, tel. (061) 769-82-96, editorial and publishing department
e-mail: rvv@zp.edu.ua

© National University Zaporizhzhia Polytechnic, 2024

ЗМІСТ

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

Сергій Данилов, Олексій Педаш, Валерій Наумик, Дмитро Тьомкін, Олена Наумик КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ ТУГОТОПКИХ З'ЄДНАНЬ.....	6
--	---

КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

Валерій Міщенко, Сергій Беліков, Евеліна Бажміна, Володимир Корнієнко, Дмитро Міщенко, Андрій Харченко ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ.....	15
--	----

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

Сергій Беліков, Валерій Вініченко, Олександр Коробко, Вадим Шаломєєв, Дмитро Пархісенко, Анатолій Єршов СТАН ПИТАННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОМПОЗИТІВ.....	22
--	----

Андрій Борковських, Сергій Лушин, Микола Борковських РОЗРОБКА МЕТОДУ ОТРИМАННЯ АЛЮМІНІЄВО-ЦИРКОНІЄВОЇ ЛІГАТУРИ МЕТАЛОТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ ІЗ ФТОРИДНО-ХЛОРИДНОГО РОЗПЛАВУ.....	45
--	----

Сергій Чигілейчик, Юрій Торба, Руслан Куліковський, Наталія Широкобокова, Олександр Чечет ОЦІНКА ВПЛИВУ ВМІСТУ АКТИВНИХ ГАЗІВ У ПОРОШКУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ.....	52
---	----

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

Георгій Слинько, Роман Сухонос, Віра Слинько, Віталій Лук'яненко ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСНОГО НАДДУВУ БЕНЗИНОВОГО ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ШВИДКІСНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ.....	59
--	----

МЕХАНІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТИЗАЦІЯ

Василь Обдул, Антон Матюхін, Анна Ковалек, Антон Рябенко, Олександр Єпішкін, Вікторія Федосєєва ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ГВИНТОВИХ ПРЕСІВ.....	67
---	----

CONTENTS

STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

Serhii Danylov, Oleksii Pedash, Valeriy Naumyk, Dmytro Tomkin, Olena Naumyk COMPLEX MODIFICATION OF NICKEL-BASED SUPERALLOY WITH ULTRA-FINE REFRACTORY COMPOUNDS PARTICLES.....	6
--	---

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

Valeriy Mishchenko, Sergiy Byelikov, Evelina Bazhmina, Volodymyr Kornienko, Dmytro Mishchenko, Andriy Kharchenko INVESTIGATION OF ELECTRIC RESISTANCE WELDING OF SPECIAL STEELS OF DIFFERENT THICKNESSES.....	15
--	----

TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

Sergiy Byelikov, Valeriy Vinichenko, Oleksandr Korobko, Vadim Shalomееv, Dmytro Parkhisenko, Anatoliy Ershov STATE OF THE ISSUE REGARDING THE POSSIBILITY OF ENHANCING THE CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE COMPOSITES.....	22
---	----

Andriy Borkovskykh, Sergiy Lushchin, Mykola Borkovskykh DEVELOPMENT OF THE METHOD OF OBTAINING ALUMINUM-ZIRCONIUM MASTER ALLOY BY METALOTHERMAL METHOD FROM FLUORIDE-CHLORIDE MELT.....	45
--	----

Serhii Chigileychik, Yurii Torba, Ruslan Kulykovskiy, Nataliia Shyrokobokova, Oleksandr Chechet INFLUENCE OF ACTIVE GAS CONTENT IN POWDER ON MECHANICAL PROPERTIES OF WORKPIECE BLANKS PRODUCED BY PLASMA ADDITIVE TECHNOLOGIES.....	51
---	----

MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

Georgy Slynko, Roman Sukhonos, Vira Slinko, Vitaly Lukyanenko RESEARCH OF THE INFLUENCE OF RESONANT CHARGING OF A TWO-STROKE GASOLINE ENGINE ON ITS POWER CURVE.....	58
---	----

MECHANIZATION, AUTOMATION AND ROBOTICS

Vasyl Obdul, Anton Matiukhin, Anna Kawalek, Anton Riabenko, Oleksandr Yepishkin, Viktoria Fedoseeva ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF SCREW PRESSES.....	67
---	----

СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

УДК 669.245:669.145:621.746.5

- Сергій Данилов аспірант кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: Dankar1378@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-8087-9638
- Олексій Педаш канд. техн. наук, керівник відділу АТ «Мотор Січ» м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: tb.ugmet@motorsich.com*, ORCID: 0000-0003-1231-9951
- Валерій Наумик д-р техн. наук, професор кафедри машин й технології ливарного виробництва, проректор з науково-педагогічної роботи та міжнародної діяльності Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: vnaumyk@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-0657-4510
- Дмитро Тьомкін аспірант кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: tajdv678@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-4042-4452
- Олена Наумик аспірантка кафедри машин й технології ливарного виробництва Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: enaumyk@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-1963-1836

КОМПЛЕКСНЕ МОДИФІКУВАННЯ ЖАРОМІЦНОГО НІКЕЛЕВОГО СПЛАВУ ДИСПЕРСНИМИ ЧАСТКАМИ ТУГОТОПКИХ З'ЄДНАНЬ

Мета роботи. За рахунок комплексного модифікування жароміцного сплаву модифікаторами різного механізму дії забезпечити підвищення характеристик пластичності та ударної в'язкості до рівня, котрий дозволить локалізувати можливе руйнування крупногабаритних лопаток турбіни низького тиску авіаційного двигуна в процесі експлуатації.

Методи дослідження. Мікроструктурний аналіз та дослідження фазового складу проводили методами оптичної та сканувальної електронної металографії відповідно на оптичному та електронному мікроскопах.

Отримані результати. Проведено дослідження по комплексному модифікуванню сплаву ЖСЗДК-ВІ ітрієм та ультрадисперсними частинками карбонітриду титану $Ti(C, N)$ перемінного вмісту (від 0,025 % до 0,075 %), при заливанні розплаву у керамічну форму, перший робочий шар якої виконано із застосуванням алюмінату кобальту $CoAl_2O_4$. В структурі зразків дослідних варіантів, наряду із карбідами сферичної морфології, виявлено глобулярні карбіди, в місцях розташування котрих спостерігаються зони, що збагачені на ітрії, молібден та титан, та збіднені на хром. Результати дослідження дозволяють зробити припущення, що, ймовірно, високотемпературні первинні карбіди типу YC , слугують підложками для формування низькотемпературних модифікацій карбідів MC . В матеріалі, після введення у модифікований ітрієм розплав 0,050 % ультрадисперсних часток карбонітриду титану $Ti(C, N)$, забезпечено високі рівні ударної в'язкості (~ 70 Дж/см²) та часу до високотемпературного руйнування (> 500 год).

Наукова новизна. Одержано нові дані щодо фазового стану сплаву ЖСЗДК-ВІ після комплексного модифікування за схемою $(Ti(C, N)+Y+CoAl_2O_4)$. Вивчено тонку будову жароміцного сплаву на основі нікелю, що традиційно використовується для отримання великогабаритних лопаток турбіни газотурбінного двигуна авіаційного призначення.

Практична цінність. Одержані результати розширюють можливості використання жароміцного сплаву ЖСЗДК-ВІ для отримання виливків відповідального призначення.

Ключові слова: жароміцний сплав, структура, модифікування, карбонітрид титану, ітрії, алюмінат кобальту, термічна обробка.

Вступ

Жароміцні сплави, що застосовуються в газотурбобудуванні, окрім достатньої жароміцності й опору

втомному руйнуванню, повинні мати ще й достатній рівень пластичності, забезпечуючи високу працездатність деталей в умовах нерівномірного розподілення

напружень за перерізом. Зазвичай лопатки газотурбінних двигунів мають складну геометрію з наявністю зон з підвищеною концентрацією напружень, та працюють під дією відцентрових сил й динамічних навантажень від газового потоку, тому розподілення напружень за їх перерізом зазвичай має нерівномірний характер. Пластична деформація дозволяє розподілити напруження в матеріалі й суттєво їх знизити в об'ємах, рівень діючих напружень в котрих максимальний. У зв'язку з цим, до матеріалу лопаток (особливо великогабаритних) висуваються вимоги не тільки високих міцності й жароміцності, але й достатньої пластичності та ударної в'язкості, що в процесі експлуатації максимально унеможливить їх руйнування шляхом крихкого відриву під дією зовнішніх або внутрішніх чинників.

Раніше проведеними роботами [1–10] особлива увага приділялася вивченню й покращенню показників тривалої міцності й повзучості жароміцних сплавів, а також показників втоми при кімнатній і підвищених температурах. В той же час, питання забезпечення в конструкції лопаток достатнього рівня пластичності й ударної в'язкості розкрито недостатньо.

На сьогодні забезпечення підвищених характеристик деталей гарячого тракту та в цілому експлуатаційного ресурсу газотурбінних двигунів, як правило, здійснюють за двома основними напрямками: розробкою нових складнолегованих жароміцних сплавів з високим вмістом елементів, котрі володіють низькими коефіцієнтами дифузії в умовах високих температур та підвищення комплексу службових характеристик шляхом додаткового легування, модифікування та мікролегування промислових сплавів, що підтвердили свою надійність впродовж тривалої експлуатації в реальних умовах.

Оскільки впровадження нових матеріалів пов'язане із високими матеріальними затратами, то підвищення рівня експлуатаційної надійності деталей гарячого тракту газотурбінних двигунів модифікуванням є більш продуктивним, завжди залишається перспективним та менш коштовним та зарегульованим.

Раніше проведені дослідження [11–16] показали, що рівень властивостей існуючих жароміцних сплавів може бути суттєво покращений за рахунок проведення спеціальних технологічних операцій, що виконуються при литті лопаток – модифікування, рафінування [17–23], а також обробкою відповідального жароміцного литва гарячим ізостатичним пресуванням [24–28], та впровадженням вдосконалених режимів термічної обробки. Саме комплексне застосування декількох зі згаданих (або інших) технологічних операцій, як правило, забезпечує якісно новий рівень експлуатаційних властивостей відповідальних литих деталей, виготовлених з відомих жароміцних сплавів, одночасно із високими техніко-економічними показниками.

Раніше проведеними дослідженнями [29–35] підтверджено позитивний вплив модифікування жароміцних сплавів ітрієм та дисперсними часткам карбонітриду титану для забезпечення стабільності структури, поліпшення властивостей та експлуатаційної

надійності відповідальних литих виробів для авіаційного та енергетичного машинобудування. Однак особливості експлуатації таких відповідальних деталей, як великогабаритні лопатки турбіни, вимагають від матеріалу як більш високого загального рівня механічних властивостей, так і стійкості до руйнування від ударного згину.

Мета роботи

Метою даного дослідження є підвищення механічних властивостей жароміцного сплаву, перш за все, пластичності й ударної в'язкості на рівні, що унеможливить критичні ситуації в експлуатації (розліт уламків великогабаритних лопаток по складовим газотурбінного двигуна, спричинених їх випадковим обривом під дією зовнішніх або внутрішніх чинників), за рахунок комплексного модифікування модифікаторами різного механізму дії.

Матеріал і методика досліджень

Досліджували зразки, а також фрагменти ливникової системи, відлиті з жароміцного нікелевого сплаву ЖСЗДК-ВІ, комплексно модифікованого ітрієм (0,01% (мас.)) та карбонітридом титану за наступними варіантами:

- 1 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,025 %;
- 2 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,050 %;
- 3 – присадка Ti(C,N) у розплав – 0,075 %.

На вакуумній плавильній установці, розплав усіх дослідних плавок заливали у керамічні форми, перший робочий шар котрих був виконаний з додаванням 5 % алюмінату кобальту.

Методом рівноосної кристалізації з комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів, отримували заготовки циліндричних зразків для механічних випробувань діаметром 12 мм, а також квадратного перерізу розміром 12 × 12 мм для випробувань на ударну в'язкість та визначення твердості. Надалі заготовки зразків піддавали гарячому ізостатичному пресуванню та стандартній термічній обробці – гомогенізації при температурі 1210±15 °С, з витримкою протягом 4 год і наступним охолодженням на повітрі.

Після обробки за вказаними варіантами, заготовки проходили механічну обробку для забезпечення розмірів, передбачених технічною документацією на виготовлення зразків для механічних випробувань.

Визначали хімічний склад матеріалу, а також макро- та мікроструктуру дослідних зразків. Макроструктуру виявляли методом хімічного травлення в реактиві з 80 % HCl та 20 % H₂O₂.

Механічні властивості при кімнатній температурі (границю міцності, границю текучості, відносне видовження, відносне звуження) визначали у відповідності до ISO 6892-84, СТ СЭВ 471-88. Випробування на розрив здійснювали на машині ZDMY30. Випробування на ударну в'язкість здійснювали на маятниковому копрі Instron SI-1M у відповідності до ДСТУ ISO 148-1:2022.

Випробування на тривалу міцність проводили відповідно до вимог ДСТУ ISO 204:2019 на установці моделі Instron M3 при температурі 850 °C і навантаженні 340 МПа до повного руйнування зразків.

Результати досліджень та їх обговорення

Хімічний склад комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ всіх дослідних варіантів, за основними елементами, відповідає вимогам НТД на матеріал. Модифікуванням забезпечили наявність в сплаві ітрію у кількості 0,01 % (табл. 1).

Таблиця 1 – Хімічний склад металу дослідних варіантів модифікування сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	Вміст елементів, мас. %						
	C	Cr	Co	W	Al	Ti	Mo
0,025% Ti(C,N)	0,07	11,6	8,7	3,8	4,6	2,8	3,8
0,050% Ti(C,N)	0,07	11,8	8,7	3,9	4,5	2,9	3,9
0,075% Ti(C,N)	0,08	11,8	8,8	3,9	4,6	2,8	3,8
Норми НТД	0,06–0,11	11,0–12,5	8,0–10,0	3,8–4,5	4,0–4,8	2,5–3,2	3,8–4,5

Примітка: вміст S, P, Mn ≤ 0,05; Ni – основа.

Дослідженням фрагментів, вирізаних з нижньої частини блоку зразків, виявлено наявність двох яскраво вироджених зон зі змінною морфологією макрозерна у виливках. Перша зона – зона стовбчастих кристалів, що розповсюджується від поверхні виливків до центральної частини, на відстань 6–10 мм (рис. 1). Ця зона, здебільшого, формується під впливом алюмінату кобальту [36–38], котрий був введений в перший робочий шар керамічної форми й володіє підвищеною теплопровідністю [39, 40] у порівнянні із нікелевим розплавом, тим самим забезпечуючи інтенсивне тепловідведення від нього. Друга зона – зона рівновісних зерен, що розташована переважно в центрі виливків й за діаметром становить 22–24 мм. Інтенсивне подрібнення зерна в цій зоні зумовлене дією дисперсних часток карбонітридів титану, що виступають додатковими центрами зародження кристалів, формуючи більш дрібнокристалічну структуру сплаву. Загалом простежується тенденція до зниження розмірів макрозерна при збільшенні об’ємного вмісту карбонітридів, що вводяться у розплав, й при введенні 0,075 % Ti(C, N) макрозерно подрібнювалося більш інтенсивно у порівнянні з іншими дослідними варіантами (табл. 2).

Результати виміру параметрів макроструктури фрагментів блоку зразків, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ, наведено у таблиці 2.

При металографічному дослідженні встановлено, що мікроструктура зразків, відлитих зі сплаву ЖСЗДК-ВІ за усіма дослідними варіантами (після ГП та термічної обробки), являє собою γ- твердий розчин, зміцнений інтерметалідною γ'- фазою, з наявністю карбідів і карбонітридів (рис. 2) та відповідає нормально термообробленому стану сплаву ЖСЗДК-ВІ й прийнятій шкалі мікроструктур.

Гарячим ізостатичним пресуванням при температурі 1210 °C і тиску 160 МПа вдалося позбутися усадкових мікропор та рихлот в дослідних зразках усіх варіантів. Відбулося залікування мікропор, що розташовувалися у внутрішніх об’ємах металу й не виходили на поверхню зразка. Практично повна відсутність внутрішньої мікропористості в ливарних жароміцних сплавах, в цілому, сприяє стабілізації їх структури і відповідно властивостей дослідного матеріалу.

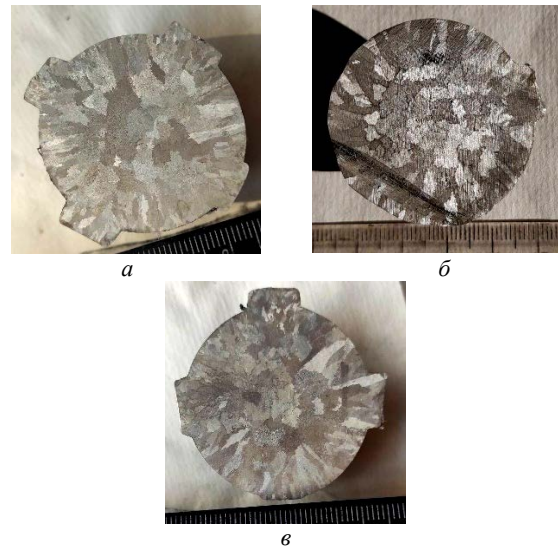


Рисунок 1. Макроструктура у поперечному перерізі фрагментів блоку зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів: а – 0,025 % Ti(C,N); б – 0,050 % Ti(C,N); в – 0,075 % Ti(C,N)

Таблиця 2 – Параметри макроструктури (мм) фрагментів блоку зразків, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	Розмір кристалізаційних зон		Розмір макрозерна
	зона стовбчастих кристалів	зона рівновісних кристалів	
0,025% Ti(C,N)	7,5...10,5	16...22	1,5...5,0
0,050% Ti(C,N)	6,0...7,5	22...24	1,5...3,5
0,075% Ti(C,N)	6,5...10,0	17...24	1,0...3,5

Стандартними підрахунками структурних складових встановили, що середній розмір карбідних та карбонітридних включень становив 1,5–3 мкм (табл. 3).

В структурі сплаву після комплексного модифікування, карбіди та карбонітриди виділяються у вигляді дрібних дискретних частинок переважно сферичної форми, що рівномірно розподілені в об’ємі матеріалу (рис. 2). Введення в розплав 0,025 % Ti (C, N) призвело до формування карбідів у вигляді пластин, що характерні для евтектичних карбідів типу Me₆C з довжиною ~8 μm (рис. 2a) і відповідно призвело до формування більш грубих меж зерен. Підвищення швидкості кристалізації розплаву при збільшенні об’ємного вмісту

карбонітридів Ti(C,N), що вводяться до нього у кількостях до 0,050–0,075 %, призводило до формування тонких меж зерен з наявністю дрібних примезових карбідів розміром, що переважно не перевищував 2 мкм (рис. 2б, в).

Наряду із карбідами сферичної морфології в структурі всіх дослідних варіантів виявлені глобулярні карбіди, в місцях розташування котрих спостерігаються зони, що збагачені на ітрій, молібден та титан, та збіднені на хром (рис. 3). Аналіз діаграми стану Y-C, свідчить про те, що формування цих карбідів відбувається в умовах високих температур, близьких до температури ліквіду, забезпечуючи їм тим самим глобулярну морфологію. Результати рентгено-спектрального аналізу показали що, в місцях розташування ітрієвмісних карбідів також виявляються і карбіди титану й молібдену, що дозволяє зробити припущення, що високотемпературні карбіди YC можуть виступати підлогою для зародження на них карбідів низькотемпературних модифікацій типу MC.

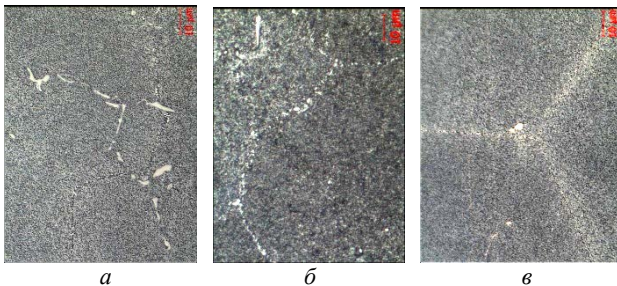


Рисунок 2. Мікроструктура зразків із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ дослідних варіантів:
 а – 0,025 % Ti (C, N); б – 0,050 % Ti (C, N);
 в – 0,075 % Ti (C, N)

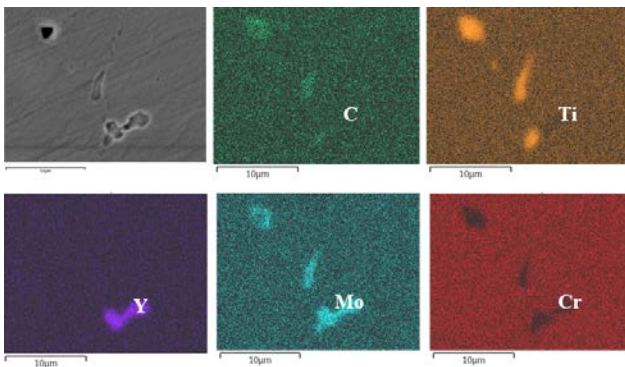


Рисунок 3. Результати рентгеноспектрального мікроналізу у типових місцях розташування карбідних фаз

Слід зазначити, що в загальному полі зору об'ємний вміст таких карбідів був значно меншим у порівнянні із частками сферичної морфології. Спостерігається тенденція до зменшення середнього розміру карбідної й карбонітридної складової в сплаві при збільшенні об'єму карбонітридів титану, котрі вводяться в розплав при модифікуванні (табл. 3). При цьому об'ємна частка цих складових (I_k) збільшується.

Таблиця 4 – Середні показники механічних властивостей та часу до високотемпературного руйнування зразків дослідних варіантів модифікування після ГПІ та термічної обробки

Стандартні підрахунки кількісних і розмірних показників інтерметалідної γ' - фази не показали суттєвої її зміни при введенні у розплав дослідного комплексу модифікаторів. Усі показники співставні між собою та знаходяться на одному рівні (табл. 3). Спостерігається деяке зниження середнього розміру γ' - фази при введенні у розплав 0,075 % Ti (C, N).

Механічними випробуваннями встановили, що усі дослідні варіанти комплексного модифікування забезпечують рівень механічних властивостей, що відповідає вимогам нормативно-технічної документації (табл. 4). При цьому вплив на пластичність матеріалу більш яскраво виражений, оскільки отримані значення відносного видовження перевищують вимоги більше ніж у два рази. Подібна тенденція спостерігається у випробуваннях на ударну в'язкість, значення котрої перевищували 50 Дж/см². Більші показники ударної в'язкості отримали при введенні у розплав 0,050 % Ti (C, N). В цьому випадку в зламах ударних зразків спостерігали в'язко-крихкий характер руйнування із наявністю в'язкої складової у зонах розташування основного γ - твердого розчину та крихких ділянок сколу у місцях залягання карбідної й карбонітридної складової (рис. 4). Слід зазначити, що злами усіх варіантів характеризувалися внутрішньозеренним руйнуванням і в загальному полі зору зламу частка крихкої складової збільшувалася при збільшенні об'ємної частки карбонітриду титану, що вводився у розплав. Металургійні дефекти в зламах ударних зразків відсутні.

Таблиця 3 – Параметри структурних складових в зразках, відлитих із комплексно модифікованого сплаву ЖСЗДК-ВІ

Варіант	MC+M(C,N)		γ' -фаза	
	$I_k \times 10^{-6}$	$d_{MC+M(C,N)}, \text{ мкм}$	$I_{\gamma'} \times 10^{-6}$	$d_{\gamma'}, \text{ мкм}$
0,025 % Ti(C,N)	498	3,16	784	0,253
0,050 % Ti(C,N)	504	2,02	754	0,243
0,075 % Ti(C,N)	530	1,50	772	0,234

Час до високотемпературного руйнування дослідних модифікованих зразків також відповідав заданим вимогам нормативної документації та суттєво їх перевищував. Зокрема, можна відмітити приблизно однакові значення цього показника в зразках отриманих з 0,025 % Ti(C, N) та 0,075 % Ti(C, N) (~ 300 год). Сприятлива морфологія помезових карбідів та рівномірний розподіл карбонітридної складової за об'ємом матеріалу, вірогідно, наряду із традиційним зміцненням інтерметалідною γ' - фазою, притаманному сплавам цього класу, слугували одним із чинників, котрий сприяв отриманню високих значень часу до руйнування (> 500 год) при комплексному модифікуванні розплаву ітрієм та 0,050 % Ti (C, N).

Варіант	Механічні властивості при T=20°C						Час до руйнування, τ_{340}^{850} , год.
	σ_b , МПа	$\sigma_{0,2}$, МПа	δ , %	ψ , %	КСУ, Дж/см ²	НВ (d, мм)	
0,025 % Ti (C, N)	1175	853	17,6	20,4	50,5	341 (3,30)	283
0,050 % Ti (C, N)	1162	867	18,8	24,5	67,5	341 (3,30)	505
0,075 % Ti (C, N)	1139	852	18,0	22,0	53,5	341 (3,30)	310,5
Норми НТД	≥ 930	-	≥ 7,0	-	≥ 29,0	-	≥ 50,0

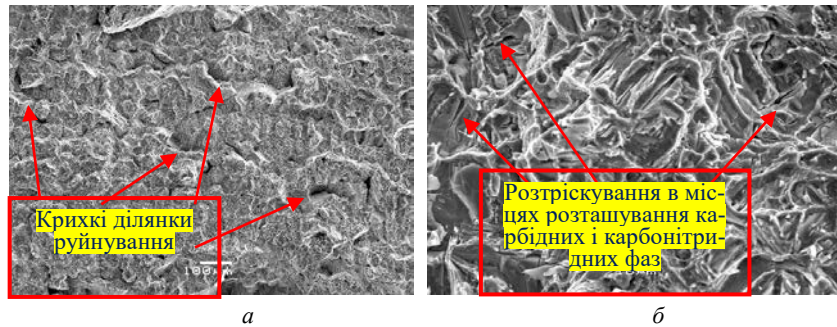


Рисунок 4. Фрактографічне зображення зламу ударних зразків, характерне для дослідних варіантів комплексного модифікування: *a* – $\times 100$; *б* – $\times 1500$

Оскільки суттєвого впливу розглянутого комплексу модифікування на кількісні і розмірні показники інтерметалідної γ' - фази не виявлено, а показники механічних властивостей при кімнатній й підвищеній температурах забезпечено на рівні, що суттєво перевищує вимоги нормативної документації на матеріал, то отримані результати підтверджують тези про здатність карбідних фаз чинити позитивний вплив на загальне зміцнення жароміцного сплаву й забезпечення високого рівня пластичності, ударної в'язкості й жароміцності сплаву.

Висновки

Проведені дослідження по комплексному модифікуванню сплаву ЖСЗДК-VI одночасно ітрієм та ультрадисперсними частинками карбонітриду титану Ti (C, N) перемінного вмісту (від 0,025 % до 0,075 %) при заливанні розплаву у керамічну форму, перший робочий шар якої виконано із застосуванням алюмінату кобальту CoAl_2O_4 , дозволили встановити результати, котрі свідчать про значне подрібнення макрозерна у дослідних виливках за рахунок інтенсивного тепловідведення й високої швидкості кристалізації при введенні у розплав часток тугоплавких сполук. Отримання нормально термообробленої структури дослідних зразків реалізовано через відповідність хімічного складу сплаву, термічної обробки, а гарячим ізостатичним пресуванням майже повністю усунуто внутрішню мікропористість. В структурі дослідного сплаву усіх варіантів спостерігаються карбіди й карбонітриди переважно сферичної морфології, а також дискретно розташовані, глобулярні карбіди YS , котрі слугують підло-

жками для формування низькотемпературних модифікацій карбідів MC . Модифікування розплаву дослідними комплексами не суттєво впливало на кількісні і розмірні показники зміцнювальної інтерметалідної γ' - фази. Механічні властивості матеріалу комплексномодифікованих зразків відповідають вимогам, що висуваються нормативною документацією до відповідального жароміцного литва. В матеріалі, після введення у модифікований ітрієм розплав 0,050 % ультрадисперсних часток карбонітриду титану Ti(C,N), забезпечено високі рівні ударної в'язкості (~ 70 Дж/см²) та часу до високотемпературного руйнування (> 500 год). Для підтвердження достатності отриманого рівня механічних властивостей слід провести технологічні випробування натурних лопаток у складі газотурбінного двигуна згідно вимог авіаційних правил.

Список літератури

1. Sims, Ch. T. Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power (2nd edition) [Текст] / Ch. T. Sims, N.S. Stoloff, W. C. Hagel. – New York: John Wiley & Sons, 1987. – 615 p.
2. Технологическое обеспечение эксплуатационных характеристик деталей ГТД. Ч. 2. Лопатки турбины [Текст] / В. А. Богуслаев, Ф.М. Муравченко, П.Д. Жеманюк и др. – Запорожье : Мотор Сич, 2003. – 420 с.
3. Zhemanyuk, P. D. Structure and properties of cast blades of aircraft engines made of heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing [Текст] / P. D. Zhemanyuk, V. V. Klochikhin, N. A. Lysenko, V. V. Naumik // Visnik dvigunobuduvannya. – 2015. – №. 1. – P. 139–146.
4. Paton, B.E. Heat resistance of casting nickel alloys

- and their protection from oxidation [Текст] / В. Е. Paton, G. B. Stroganov, S. T. Kishkin. – Kyiv: Naukova Dumka, 1987. – 256 p.
5. Development of Ni Base Superalloy for Industrial Gas Turbine [Текст] / I. Okada, T. Torigoe, K. Takahashi, D. Izutsu // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. – 2004. – P. 707–712.
6. Shahjman, P. Creep and fatigue crack growth behaviour of some cast nickel-base alloys [Текст] / P. Shahjman, K. Sadanda // Materials Science and Engineering. – 1986. – № A108. – P. 131–140.
7. Development of Ni-based Single Crystal Superalloys for Power-generation Gas-turbine Blades [Текст] / R. Hashizume, A. Yoshinari, Y. Murata, M. Morinaga // Tetsu-to-Hagane. – 2004. – № 90. – P. 518–525.
8. Microstructural Degradation of CMSX-4: Kinetics and Effect on Mechanical Properties / A. Epishin, T. Link, M. Nazmy et al. // Proceedings of the International Symposium on Superalloys. – 2008. – P. 725–731.
9. Ai, S. H. Influence of precipitate morphology on high temperature fatigue crack growth of a single crystal nickel base superalloy [Текст] / S. H. Ai, V. Lupinc, G. Onofrio // Scripta Metall. Mater. – 1993. – Vol. 29. – P. 1385–1390.
10. High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys / M. Perrut, P. Caron, M. Thomas, A. Couret // Comptes Rendus, Physique. – 2018. – № 19. – P. 657–671.
11. Репях, С. И. Технологические основы литья по выплавляемым моделям [Текст] / С. И. Репях. – Днепрпетровск : Лира, 2006. – 1056 с.
12. Комплексное влияние технологических операций на структуру и свойства жаропрочного никелевого сплава ЖСЗДК-ВИ [Текст] / П. Д. Жеманюк, В. В. Ключихин, Н. А. Лысенко, В. В. Наумик // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2013. – № 12 (63). – С. 68–73.
13. Технології одержання металів та сплавів для ливарного виробництва [Текст] : навч. пос. / за ред. акад. НАН України В. Л. Найдека. – К. : дім «Вініченко», 2016. – 223 с.
14. Srivastava, R.R Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. [Текст] / R.R. Srivastava, M-S. Kim, J-C. Lee et al. // Journal of material science. – 2014. – № 49 (14). – P. 1–7.
15. Pollock, T.M. Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties [Текст] / T.M. Pollock, S. Tin // J. Propul. Power. – 2006. – № 22(2). – P. 361–374.
16. Erickson, G. L. Polycrystalline Cast Superalloys [Текст] / G. L. Erickson. Materials Park. Ohio: ASM International, 1989. – P. 980–994.
17. Рафінування розплавів жароміцних сплавів при литті деталей ГТД в оболонкові форми, отриманні за пінополістироловими моделями [Текст] / Шинський, О. Й., Квасницька Ю. Г., Максюта І. І. та ін. // Металознавство та обробка металів. – 2020. – Т. 26, № 1. – С. 37–48.
18. Педаш, О. О. Комбіноване модифікування рафінованого жароміцного сплаву ЗМІЗУ-ВІ [Текст] / О. О. Педаш, Е. І. Цивірко // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2008. – № 2. – 13 с.
19. Гнатенко, О.В. Разработка экономно легированного жаропрочного сплава для ответственных отливок [Текст] / О.В. Гнатенко, С.В. Гайдук, В.В. Наумик. // Вісник двигунобудування. – 2012. – №. 1. – С. 206–210.
20. Mitchell, A. Melting and refining of superalloys and titanium alloys [Текст] / A. Mitchell // ISIJ International. – 1992. – Vol. 32, № 5. – P. 557–562.
21. Гречанюк, И.Н. Производство кондиционных слитков из отходов жаропрочных сплавов методом электронно-лучевой плавки [Текст] / зб. пр. XIV Міжнар. наук. конф. / И. Н. Гречанюк // Наука та освіта. – м. Хайдусобосло (Угорщина), 2020. – С. 27–30.
22. Кузнєцова, Т. Л. Особливості перспективної комплексної безвідходної технології виплавки ливарних жароміцних нікелевих сплавів [Електронний ресурс]: мат-ли 20-ї, 13-ї Ювілейної Міжнар. наук.-практ. конф. / Т. Л. Кузнєцова, М. П. Бродніковський // Литво-Металургія. – Харків, Київ (Україна), 2024. – С.140–144.
23. Reed, R. C. The Superalloys: Fundamentals and Applications [Текст] / R. C. Reed. – UK.: Cambridge University Press, 2006. – 372 p.
24. Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from nickel base superalloys for turbine engines [Текст] / I. M. Razumovskii, A. A. Tikhonov, S. F. Marinin, A. V. Logunov // Adv. Mat. Res. – 2011. – № 278. – P. 295–300.
25. Лысенко, Н. А. Влияние ГИП на структуру и свойства монокристаллических лопаток из сплава ЖС26-ВИ [Текст] / Н. А. Лысенко, В. В. Ключихин, Э. И. Цивирко // Вісник двигунобудування. – 2010. – №. 1. – P. 133–139.
26. Сергієнко, О. С. Вплив гарячого ізостатичного пресування на структуру та механічні властивості жароміцних нікелевих сплавів [Текст] / О. С. Сергієнко, Г. А. Бялік // Металл и литье Украины. – 2011. – № 2 (213). – С. 5–6.
27. Klochikhin, V. Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing [Текст]: // Mat. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition / Klochikhin V., Lysenko N., Naumyk V. // MS&T17. – Pittsburgh, Pennsylvania (USA), 2017. – P. 1370–1374.
28. Hot isostatic pressing in the manufacture of ZhS3DK-VI alloy turbine blades with 50% returns in the charge [Текст] / V. V. Klochykhin, O. O. Pedash, S. M. Danilov et al. // Strength of Materials. – 2022. – Vol. 54, № 6. – P. 1043–1049.
29. Качество отливок рабочих лопаток турбины, модифицированных наночастицами тугоплавких соединений и обработанных ГИП [Текст] / А. Я. Качан, Н. А. Лысенко, А. С. Дудников, С. А. Уланов // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 1. – С. 75–81.
30. Модифицирование жаропрочных сплавов ультрадисперсными порошками [Текст] / А.В. Богуслав,

В. В. Клочихин, Н. А. Лысенко и др. // Вестник двигателестроения. – 2008. – № 1. – С. 47–51.

31. Підвищення структурної стабільності та властивостей жароміцних нікелевих сплавів для лопаток ГТД обробкою наноматеріалами [Текст] / М. Грекова, Н. Калинина, В. Калинин та ін. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2018. – №8. – С. 60–65.

32. Structure and some properties of alloy ZHS6K with yttrium [Текст] // V.P. Valuev, M.M. Zakharov, L.A. Panyushin et al. – 1980. – Vol. 22. – P. 281–282.

33. Влияние лантана и иттрия на жаростойкость монокристаллов из жаропрочных высокорениевых никелевых сплавов [Текст] / В.В. Сидоров, Н.В. Перушин, А.В. Макеев и др. // Авиационные материалы и технологии. – 2005, №. 1. – С. 7–15.

34. Binczyk, F. Macrostructure of IN-713C superalloy after volume modification [Текст] / F. Binczyk, J. Sleziona // Archives of foundry engineering. – 2009. – Vol. 9, Iss. 2. – P. 105–108.

35. Калініна, Н.Е. Комплексное модифицирование сложнолегированных жаропрочных сплавов [Текст] / Н.Е. Калініна, А.Е. Юхименко, В.Т. Калінін // Вісник двигунобудування. – 2014. – № 2. – С. 181–185.

36. Binczyk, F. Modification of macrostructure of nickel superalloys with cobalt nanoparticles [Текст] / F. Binczyk, J. Sleziona, P. Gradoń // Kompozyty. – 2011. – Vol. 11, №1. – P. 49–54.

37. Zielińska, M. Surface modification, microstructure and mechanical properties of investment cast superalloy [Текст] / Zielińska, M., Kubiak, K., Sieniawski, J. // Journal of achievements in materials and manufacturing engineering. – 2009. – Vol. 35. – P. 55–62.

38. Комбинированное модифицирование при получении деталей турбин ГТД [Текст] / П.Д. Жеманюк, А.А. Педаш, Э.И. Цивирко, А.Ф. Педаш // Вестник двигателестроения. – 2013. – № 1. – С. 75–78.

39. Investigation on reduction of CoAl_2O_4 by hydrogen gas using TGA [Текст] / J.A. Bustnes, N.N. Viswanathan, D. Sichen et al. // Metal Mater Trans. – 2000. – Vol. B 31. – P. 540–542.

40. Педаш, А. А. Повышение теплопроводности литейной керамической формы алюминатом кобальта [Текст] / А. А. Педаш, Г. А. Бялик, Э. И. Цивирко // Авиационно-космическая техника и технология. – 2015. – № 10. – С. 40–44.

Одержано 08.11.2024
Після дробки 13.11.2024

COMPLEX MODIFICATION OF NICKEL-BASED SUPERALLOY WITH ULTRA-FINE REFRACTORY COMPOUNDS PARTICLES

Serhii Danylov	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : Dankar1378@ukr.net, ORCID: 0000-0002-8087-9638
Pedash Oleksii	Candidate of technical sciences, Department chief of JSC «Motor Sich», Zaporizhzhya, Ukraine, <i>e-mail</i> : tb.ugmet@motorsich.com, ORCID: 0000-0003-1231-9951
Valeriy Naumyk	Doctor of technical sciences, Professor, Vice-Rector for Research and International Affairs National University Zaporizhzhya Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : vnaumyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-0657-4510
Dmytro Tomkin	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : tajdv678@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4042-4452
Olena Naumyk	Postgraduate student of the Department Machinery and Technology of Foundry National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : enaumyk@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1963-1836

Purpose. Due to the complex modification of nickel-based superalloy with modifiers of different mechanisms of action, it is possible to increase the characteristics of plasticity and impact strength to a level that will allow to localize the possible destruction of large-sized blades of a low-pressure turbine of an aircraft engine during operation cycle.

Research methods. Microstructure analysis and phase content investigation was carried out with optical and scanning electronic metallography on optical and electronic microscope respectively.

Results. A study was conducted on the complex modification of the ЖСЗДК-ВІ alloy with yttrium and particles of ultradispersed titanium carbonitrides $\text{Ti}(\text{C},\text{N})$ with variable content (from 0.025 % to 0.075 %), when pouring the melt into a ceramic mould, the first working layer of which was made with cobalt aluminate CoAl_2O_4 addition. In the structure of samples of experimental variants, along with carbides of spherical morphology, globular carbides were found, in the locations of which, zones enriched in yttrium, molybdenum, and titanium, and depleted in chromium, were observed. The results allow to make an assumption that, probably, high-temperature primary carbides of the YC-type serve as substrates

for the formation of low-temperature modifications of MC carbides. In the material, after addition 0.050% ultrafine particles of titanium carbonitrides Ti(C,N) into the yttrium-modified melt, high levels of impact toughness ($\sim 70 \text{ J/cm}^2$) and rupture life ($> 500 \text{ h}$) are provided.

Scientific novelty. New data were obtained regarding the phase state of the ЖСЗДК-ВІ alloy after complex modification according to the scheme $(\text{Ti}(\text{C},\text{N})+\text{Y}+\text{CoAl}_2\text{O}_4)$. The fine structure of a nickel-based superalloy, which is traditionally used for large-sized turbine blades production of a gas turbine engine for aviation purposes, has been studied.

Practical value. The obtained results expand the possibilities of using heat-resistant ЖСЗДК-ВІ alloy for responsible castings production.

Key words: superalloy, microstructure, modification, titanium carbonitride, yttrium, cobalt aluminate, heat treatment.

References

1. Sims, Ch. T., Stoloff, N. S., Hagel W. C. (1987). *Superalloys II: High-Temperature Materials for Aerospace and Industrial Power* (2nd edition). New York: John Wiley & Sons, 615 p.
2. Boguslayev, V. A., Muravchenko, F. M., Zhemanuk, P. D., Yatzenko, V.K., Kachan, A.Ya, Tzivirko, E. I., Belikov, S. B., Orlov, M. R., Zamkovoy, V. Ye., Mozhgovoy, V. F., Rubel O. V. (2003). Tekhnologicheskoye obespecheniye ekspluatatsionnykh kharakteristik detaley GTD. Lopatki turbiny [Technological support of gas turbine engine parts performance. P. 2 «Turbine blades»], Zaporozhye: "Motor Sich", 420.
3. Zhemanuk, P. D., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Naumik V.V. (2015). Structure and properties of cast blades of aircraft engines made of heat-resistant nickel alloy ZhS26-VI after hot isostatic pressing. *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 139–146.
4. Paton, B. E., Stroganov, G. B., Kishkin, S. T., et al. (1987). Heat resistance of casting nickel alloys and their protection from oxidation. Kyiv: Naukova Dumka, 256 p.
5. Okada, I., Torigoe, T., Takahashi, K., Izutsu, D. (2004). Development of Ni Base Superalloy for Industrial Gas Turbine. *Superalloys*, 2004, 707–715.
6. Shahjman, P., Sadanda, K. (1986). Creep and fatigue crack growth behaviour of some cast nickel-base alloys. *Materials Science and Engineering*, A108, 131–140.
7. Hashizume, R., Yoshinari, A., Murata, Y., Morinaga, M. (2004). Development of Ni-based Single Crystal Superalloys for Power-generation Gas-turbine Blades. *Tetsu-to-Hagane*, 90, 518–525.
8. Epishin, A., Link, T., Nazmy, M., Staubli, M., Klinghoffer, H., Nolze, G. (2008). Microstructural Degradation of CMSX-4: Kinetics and Effect on Mechanical Properties. *Proceedings of the International Symposium on Superalloys*, 725–731.
9. Ai, S. H., Lupinc V., Onofrio G. (1993). Influence of precipitate morphology on high temperature fatigue crack growth of a single crystal nickel base superalloy. *Scripta Metall. Mater.*, 29, 1385–1390.
10. Perrut, M., Caron, P., Thomas M., Couret A. (2018). High temperature materials for aerospace applications: Ni-based superalloys and γ -TiAl alloys. *Comptes Rendus, Physique*, 19, 657–671.
11. Repiakh, S. I. (2006) Tehnologicheskie osnovy litia po vyplavlaiemym modeliam [Technological basics of investment casting], Dnepropetrovsk:Lira, 1056.
12. Zhemanuk, P. D., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Naumik, V. V. (2013). Kompleksnoie vliyaniye technologicheskikh operatziy na structure i svoistva zharoprochnogo nikelievogo splava [Complex influence of technological operations on structure and properties of ЖСЗДК-ВІ superalloy], *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 12 (63), 68–73.
13. Verkhovliuk, A.M., Narivskiy, A.V., Mogilatenko, V.G. (2016). Tehnologii oderzhannia metaliv ta splaviv dlia lyvarnogo vyrobnytstva [Technologies of obtaining metals and alloys for foundry production], Under V.L. Naydek red., Kyiv: Vynnychenko, 223 p.
14. Srivastava R.R., Kim, M-S., Lee, J-C., Jha, M.K., Kim, B-S (2014). Resource recycling of superalloys and hydrometallurgical challenges. *Journal of material science*, 49 (14), 1–7.
15. Pollock, T.M., Tin, S. (2006). Nickel-based superalloys for advanced turbine engines: chemistry, microstructure, and properties. *J. Propul. Power*, 22(2), 361–374.
16. Erickson, G. L. (1989). *Polycrystalline Cast Superalloys*, ASM International: Materials Park.Ohio, 980–994.
17. Shynskiy O. Y., Maksyuta Y. Y., Kvasnytskaia Yu. H., Mikhnian E. V., Neima A. V. (2020). Rafinuvannia rozplaviv zharomitsnykh splaviv pry lytti detalei HTD v obolonkovi formy, otrymanni za pinopolistyrolovymy modeliamy [Refining melts of heat-resistant alloys during casting of GTE details in shell forms obtained by foamed polystyrene models]. *Material science and heat-treatment of metals*, 1, 37–48.
18. Pedash, O. O., Tzivirko, E. I. (2008). Kombinovane modyfikuvannia rafinovanogo zharomitznogo splavu 3M13U-BI [Combined modification of refined heat-resistant alloy ZM13U-VI]. *Innovative materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 8–13.
19. Gnatenko, O., Gayduk, S., Naumyk, V. (2012). Razrabotka ekonomnolegirovannogo zharoprochnogo splava dlia otvetstvennykh otlivok [Development of economically alloyed heatproof alloy for the responsible casts], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 206–210.
20. Mitchell, A. (1992). Melting and refining of superalloys and titanium alloys. *ISIJ International*, 32 (5), 557–562.
21. Grechianuk, I.N. (2020) Proizvodstvo konditsionnykh slitkov iz othodov zharoprochnykh splavov metodom electronno-luchevoy plavki [Production of heat-resistant alloy waste ingots by electron beam remelting], *Proceed. Of XIV Int. conf. Science and Education*, 27–30.

22. Kuznetsova, T. L., Brodnikovskiy M. P (2024). Osoblyvosti perspektivnoyi kompleksnoyi bazvidhodnoyi tehnologii vyplavki lyvarnykh zharomitzhykh splaviv [Features of the perspective integrated wasteless technology of cast superalloys melting], Proceed. of conf. "Casting-Metallurgy", 140–144.
23. Reed, R. C. (2006). *The Superalloys: Fundamentals and Applications*, Cambridge University Press, UK, 372.
24. Razumovskii, I. M., Tikhonov, A. A., Marinin, S. F., Logunov, A. V. (2011). Hot isostatic pressing improves the quality of the blades from nickel base superalloys for turbine engines. *Adv. Mat. Res.*, 278, 295–300.
25. Lysenko, N. A., Klochikhin, V. V., Tzivirko, E. I. (2010). Vliyaniye GIP na strukturu i svoistva monokristallicheskiy lopatok iz splava ZhC26-BII [Influence of hot isostatic pressing on the structure and properties of monocrystal blades of ZhC26-BII alloy], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 133–139.
26. Serhiyenko, O. S., Byalik, G. A. (2011). Vplyv gariachogo izostatychnogo presuvannya na structure ta mechanichni vlastyvoli zharomitsnykh nikelevykh splaviv [Effect of hot isostatic pressing on structure and mechanical properties of nickel superalloys], *Metal and casting of Ukraine*, 2 (213), 5–6.
27. Klochikhin, V., Lysenko, N., Naumyk, V. (2017). Structure and properties of heat-resistant nickel alloys castings after hot isostatic pressing, *Mat. Sci. and Techn. Conf. and Exhibition*, 2, 1370–1374.
28. Klochykhin, V. V., Pedash, O. O., Danilov, S. M., Tyomkin, D. O., Naumyk, O. O., Naumyk V. V. (2022). Hot isostatic pressing in the manufacture of ZhS3DK-VI alloy turbine blades with 50 % returns in the charge. *Strength of Materials*, 54(6), 1043–1049.
29. Kachan, A.Ya., Lysenko, N. A., Dudnikov, A. S., Ulanov S. A. (2014). Kachestvo otlivok rabochikh lopatok turbiny, modifitirovannykh nanochastitami tugoplavkikh sojedineniy i obrabotannykh GIP [Quality of cast turbine blades, modified with the nanoparticles of refractory compounds and treated by HIP], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 75–81.
30. Boguslaiev, A. V., Klochikhin, V. V., Lysenko, N. A., Dubrov, G. L., Tyomkin D. O. (2008). Modifitirovaniye zharoprochnykh splavov ultradispersnyimi poroshkami [Modification of superalloys with nanosized powders], *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 47–51.
31. Grekova, M. V., Kalinina, N. E., Kalinin, T. V., Guchenkov, M. V., Djur, Y. O., Dudnikov A. S. (2018). Pdivshennia strukturnoy stabilnosti ta vlastyvoli zharomitznykh nikelevykh splaviv dlia lopatok GTD obrobkoyu nanomaterialamy [Increase of structural stability and properties of heat-resistant nickel alloys for GTE shooters by nanomaterial treatment] *Aerospace technic and technology*, 8, 2018, 60–65.
32. Valuev, V. P., Zakharov, M. M., Panyushin, L. A., Tsai S. A. (1980). Structure and some properties of alloy ZHS6K with yttrium. *Heat-Resistant Steels and Alloys*, 22, 281–282.
33. Sidorov, V.V., Petrushin, N.V., Makeev, A.V., Tchabina, Ye. B., Kalmykova, N.A. (2005). Vliyaniye lantana i itriya na zharostoykost' monokristalov iz zharoprochnykh vysokoreniyevykh nikelevykh splavov [Influence of lanthanum and yttrium on heat resistance of single-crystals made from high-rhenium nickel superalloys.]. *Aviation materials and technologies*, 1, 7–15.
34. Binczyk, F., Sleziona J. (2009). Macrostructure of IN-713C superalloy after volume modification, *Archives of foundry engineering*, 9(2), 105–108.
35. Kalinina, N.E., Yukhymenko, A.E., Kalinin, V.O. (2014). Kompleksnoye modifitirovaniye slozhnolegirovannykh zharoprochnykh splavov [An integrated modification of difficult doped heat resistance of alloys], *Herald of aeroenginebuilding*, 2, 2014, 181–185.
36. Binczyk, F., Sleziona, J., Gradoń P. (2011) Modification of macrostructure of nickel superalloys with cobalt nanoparticles. *Kompozyty*, 11–1, 49–54.
37. Zielińska, M., Kubiak, K., Sieniawski, J. (2009). Surface modification, microstructure and mechanical properties of investment cast superalloy. *Journal of achievements in materials and manufacturing engineering*, 35, 55–62.
38. Zhemanyuk, P. D., Pedash, A.A., Tzivirko, E.I., Pedash, A.F. (2013). Kombinirovannoye modifitirovaniye pri poluchenii detaley turbin GTD [Combined inoculation in production of GTE turbine parts] *Herald of aeroenginebuilding*, 1, 2013, 75–78.
39. Bustnes, J.A., Viswanathan, N.N., Sichen, D. et al. (2000). Investigation on reduction of CoAl₂O₄ by hydrogen gas using TGA. *Metal Mater Trans.*, B 31, 540–542. 40.
40. Pedash, A., Byalik, G., Tzivirko, E. (2015). Povysheniye teploprovodnosti liteynoy keramicheskoy formy aluminatom kobalta [Increasing of the ceramic casting mould thermal conductivity with cobalt aluminate], *Aerospace technic and technology*, 10, 2015, 40–44.

КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 621.796.76/.79:669.14

- Валерій Міщенко д-р техн. наук, професор, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: mishchen4@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-0992-478X
- Сергій Беліков д-р техн. наук, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: belikov@zpu.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Евеліна Бажміна д-р філософії, доцент, доцентка кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: evelinabazhmina@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-4750-8170
- Володимир Корнієнко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: vkornienko268@gmail.com*, ORCID: 0009-0007-2193-3204
- Дмитро Міщенко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: dymis@ukr.net*
- Андрій Харченко аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: harchenko21@gmail.com*

ОСОБЛИВОСТІ ЕЛЕКТРОКОНТАКТНОГО ЗВАРЮВАННЯ СПЕЦІАЛЬНИХ СТАЛЕЙ РІЗНОЇ ТОВЩИНИ

Мета роботи. Оцінка можливостей електроконтактного зварювання листових корозійностійких сталей різного фазового складу та товщини.

Методи дослідження. З метою визначення особливостей електроконтактного зварювання листових корозійностійких сталей різних структурних класів проведено порівняльний аналіз режимів точкового та роликового зварювання аналізованих сталей з урахуванням їхньої товщини та комбінації марок у зварному з'єднанні, а також наявного зварювального обладнання. Тому в цих дослідженнях застосували експериментальні способи добірок параметрів режимів зварювання, основними з яких був зварювальний струм $T_{зв}$, зусилля стиснення електродів $F_{зв}$ і тривалість імпульсу зварювального струму $\tau_{зв}$. Визначення міцності зварювальних швів визначали стандартними методами.

Отримані результати. Обґрунтовано вибір режимів зварювання корозійностійких сталей різного фазового складу з урахуванням їхньої товщини та комбінації марок. Досліджені сталі мартенситоферитного класу 06X18ч, 08X18ч та феритного класу 03X18ТБчГР, 05X18ТФч, 08X18Т1 придатні до електроконтактного зварювання без обмежень.

Наукова новизна. Встановлені режими електроконтактного зварювання та товщини листових корозійностійких сталей різного фазового складу на структуру та механічні властивості зварних швів однорідних і різнорідних марок сталей.

Практична цінність. Показано, що структура і механічні властивості зварних швів як однорідних, так і різнорідних хімічних складів спеціальних сталей відповідають вимогам їхнього застосування для різного функціонального призначення.

Ключові слова: зварні з'єднання, феритна структура, мартенситоферитна структура, технологічні та механічні властивості, корозійностійкі сталі.

Вступ

Для поширеного застосування виконані порівняльні дослідження зварюваності методами електроконтактного зварювання спеціальних сталей. Дослідження зварюваності листових сталей 08X18H10T, 08X18T1, 06X18ч, 09Г2 і 05X18ТФч електроконтактним зварюванням проводили у зв'язку з передбачуваним їхнім застосуванням для виготовлення захисного кожуха цистерн, корпусів автомобілів, планерів літальних апаратів, деталей реакторів магністермічного відновлення титану тощо [1–4].

Сталь 06X18ч розроблена та призначена для виробництва деталей, які виготовляють методом глибокої витягування з подальшим поліруванням. Для ширшого її використання, наприклад, ободи колеса, велосипеда «Школяр», проведено оцінку її зварюваності електроконтактними методами.

Аналіз досліджень та публікацій

Сучасний розвиток розробки та застосування нових корозійностійких сталей різного фазового складу і функціонального призначення в Україні та за кордоном висувають найвищі вимоги до їхніх механічних та технологічних властивостей. Основою технологічної властивості для виготовлення складних виробів (корпусів автомобілів, планерів літальних апаратів, деталей реакторів магністермічного відновлення титану тощо) є зварюваність [5-7].

Залежно від ступеня легування та умов використання економнолеговані корозійностійкі сталі поділяють на хромисті, хромонікелеві, хромомарганцево-нікелеві та хромомарганцеві [8-10]. Деякі із цих сталей є обмежено зварюваними або важко зварюваними, що потребує застосування додаткового використання обладнання та технологічних способів зварювання. Поширене застосування хромистих сталей в Україні пов'язане не тільки з економічними аспектами, а й із відсутністю запасів нікелю та обмеженими запасами хрому, молибдену [11, 12].

Увага зарубіжних дослідників спрямована на розробці нових економнолегованих корозійностійких сталей з підвищеними технологічними властивостями, основними з яких є зварюваність штампування (пластичність) [7, 13].

Мета роботи

Метою роботи є дослідження та розробка режимів електроконтактного зварювання та їхнього впливу на структурний стан і механічні властивості зварних швів. Важливою характеристикою є також показники механічних властивостей зварних з'єднань при температурах від 20 °С до -60 °С. Розроблені режими електроконтактного зварювання дозволили отримати необхідний структурний стан двофазних мартенситоферитних сталей та задовільні показники механічних властивостей, як в однорідних, так і в різнорідних сталях за фазовим складом.

Матеріал і методика досліджень

Для дослідження впливу режимів електроконтактного зварювання та механічних властивостей зварних з'єднань вибирали наступні сталі різного фазового складу (табл. 1).

Для визначення впливу режимів електроконтактного зварювання на якість зварних швів застосовували машини типу МТ-2510. При роликковому зварюванні висували вимоги до режимів переважно такі ж, як і при точковому.

Результати досліджень

Наведені дані в табл. 1 показують, що розроблені листові сталі мають приблизно однакові і досить високі показники пластичності в стані поставки.

Таблиця 1 – Механічні властивості досліджуваних марок сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина листа, мм	Механічні властивості		
			σ_B , МПа	δ_5 , %	Твердість, НВ
1	08X18ч	0,8; 1,0; 2,0	>550	>35	72–81
2	06X18ч	0,8; 1,0; 2,0	>550	>35	68–78
3	03X18ТБчГР	1,0; 1,5	>550	>35	–
4	05X18ТФч	0,8; 1,0	>530	>40	74–77
5	08X18T1	0,8; 1,0; 2,0	550	>30	–

Холоднокатаний прокат отримують згідно з ТУ 14-944-74 для сталі 08X18T1 і ТУ 14-1-3440-90 або ГОСТ 27702-88 для сталей 06X18ч і 08X18ч, де розглянута технологія їхнього металургійного переділу. Розмір зерна фериту значною мірою залежить від попередньої пластичної деформації. Якщо у листі, товщиною 1.0 мм - 8, 9 бал зерна існує при ступені деформації до $\epsilon=70\%$, то у листі товщиною 2,0 мм, величина зерна становить 5, 6 бал при $\epsilon=50\%$. Це позначається на відносному подовженні як основного металу, так і зварних з'єднань, виконаних роликковим зварюванням.

Режим точкового зварювання аналізованих сталей вибирався з урахуванням товщини і комбінації марок сталей у зварному з'єднанні, а також наявного зварювального обладнання. У літературі [14, 15] відсутні певні параметри точкового та роликкового зварювання для класу сталей, які рекомендуються. Тому в цих дослідженнях застосовували експериментальні способи добірок параметрів режиму зварювання, основними з яких є зварювальний струм T_{36} , зусилля стиснення електродів F_{36} і тривалість імпульсу зварювального струму τ_{36} .

Крім зазначених параметрів, тепловиділення при зварюванні визначається величиною контактної опору R_k , який багато в чому залежить від стану поверхні матеріалу, що зварюється.

Підготовка поверхні зварюваних зразків полягала в їхній зачистці на абразивних колах з подальшим промиванням у воді для сталі 09Г2. Корозійностійкі сталі 06Х18ч, 03Х18ТБчГР, 05Х18ФТч, 08Х18Т1 і 12Х18Н10Т у зв'язку з незначним електроопором окисної пасивованої плівки мають контактний опір близький до зачищених зразків від забруднень.

Найбільший вплив на режим зварювання мають електропровідність, теплопровідність і жароміцність, які визначають здатність металу до пластичної деформації в нагрітому стані під дією зусилля стиснення електродів.

У таблиці 2 наведені отримані експериментальним шляхом на машині МТ 2510 режими точкового зварювання сталей, що розглядаються.

Зварювання зразків рівної товщини корозійнозривких марок сталей проходило без будь-яких видимих ускладнень. Однак, при зварюванні різнорідних матеріалів як однакової, так і особливо різної товщини, виникали деякі труднощі. Це пов'язано з тим, що при зварюванні металів різної товщини рекомендується використовувати інший тип машини, які пристосовані для цієї мети та обладнані рядом спеціальних пристроїв, наприклад, комплектуються синхронними переривниками ППШ, що допускають отримання імпульсів типу $\tau_{36} \leq 0.01$ хв та іншими пристроями. Однак і на наявному устаткуванні вдалося досягти задовільних результатів за рахунок застосування з боку більш товстого зразка електродів (роликів) з плоскою (циліндричною) робочою поверхнею для запобігання утворенню вм'ятин або перегріву на поверхні з'єднання. З боку тонкого зразка кращі результати виходили при застосуванні електродів та роликів зі сферичною поверхнею, так як електроди з плоскою поверхнею давали глибокі вм'ятини на поверхні зразків. Радіус сфери електродів становив 35...40 мм, а роликів 40...45 мм при товщині тонкого листа 10 мм. Особливо великі ускладнення виникали при зварюванні різнорідних металів різної товщини (08Х18Т1+09Г2), що пов'язано з відмінністю їхнього хімічного складу та фізичних властивостей – електропровідністю, температурою плавлення, схильністю до утворення крихких загартованих структур.

Саме при зварюванні хромистих корозійнозривких сталей з низьколегованими та виникають найбільші ускладнення. У цьому випадку літа зона більшою мірою захоплює зразок з меншою теплоелектропровідністю, тобто в даному випадку (08Х18Т1+09Г2) проплавлення сталі 08Х18Т1 більше, ніж сталі 09Г2.

При точковому зварюванні зразків нерівної товщини з боку тонкого зразка (08Х18Т1) встановлювали електрод з дещо меншою робочою поверхнею, ніж у разі зварювання таких же зразків рівної товщини. Так при зварюванні сталей 05Х18ФТч, 08Х18Т1 при товщині зразків, відповідно, 1.0 мм і 0.8 мм використовували електроди з радіусом сфери $R_{ел}=75$ мм. Зварювання зразків сталей 08Х18Т1 (1.0 мм) та 09Г2 (2.0 мм) виконували електродами з $R_{ел}=50$ мм з боку сталі 08Х18Т1 та 100...120 мм з боку сталі 09Г2

(2.0 мм). При роликовому зварюванні вимоги до режимів переважно такі ж, як і при точковому.

Таблиця 2 – Режимы точкового зварювання досліджуваних марок сталей

Марка сталі	Товщина зразка, мм	Зусилля стиснення електродів, $F_{зв}$, Н	Зварювальний струм, $I_{зв}$, кА	Тривалість протікання струму, $\tau_{зв}$	Діаметр електрода, мм	Опір зварної точки на зріз, Н
12Х18Н10Т + 08Х18Т1	2+2	8000	11.6	0.3	10	18000
08Х18Т1 + 08Х18Т1	2+2	8000	11.6	0.3	10	16390
08Х18Т1 + 09Г2	2+2	9000	12.8	0.24	10	15000
08Х18Т1 + 09Г2	1+2	8000	9.2	0.22	10	7500
08Х18Т1 + 08Х18Т1	1+1	7000	6.5	0.18	10	6300
05Х18ФТч + 05Х18ФТч	0.8+0.8	6000	6.8	0.18	7	3150
05Х18ФТч + 05Х18ФТч	1+1	7000	6.5	0.18	10	6800
03Х18ТБч + 03Х18ТБч	0.8+0.8	6000	5.8	0.18	7.5	4600

У зв'язку з резервом металу в зоні зварювання до більшої температури, ніж при точковому зварюванні, при роликовому зварюванні застосовувалися дещо менші τ_{36} і $F_{зв}$. Внаслідок шунтування струму в сусідній точці при роликовому зварюванні $I_{зв}$ вийшов на 30...50% вище, ніж при точковому. Отримані оптимальні експериментальні режими роликового зварювання (табл. 3).

Дослідження структури зварних з'єднань показало, що рекомендовані режими зварювання забезпечують якісне проплавлення зварюваних зразків, симетричне розташування литої зони у разі однакової товщини листів і глибше її залягання у зразку більшої товщини при зварюванні сталевих різнотовщин.

Зварні з'єднання зразків сталей 08Х18Т1, 03Х18ТБч і 05Х18ФТч однакової товщини також мають задовільну мікроструктуру (рис. 1а, б, в). Найдрібніше зерно в ядрі має сталь 05Х18ФТч (рис. 1в).

Розмір зерна у зоні термічного впливу зберігається майже незмінним. До неї примикає зона ядра, а в центрі знаходяться порівняно дрібні рівноосні дендрити. У навколошовній зоні дещо збільшений розмір зерна та сліди мартенситу (рис. 1г, д). При збільшенні товщини зварюваних зразків до 2.0 мм осі дендритів більш грубі і легкощавлені, що пов'язано з більшою масою розплаву і у зв'язку з цим меншою інтенсивністю охолодження.

Таблиця 3 – Оптимальні режими роликового зварювання досліджуваних марок корозійностійких сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина зразків, мм	Ширина робочої поверхні роликів, мм	Зварювальний струм, $I_{зв}$, кА	Тривалість прогрівання струму, $t_{зв}$, хв	Тривалість паузи, $t_{п}$, хв	Зусилля стиснення роликів, $F_{зв}$, Н	Швидкість зварювання, м/хв
1	12X18H10T + 08X18T1	2+2	8	13,6	0,14	0,14	7000	0,5
2	08X18T1 + 08X18T1	2+2	8	13,4	0,14	0,14	7000	0,5
3	08X18T1 + 08X18T1	1+1	5	10,5	0,10	0,16	4005	0,8
4	05X18ФТч + 05X18ФТч	1+1	5	10,5	0,10	0,16	4000	0,8
5	08X18T1 + 09Г2	2+2	8	11,2	0,14	0,16	6000	0,5
6	08X18T1 + 09Г2	1+2	$f_1=5$ $f_2=8$	10,8	0,10	0,10	4000	0,8
7	03X18ТБч + 03X18ТБч	1+1	5,5	11,0	0,10	0,10	3700	0,8
8	06X18ч + 06X18ч	1+1	5	10,8	0,10	0,10	4000	0,8

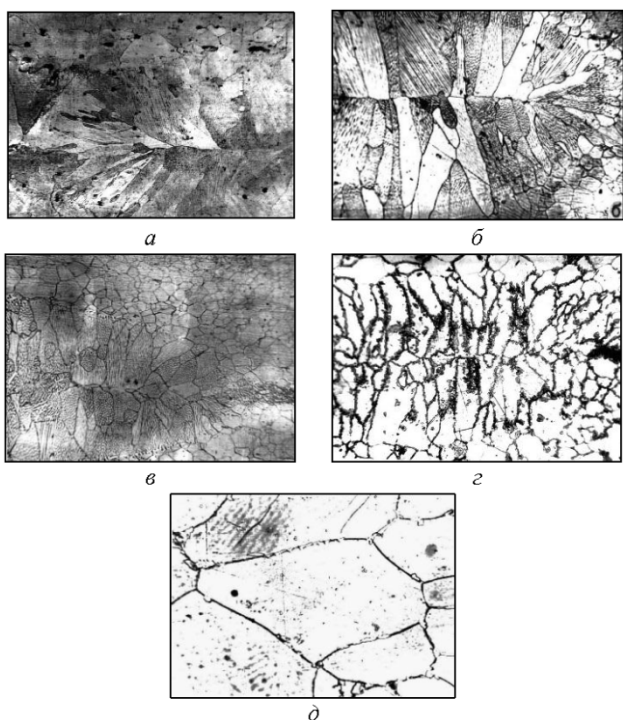


Рисунок 1. Мікроструктура зварних з'єднань хромистих корозійностійких сталей, $\times 200$:
 а – сталь 08X18T1; б – сталь 03X18ТБч;
 в – сталь 05X18ФТч; г – сталь 06X18ч;
 д – навколошовна зона сталі 06X18ч

Дослідження холодостійкості проводили шляхом серійних випробувань на ударний згин зразків з надрізом, отриманих з листа сталей 09Г2, 05X18ФТч та 08X18T1 товщиною 2.0 мм при температурах від 20 °С до -60 °С. Випробовували також зварні зразки. З отриманих даних видно, що на сталі 05X18ФТч ударна в'язкість трохи вище, ніж сталі 08X18T1 і монотонно зменшується при зниженні температури випробування від 20 °С до -60 °С. Різкого переходу в крихкий стан не виявлено (рис. 2). Тому основний метал і його зварні з'єднання можуть використовуватися і при низьких температурах до -60° С, так як ударна в'язкість при цьому досягає 0.92 МДж/м². Мікроструктура зварних точок 08X18T1 та 09Г2 дещо менш досконала. У центрі литого ядра навіть на оптимальних режимах зварювання є рихлоти у вигляді темних зигзагоподібних ліній, які при зварюванні сталей такого класу є допустимим явищем.

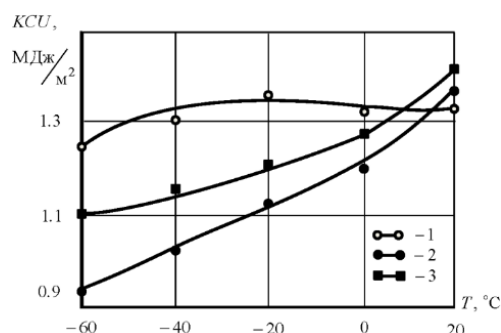


Рисунок 2. Залежність ударної в'язкості від температури випробувань ударних зразків досліджуваних сталей:
 1 – 09Г2, 2 – 08X18T1, 3 – 05X18ФТч

Зварне з'єднання зразків сталі 06X18ч рівної товщини має гарну будову (рис. 1з). Однак стовпчасті зерна фериту в зоні литого ядра більші, ніж у сталі 05X18ФТч. За межами стовпчастих зерен спостерігали мартенситну складову до 5 %. Це пояснює більш крихкий характер руйнування зварної точки у сталі 06X18ч порівняно зі зразками сталі 05X18ФТ1 при випробуваннях на розрив (рис. 3).

З отриманих даних видно, що опір зварних точок на зріз, який проведено на розривних зразках за ГОСТ 6996-66, є досить високим. Водночас у з'єднаннях, отриманих на зразках більшої товщини, у зв'язку з великим прославленням опір зрізу більше, ніж у більш тонких зразках. Незважаючи на наявність до 5 % кількості мартенситної складової зварної точки, опір на зріз залишається досить високим (див. табл. 2).

Наведені у табл. 3 режими роликового зварювання розглянутих сталей забезпечують високу міцність і надійність зварних виробів. Встановлено, що при зварюванні сталі 08X18T1 з 09Г2 відбувається загартування ядра зварного з'єднання, що дещо знижує його міцність. У ряді випадків (при виготовленні труб) до зварних з'єднань висувуються високі вимоги щодо пластичності зварних з'єднань. З цією метою

були виготовлені розривні зразки за ГОСТ 6996-66, товщиною 0.8 мм, зі зварним швом, розташованим у напрямку застосування навантаження. При цьому досліджували також вплив зварювання на міцність та пластичність зварних швів зі сталей 08X18T1, 06X18ч, 05X18ФТч та 03X18ТБч (табл. 4).

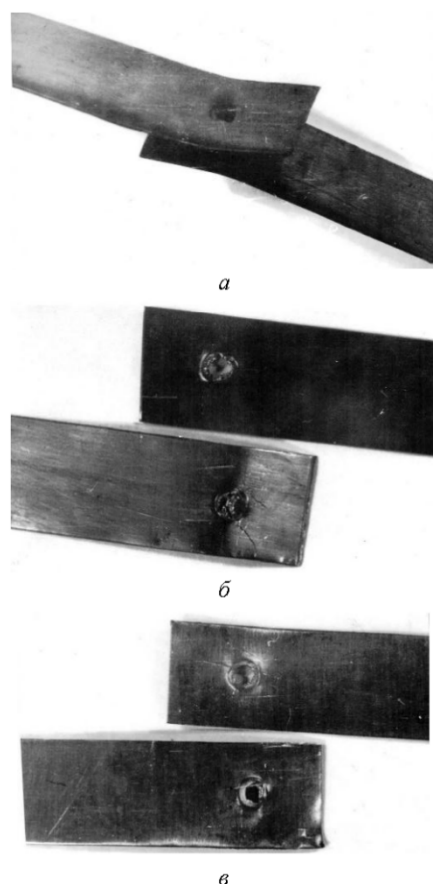


Рисунок 3. Розривні зразки корозійностійких сталей після випробувань:
 а, б – сталь 05X18ФТч; в – сталь 06X18ч

Таблиця 4 – Порівняльні показники міцності та пластичності зварних з'єднань корозійностійких сталей

№ п/п	Марка сталі	Товщина заготовок, мм	Зусилля відриву, Р, Н	Відносне подовження, δ_s , %	Тип руйнації
1	08X18T1	1.0	17500	16	в'язко-крихка
2	08X18ч	1.0	16100	6.8	крихка
3	06X18ч	1.0	17500	12	крихка
4	05X18ФТч	1.0	18100	24	в'язка
5	03X18ТБч	1.0	17300	19	в'язка

Після шовного зварювання виявлено значну перевагу сталі 05X18ФТч перед рештою. Пластичність зварних з'єднань сталі, яка легована Ti, V, PЗМ у 1.5

рази більша, ніж сталі 08X18T1 та в 2 рази більша, ніж у сталі 06X18ч, структура якої містить значну кількість (до 5 %) мартенситної складової.

У цілому, проведеними дослідженнями показано, що зварні з'єднання із сталі 05X18ФТч перевищують за міцністю і пластичності аналогічні показники зварних з'єднань інших сталей. Незважаючи на це, всі досліджувані сталі можливо використовувати для виготовлення зварних конструкцій та виробів, крім сталей з дуплексною структурою 06X18ч та 08X18ч, яким, як правило, бажана термообробка зварних швів.

Висновки

Зварні з'єднання за структурним станом та механічними властивостями як однорідних, так і різнорідних хімічних складів досліджуваних сталей відповідають вимогам, які висуваються до зварних з'єднань спеціальних сталей різного функціонального призначення.

Список літератури

- Mishchenko V. Metallurgical aspects of the production of chromium-nickel steels with low carbon contents [Text] / V. Mishchenko // Foundry Journal of Polish Foundrymen's Technicsl Association. – 2003. – No 3. – P. 326–329.
- Desu R.K. Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures [Text] / R.K. Desu, N.H. Krishnamuthy, A. Balu, A.K. Gupta, S.K. Singh // Materials Research and Technology. – 2016. – No S(1). – P. 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.04.001>
- Wärner H. Thermomechanical fatigue behaviour of aged heat resistant austenitic alloys [Text] / H. Wärner, M. Calmunger, G. Chai, S. Johansson, J. Moverare // Fatigue. – 2019. No 127. – P. 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.012>
- Drápala J. Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of SUS 316L alloy (Conference Paper) [Text] / J. Drápala, G. Kostiuková, M. Losertoá // METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings. – 2018. – P. 1527-1532.
- Fuwa A. Producing titanium by reducing TiCl₂ – MgCl₂ mixed salt with magnesium in the molten state [Текст] / Akio Fuwa, Satoru Takaya // JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society. – 2005. – Vol. 57. – No 10. – P. 56–60. doi.org/10.1007/s11837-005-0153-7
- Пат. 100650 Україна. МПК С 22 С 38/02. Жароміцна корозійностійка сталь / В. Г. Міщенко, Н. О. Євсєєва, О. П. Лютий [та ін.] – № 100650; заявл. 17.02.12; опубл. 10.01.13, Бюл. № 1. – 4 с.
- Stainless steel grades [Електронний ресурс] // Outokumpu products. – Режим доступу: <https://www.outokumpu.com/products>
- Нестеренко С. Корозійна тривкість нових аустенітно-феритних сталей в агресивних середовищах коксохімічних заводів [Text] / С. Нестеренко // XV

Міжнародна конференція «Проблеми корозії та проти-корозійного захисту конструкційних матеріалів». Львів. – 2020. – С. 337–341.

9. Шелягін В.Д. Розробка дистанційно керованого обладнання та технології лазерного зварювання для ремонту і відновлення працездатності парогенераторів АЕС [Text] / В.Д. Шелягін, А.В. Бернацький, О.В. Сіора, В.А. Курило, О.М. Сучек // Автоматичне зварювання. – 2020. – № 12. – С. 30–36. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.04>

10. Isabela A. Ligabo. Microstructure and Corrosion Behavior of AISI 316 Steel Layers Deposited on AISI 347 Steel Substrate by Laser Metal Deposition [Text] / A. Ligabo Isabela, Braga Vagner, C. A. Ferreira Caroline, H. M. Siqueira Rafael, C. Lourenço Julio, J. Abdalla Antonio and S. F. Lima Milton // Metals. – 2022. – No 12(12). – 2161. <https://doi.org/10.3390/met12122161>

11. Mishchenko V. Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life [Text] / V. Mishchenko, S. Loskutov, A. Kripak // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2022. – No 5 (7-119). – P. 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265577>

12. Міщенко В. Г. Створення спеціального конструкційного матеріалу методом прокатування асимет-

ричних пакетів для виробів подвійного призначення [Text] / В. Г. Міщенко, С. Б. Беліков, О. В. Клімов, А. О. Кріпак, Д. М. Тонконог, В. В. Корнієнко, А. О. Харченко // New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering. – 2023. – № 2. – С. 32–37. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-5

13. Dhivyasri G. Optimization of AISI 316 materials mechanical properties for CMT application [Text] / G. Dhivyasri, R. Sudha // Mechanical Engineering and Technology. – 2018. – No 9(11). – P. 1269–1279.

14. Roussel M. Influence of solidification induced composition gradients on carbide precipitation in FeNiCr heat resistant steels [Text] / M. Roussel, X. Sauvage, M. Perez, D. Magné, A. Huet, A. Steckmeyer, M. Vermont, T. Chaise, M. Couvrat // Materialia. – 2018. – No 4, P. 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.10.010>

15. David A. Collins. A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels [Text] / A. Collins David, L. Carter Emily, G. Lach Timothy, Sang Byun Thak // Nuclear Engineering and Technology. – 2022. – No 54, Is. 2. – P. 709–731. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.022>

Одержано 26.12.2024

INVESTIGATION OF ELECTRIC RESISTANCE WELDING OF SPECIAL STEELS OF DIFFERENT THICKNESSES

Valeriy Mishchenko	Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: mishchen4@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0003-0992-478X
Sergiy Byelikov	Dr. Sc., Professor of the Department of Transport Technologies, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: belikov@zp.edu.ua</i> , ORCID: 0000-0002-9510-8190
Evelina Bazhmina	Ph.D, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Integrated Welding Technologies and Structural Modeling, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: evelinabazhmina@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0003-4750-8170
Volodymyr Kornienko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: vkornienko268@gmail.com</i> , ORCID: 0009-0007-2193-3204
Dmytro Mishchenko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: dvmis@ukr.net</i>
Andriy Kharchenko	Postgraduate student, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: harchenko21@gmail.com</i>

Purpose. To evaluate the feasibility of electric resistance welding for corrosion-resistant steels with different phase compositions and thicknesses.

Research methods. To investigate the characteristics of electric resistance welding for corrosion-resistant sheet steels with different structural classes, a comparative analysis of spot and roller welding methods was conducted. The analysis considered factors such as steel thickness, the combination of steel grades in the welded joint, and the available welding equipment. Experimental methods were employed to determine optimal welding parameters, including welding current (T_w), electrode compression force (F_w), and welding current pulse duration (τ_w). The strength of the welds was assessed using standard testing methods.

Results. The study substantiates the selection of welding parameters for corrosion-resistant steels with different phase compositions, considering steel thickness and grade combinations. The steels studied – martensitic-ferritic class (06X18Ч, 08X18Ч) and ferritic class (03X18ТБЧГР, 05X18ТФЧ, 08X18Т1) – are suitable for electric resistance welding without significant restrictions.

Scientific novelty. This study identifies the effects of welding parameters and the thicknesses of corrosion-resistant steel sheets with different phase compositions on the structure and mechanical properties of welds, both for homogeneous and dissimilar steel grades.

Practical value. The findings demonstrate that the structure and mechanical properties of welds made from both homogeneous and heterogeneous steel compositions meet the functional requirements for various applications.

Key words: welded joints, ferrite structure, martensitic-ferritic structure, technological and mechanical properties, corrosion-resistant steels.

References

1. Mishchenko V. (2003). Metallurgical aspects of the production of chromium-nickel steels with low carbon contents. Foundry Journal of Polish Foundrymen's Technicl Association, 3, 326–329.
2. Desu R.K., Krishnamuthy N.H., Balu A., Gupta A.K., Singh S.K. (2016). Mechanical properties of Austenitic Stainless Steel 304L and 316L at elevated temperatures. Materials Research and Technology, S(1), 13–20. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2015.04.001>
3. Wärner H., Calmunger M., Chai G., Johansson S., Moverare J. (2019). Thermomechanical fatigue behaviour of aged heat resistant austenitic alloys. Fatigue, 127, 509–521. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2019.06.012>
4. Drápala J., Kostiuková G., Losertoá M. (2018). Influence of heat treatment on microstructure and mechanical properties of SUS 316L alloy (Conference Paper). METAL 2018 – 27th International Conference on Metallurgy and Materials, Conference Proceedings, 1527–1532.
5. Akio Fuwa, Satoru Takaya (2005). Producing titanium by reducing TiCl₂ – MgCl₂ mixed salt with magnesium in the molten state. JOM Journal of the Minerals, Metals and Materials Society, 57, 10, 56–60.
6. Patent 100650 Ukraine. MPK S 22 S 38/02. Zharomitsna koroziiostiika stal [Zharomitsynaya corrosion-resistant steel] / V.H. Mishchenko, N.O. Yevsieieva, O.P. Liutyi [et al.] – № 100650; zaiavl. 17.02.12; opubl. 10.01.13, 1, 4.
7. Stainless steel grades. – Available at: <https://www.outokumpu.com/products>
8. Nesterenko S. (2020). Koroziiina tryvkist novykh austenitno-ferynykh stalei v ahresyvykh seredovyshchakh koksokhimichnykh zavodiv. XV Mizhnarodna konferentsiia «Problemy korozii ta protykoroziiinoho zakhystu konstruktsiinykh materialiv». Lviv, 337–341.
9. Sheliakhin V.D., Bernatskyi A.V., Siora O.V., Kurylo V.A., Suchek O.M. (2020). Rozrobka dystantsiino kerovanoho obladnannia ta tekhnolo-hii lazernoho zvariuvannia dlia remontu i vidnovlennia pratsezdatnosti parohene-ratoriv AES. Avtomatychnе zvariuvannia, 12, 30–36. <https://doi.org/10.37434/as2020.12.04>
10. Isabela A. Ligabo, Vagner Braga, Caroline C. A. Ferreira, Rafael H. M. Siqueira, Julio C. Lourenço, Antonio J. Abdalla and Milton S. F. Lima (2022). Microstructure and Corrosion Behavior of AISI 316 Steel Layers Deposited on AISI 347 Steel Substrate by Laser Metal Deposition. Metals, 12(12), 2161. <https://doi.org/10.3390/met12122161>
11. Mishchenko V., Loskutov S., Kripak A. (2022). Determining the thermoplastic deformation mechanism of titanium reduction reactors and recommendations to increase the reactor service life. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 5 (7-119), 14–20. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.265577>
12. Mishchenko V. G., Bielikov S. B., Klimov O. V., Kripak A. O., Tonko-noh D. M., Korniienko V. V., Kharchenko A. O. (2023). Stvorennia spetsialnogo konstruktsiinoho materialu meto-dom prokatuvannia asymetrychnykh paketiv dlia vyrobiv podviinoho pryznachennia. New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 32–37. DOI: 10.15588/1607-6885-2023-2-5
13. Dhivyasri G., Sudha R. (2018). Optimization of AISI 316 materials mechanical properties for CMT application. Mechanical Engineering and Technology, 9(11), 1269–1279.
14. Roussel M., Sauvage X., Perez M., Magné D., Hauet A., Steckmeyer A., Vermont M., Chaise T., Couvrat M. (2018). Influence of solidification induced composition gradients on carbide precipitation in FeNiCr heat resistant steels. Materialia, 4, 331–339. <https://doi.org/10.1016/j.mtla.2018.10.010>
15. David A. Collins., Emily L. Carter, Timothy G. Lach, Thak Sang Byun (2022). A comprehensive study of the effects of long-term thermal aging on the fracture resistance of cast austenitic stainless steels. Nuclear Engineering and Technology, 54(2), 709–731. <https://doi.org/10.1016/j.net.2021.08.022>

ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 620.1-419:629.73.002

- Сергій Беліков д-р техн. наук, професор, професор кафедри транспортних технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: belikov@zpu.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Валерій Вініченко канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Олександр Коробко старший викладач кафедри охорони праці і навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: sany.kor.17@gmail.com*, ORCID: 0000-0001-9461-7762
- Вадим Шаломєєв д-р техн. наук, професор, проректор з наукової роботи Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: shalomeev@zntu.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-6091-837X
- Дмитро Пархісенко аспірант НУ «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: aviardi@gmail.com* ORCID: 0009-0004-2100-8201
- Анатолій Єршов д-р техн. наук, професор, професор кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: eav.nuzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896

СТАН ПИТАННЯ ЩОДО МОЖЛИВОСТІ ПІДВИЩЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ВИСОКОТЕМПЕРАТУРНИХ КОМПОЗИТІВ

Мета роботи. Складання науково-технічного огляду про стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення композитів для застосування у авіакосмічній промисловості та розробки технологій їх виробництва. Узагальнення, і критичний аналіз відомих результатів досліджень з питань розробки та використання композитів у аерокосмічній промисловості. Виявлення областей, в яких актуально проведення подальших досліджень. Вказати авторитетні джерела щодо результатів досліджень в області застосування композитів.

Методи дослідження. Було проведено пошук відомостей щодо вуглець-вуглецевих, керамічних та металоматричних КМ, що були опубліковані за останні 15 років. Статті були знайдені за допомогою пошуку в Інтернеті в базах даних, зокрема, Scopus, Web of Science та Google Scholar. Для збору, організації та цитування дослідних матеріалів була використана програма Zotero.

Отримані результати. Систематизовано та проаналізовано стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення високотемпературних композитів та розробки технологій їх виробництва. Розглянуто перспективні, на сьогодні, можливості підвищення робочих температур композитів високотемпературного призначення. Обґрунтовано вибір основних напрямків сучасних досліджень щодо застосування композитів в аерокосмічній галузі.

Наукова новизна. Розширені відомості щодо перспектив створення високотемпературних композитів з підвищеною робочою температурою та розробки технологій, які дозволять підвищити їх робочу температуру і знизити технологічні витрати енергії при виробництві з них деталей теплових двигунів.

Практична цінність. Відомості, наведені в даному науково-технічному огляді можуть бути використані як для розробки нових високотемпературних композитів, так і для вдосконалення складів та технологій виробництва відомих систем композитів, обґрунтованого вибору їх фазових складових, а також аспірантами при виборі теми дисертаційної роботи; допомогти сформулювати цілі дисертаційного дослідження, вибрати сучасні методи проведення досліджень.

Ключові слова: високотемпературні композити, матриця, волокна, технологія формування, подовжувачі сопла.

Вступ

Вторгнення росії в Україну вимагає прискорення проведення наукових досліджень щодо розробки військової техніки. В даних умовах надзвичайно важливо задіяти увесь науковий потенціал заради перемоги та захисту життя українських воїнів, а також для забезпечення розвитку нових технологій, таких як будуть сприяти економічному розвитку України. Оборонні технології тісно пов'язані із прогресом в машинобудуванні, енергетиці, електроніці, який в свою чергу, потребує, зокрема, підвищення ефективності теплових двигунів. Тобто, підвищення їх коефіцієнта корисної дії (ККД).

Щодо вказаної характеристики рідинних ракетних двигунів (РРД), то її підвищують застосуванням подовжувача сопла, тобто соплового насадку, часто радіаційного охолодження, який являє собою тонкостінну фасонну оболонку [1]. Приклади деяких демонстраційних деталей показані на рис. 1, а–е [2]. Застосування вказаних деталей дозволяє підвищити величину питомого імпульсу тяги, особливо у космосі, при зниженні загальної маси двигуна [3].

На даний момент вказаний спосіб підвищення ККД є ефективним і успішно реалізується на двигунах Atlas V, Delta IV, Falcon 9 та Ariane 5 [2].

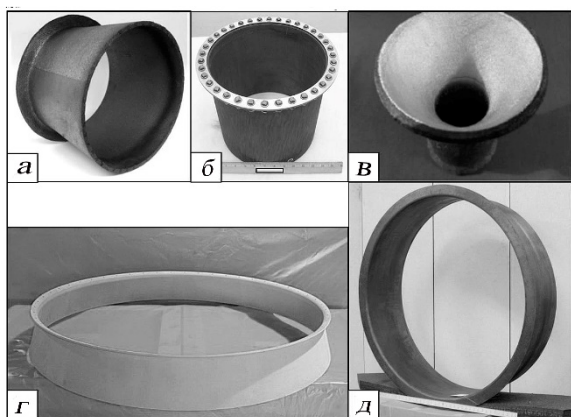


Рисунок 1. Подовжувачі сопла ракетних двигунів [3]:

а – 2D-гібрид C-ZrC/C-C на основі ПАН, виготовлений компаніями C-CAT та Ultramet, діаметр вихідної площини 11 дюймів; б – радіальний 2D евольвентний насадок виробництва Orbital ATK колишньої американської аерокосмічної та оборонної компанії, діаметр вихідної площини 11 дюймів; в – інтегральна 2D евольвентна камера згоряння/сопло з іридієвим покриттям, виготовлена компанією Orbital ATK, діаметр вихідної площини 3 дюйма; г – насадок 2D, виготовлений компанією C-CAT, з використанням покриття отриманого методами «високо-температурного розплаву» та пакетної цементації, діаметр фланця кріплення 44 дюйма; д – насадок 2D виробництва C-CAT, діаметр циліндра 42 дюйма

Ряд підходів до створення матеріалів, придатних для виготовлення подібних деталей, досліджувався SBIR (Small Business Innovation Research) и STTR

(Small Business Technology Transfer) та ін. На сьогодні, границя робочої температури подовжувача сопла становить приблизно 1100 °С, що вже не задовольняє вимоги конструкторів. Є сподівання, що розробка нових матеріалів дасть можливість підвищити робочу температуру приблизно до 2200 °С без значних втрат матеріалу внаслідок окислення, абляції тощо. В даній статті розглядається перспективність застосування армування вуглецевих, керамічних та металевих матриць різними типами волокон з метою підвищення вказаної температури.

Мета роботи

Метою статті є складання науково-технічного огляду про стан, досягнення та перспективи розвитку у галузі створення композитів та розробки технологій їх виробництва.

Матеріал і методика досліджень

Для досягнення вказаної мети в даній роботі було проведено дослідження літератури щодо композиційних матеріалів (КМ) з метою встановлення випадків їх доцільного використання в теплових двигунах. Було проведено пошук відомостей щодо вуглець-вуглецевих, керамічних та металоматричних КМ, що були опубліковані за останні 15 років.

Результати досліджень та їх обговорення

На сьогодні швидко поширюється застосування КМ, які набули великої популярності в багатьох областях промисловості завдяки своїм високим властивостям.

Важливою перевагою КМ порівняно з ізотропними матеріалами є те, що їх застосування дає можливість фахівцям цілеспрямовано створювати дані матеріали під конкретний виріб, у відповідності з діючими навантаженнями і особливостями його експлуатації. Для них характерно те, що вони служать конкретним завданням конструктора і демонструють бажані властивості в різних умовах експлуатації, головним чином, в аерокосмічній та автомобільній промисловостях внаслідок високого співвідношення міцності та ваги, яке вище, ніж у інших видів матеріалів.

Проте використання деяких КМ пов'язане і з певними складнощами. Це висока вартість виробництва, ускладнена переробка і утилізація, проблеми при з'єднанні різнорідних матеріалів, а також відмінності в міцнісних характеристиках. Крім того, оскільки композитні матеріали, як правило, мають анізотропні властивості, кількісний аналіз процесів, що відбуваються при формуванні та експлуатації в таких матеріалах, є досить складним.

З метою полегшення обгрунтованого вибору високотемпературних КМ для конкретних виробів їх класифікують, зокрема, за типом матриці на наступні види:

- композити з вуглецевими матрицями ВВКМ;
- композити з керамічними матрицями ККМ;

- композити з металевими матрицями МКМ;

Проаналізуємо властивості та приклади доцільного застосування кожного із вказаних видів КМ.

Композити системи вуглець-вуглець (C/C), на теперішній час, мабуть найбільше використовуються як матеріали для виготовлення деталей теплових двигунів. Це сучасні матеріали, відомі своєю високою міцністю та стійкістю до високих температур, внаслідок чого ідеально підходять для потреб аерокосмічної промисловості. Наприклад, автори роботи [4] дійшли висновку, що ВВКМ доцільно використовувати для виготовлення подовжувачів сопел для великомасштабного рідинного ракетного двигуна.

Проте вказаний матеріал має і недоліки. Основним із них це те, що він піддається окисленню за температури вище 350 °С, і швидкість окислення швидко збільшується з температурою. Це означає, що композити C/C потребують захисту поверхні, щоб запобігти окисленню, ерозії матеріалу і забезпечити тим самим довготривалу роботу.

Щоб визначити можливості розширення області застосування даних матеріалів, на сьогодні, проводяться дослідження щодо вивчення їх структури, механічних та теплових властивостей, розробляються покриття, які можуть захищати композит, що розглядається, в залежності від факторів навколишнього середовища, таких як УФ-випромінювання, окислення та ерозія.

Зокрема, вуглецеві волокна (ВВ) мають низьку стійкість до окислення в повітряному середовищі за високої температури. Тому, щоб розширити їх застосування для виготовлення деталей, що працюють у подібних умовах, важливо покращити їх антиокислювальну здатність. Ефективним методом підвищення стійкості до окислення ВВ є нанесення захисних покриттів (екранування). Воно може запобігти прямому контакту підкладки ВВ з киснем. Тип покриття може бути різним, наприклад, металеве покриття; оксидне покриття, нітридне покриття, карбідне покриття та композитне покриття [5–16]. Серед них найбільш перспективними є керамічні покриття, оскільки вони набагато легші і мають кращу змочуваність, що може знизити дифузію та реакцію на межі поділу.

Поширеними способами виготовлення керамічних покриттів є осадження з парової фази, інфільтрація прекурсорів, піроліз та золь-гель метод [17–19].

Достатньо однорідні та щільні покриття отримують хімічним або фізичним осадженням з парової фази. Слід відмітити, що при осадженні з парової фази при більш низькій температурі, добру адгезію покриття на різних підкладках отримують за

допомогою плазмової обробки [20, 21]. Зокрема, для поліпшення шорсткості поверхні, структури та механічних властивостей ВВ застосовуються обробки водневою та кисневою плазмами. Поліпшення адгезії до матриці пояснюється тим, що відбувається зміна щільності функціональних груп та зміни у вуглецевих зв'язках [22]. При цьому як морфологія, так і структура покриттів піддаються контролю. Проте низька швидкість осадження та порівняно з іншими способами висока вартість роблять процес осадження з парової фази не завжди практичним [23].

Набагато більше дослідників [24–31] для нанесення вказаних покриттів досліджували можливість золь-гель методу. Він від попереднього способу відрізняється більшою економічністю, нижчою температурою ущільнення (<1000 °С) та невеликою усадкою, що знижує напруження між покриттями та матрицею.

Зокрема, автори роботи [32] для підвищення антиокислювальних властивостей вуглецевих волокон в умовах високих температур та забезпечення належної взаємодії між волокнами і покриттям запропонували модифікований ними золь-гель метод. Його сутність полягає в покритті ВВ діоксидом кремнію (SiO₂) та карбідом кремнію (SiC). Дане модифіковане покриття SiO₂/SiC було успішно нанесено на ВВ і показало підвищення антиоксидантної ефективності порівняно з ВВ без покриття. Проте механічні властивості ВВ з покриттям SiC/SiO₂ лише незначно відрізнялися від властивостей ВВ без покриття при температурах нижче 1000 °С.

Ще однією проблемою щодо застосування даних КМ є їх низька міцність при міжшаровому зсуві. Вирішити дану проблему намагались автори роботи [33] шляхом нанесення на вуглецеву тканину вуглецевих нанотрубок (ВНТ) методом електрофоретичного осадження. Вони встановили, що зі збільшенням вмісту ВНТ міцність на міжшаровий зсув 2D композитів C/C значно зростає, а потім зменшується, причому вказаний показник досягає максимальних значень близько 13,6 МПа, коли вміст електрофоретично осаджених вуглецевих нанотрубок становить 0,54 %, що в 2,27 рази більше за базовий рівень. Автори, вказаної роботи вважають, що таке покращення характеристик C/C композитів головним чином зумовлене підвищеною когезією матриці, що спричинено здатністю ВНТ рафінувати вуглеводневу матрицю та індукувати багатшарові мікроструктури, які значно підвищують опір розповсюдженню тріщин внаслідок механізмів їх блокування та відхилення.

Складною проблемою виробництва подібних деталей з даних матеріалів є і те, що технології отримання передбачають суттєві витрати енергії, що сильно обмежує можливість їх масового виробництва. Тому, продовжуються дослідження щодо зниження

технологічних витрат енергії при виробництві подібних деталей.

Керамічні матеріали привернули увагу дослідників і своїми високотемпературними властивостями. Зокрема тим, що вони мають здатність тривалий час зберігати свої механічні властивості при температурах до 3000 С, а їх густина нижча, ніж багатьох металів. Завдяки цьому їх застосування в теплових двигунах може дозволити зменшити вагу конструкції, підвищити температуру робочого газу на вході та зменшити витрати на активне охолодження.

Проте кераміка занадто крихка і маломіцна, що не дозволяє виготовляти вироби малого поперечного перерізу. Тому тільки вирішення вказаної проблеми, а саме, підвищення міцності та в'язкості руйнування дозволить реалізувати принципово новий рівень температурних характеристик у сучасних машинах та механізмах. Підвищення міцності подібних матеріалів може бути досягнуте шляхом введення в них пластичної фази, внаслідок збільшення ефективної енергії руйнування, подрібнення зерна, створенням внутрішніх напружень стиску на шляху пересування тріщини, армуванням волокнами. Останній метод реалізується створенням керамічних композиційних матеріалів (ККМ).

Керамічні композитні матеріали були розроблені, щоб вирішити проблему крихкості широко використовуваної кераміки, наприклад, карбід-кремнієвої, оксид-алюмінієвої, нітрид-кремнієвої, нітрид-алюмінієвої та діоксид-цирконієвої керамік [34]. На сьогодні, щоб підвищити механічні властивості вказаних матеріалів досліджують можливості армування волокнами [35, 36], зокрема, металевими. В цьому випадку опір розтягуванню зростає незначно, зате істотно підвищується опір тепловим ударами, через що керамічний матеріал менше розтріскується при швидкому нагріванні. Властивості одержуваного таким шляхом ККМ залежать від співвідношення коефіцієнтів термічного розширення його матриці та наповнювача. Тому у випадку застосування металевих волокон перевагу мають дроти із вольфрамових сплавів.

З метою полегшення вибору оптимального складу для конкретних умов експлуатації ККМ доцільно розділити на дві категорії: оксидні і безоксидні.

Неоксидні ККМ цікаві своїми високим механічними та термічними властивостями. Вони можуть стати новим перспективним конструкційним матеріалом тому, що кераміка на основі тугоплавких сполук (боридів, карбідів, нітридів, силіцидів та інших) не виявляє помітної високотемпературної повзучості аж до температур 0,5–0,8 від температури плавлення, що значно перевершує показник металевих конструкційних матеріалів.

Найбільшу кількість безоксидних матеріалів становить технічна кераміка, яку відносять до неорганічних, неметалічних матеріалів. В останні роки було реалізовано підвищення властивостей кераміки шляхом армування її волокнами. В результаті отриманий матеріал виявився більш стійким до розтріскування, та термічного удару. Він був використаний в аерокосмічній промисловості, що дозволило виготовляти деталі більш стійкими в екстремальних умовах, в наслідок підвищених їх в'язкості руйнування, а до того ж даний матеріал виявився легшим, порівняно зі звичайними кераміками [36].

Такі частини, як внутрішня поверхня випускного сопла, де потік ракетного палива прискорюється до надзвукових швидкостей, є критично важливими місцями, оскільки в них спостерігається найбільша дія теплових потоків. Ці умови призводять до абляційного руйнування внаслідок проходження гетерогенних реакції між гарячим газом і внутрішніми поверхнями випускного сопла, що в свою чергу, призводить до необхідності зменшення тяги двигуна. Шляхом застосування ККМ в аерокосмічному секторі були вирішені подібні проблеми з проектування та виготовленням деталей двигунів, які б витримували високі температури та термохімічні середовища горіння без використання системи охолодження [37].

До вказаних матеріалів відносяться і композити систем C/SiC і SiC/SiC. Вони вважаються багаторазовими матеріалами через їх високу твердість і низьку ерозію. Крім того під час окислення вони утворюють на поверхні шар кварцового скла, який запобігає подальшому окисненню внутрішніх шарів. Проте за певної для кожного композиту температури відбувається активне окислення матриці карбиду кремнію до газоподібного монооксиду кремнію, що призводить до неконтрольованої ерозії. З цієї причини композити типу C/SiC та SiC/SiC використовуються тільки до температур на рівні 1200°C ÷ 1400 °C.

На сьогоднішній день ведуться дослідження на шляху використання безоксидних ККМ в новому поколінні газових турбін, які можуть працювати при 1700°C. Прикладом є сопла турбін, що одержані зі спрямовано кристалізованих злитків [38].

У відповідності до результатів роботи [39] боридні евтектики на основі гексабориду лантану можуть бути матеріалами для виготовлення таких елементів як термоемісійні катоди. Застосування спрямовано армованих композитів системи LaB₆-MeIVB₂ дає можливість значно підвищити механічні властивості таких елементів і розширити області їх застосування. У вказаній роботі, зокрема, досліджувався вплив швидкості кристалізації на густину струму термоемісії евтектичного композиту системи LaB₆-ZrB₂. При цьому показано, що щільність

струму композиту підвищується зі збільшенням швидкості кристалізації від 20 мм/год. до 100 мм/год. Найбільша щільність струму 36,24 А/см² спостерігалася при температурі 1873 К. Попередні дослідження [40, 41] показали, що на щільність струму евтектичного композиту LaB₆-MeB₂ також впливає підвищення швидкості дифузії атомів лантану вздовж границі розділу LaB₆/MeB₂.

Для отримання подібних сплавів Демірським та ін. було розроблено метод одержання керамічних спрямовано кристалізованих евтектичних сплавів з застосуванням установок для іскро-плазмового спікання [42–46]. Проте їх застосування може бути обмеженим, оскільки спрямовано армовані композити мають невеликі розміри і помітну анізотропію властивостей. Тому у роботі [38] була розроблена технологія одержання евтектичних сплавів на основі тугоплавких сполук методами порошкової металургії. У вказаній роботі повідомляється про успішне застосування розробленого металокерамічного композиту на основі титану з евтектичними включеннями V₄C-TiB₂ для виготовлення конструкційних елементів для авіаційної техніки.

З метою досягнення мінімальних розмірів та максимальної кількості волокон армувальної фази було проаналізовано механізми зародження і росту фазових складових спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів (СЗЕС) [47]. Для цього були використані результати робіт [48–50]. В результаті було встановлено, що для керування структурою, а відповідно і властивостями СЗЕС є доцільним накладання механічних коливань на систему розплав/кристал з метою інтенсифікації перемішування розплаву на фронті росту кристалу та зменшення концентрації компонентів, що відтісняються в розплав перед фронтом росту кристаллу [44].

Крім того, було проаналізовано можливість легування добавками кремнію, вуглецю та алюмінію з метою розбавлення розплаву поблизу фронту росту кристалу і зменшення величини концентраційної складової мінімального переохолодження, необхідного для зародження та росту волокон та збільшення температурного градієнту шляхом подрібнення розплаву і інтенсифікації процесу теплообміну між розплавом і кристалічної фази композиту [38].

В результаті вказаного аналізу автори вирішили, що доцільно з метою підвищення властивостей композитів системи LaB₆-ZrB₂ провести дослідження впливу механічних коливань на однорідність їх евтектичної структури. Для реалізації цього проводилось вирощування спрямовано армованих композитів без накладання механічних коливань і з накладанням механічних коливань [51, 52]. При

порівнянні мікроструктур композитів, вирощених в умовах впливу механічних коливань і без, спостерігали зміни у морфології волокон – їхня бокова поверхня стала звивистою. За допомогою кількісного металографічного аналізу мікроструктури встановлено, що композити, одержані з накладанням механічних коливань, мають більш однорідний розподіл за розмірами включень і густиною кристалів, в порівнянні з кристалізованим композитом без накладання механічних коливань. В результаті цих даних автори дійшли висновку, що звивистість обумовлена зміною концентраційного профілю атомів, що відтісняються перед фронтом кристалізації фаз гексабориду лантану та дибориду цирконію внаслідок утворення пор розміром 1–2 мкм на поверхні фронту кристалізації [50, 53]. Зменшення площі фронту кристалізації композиту призводить до збільшення концентрації атомів металу, що і спричиняє більш однорідний розподіл волокон із дибориду за розмірами. При цьому встановили, що введення в розплав механічних коливань сприяє пригніченню процесу формування колоній при помірних параметрах кристалізації, завдяки додатковому перемішуванню і вирівнюванню концентрації домішок по всьому об'єму розплаву.

Крім того, у роботі [51] відмічено, що помітним є вплив механічних коливань на рівномірність розподілу волокон по поперечному перетину. Зокрема, що у композитах, вирощених з застосуванням механічних коливань, диборидні включення розміщені більш рівномірно по поперечному перетину. За думкою авторів, це є наслідком активованих механічними коливаннями додаткового перемішування розплаву, яке мінімізує вплив концентраційного переохолодження, вирівнює концентраційний профіль та сприяє формуванню плоского фронту кристалізації і сумісному росту евтектичних фаз. Дані дослідження показали, що міцність на стиснення композитів, вирощених з застосуванням механічних коливань, можна підвищити майже вдвічі до 1530 МПа внаслідок покращення однорідності структури.

У зв'язку з перспективністю даних матеріалів було проведено дослідження впливу домішок кремнію на мікроструктуру та механічні властивості композиту V₄C-TiB₂, одержаного методом зонної плавки [50,53]. В даній роботі автори дійшли висновку, що легування спрямовано закристалізованого евтектичного сплаву V₄C-TiB₂ кремнієм сприяє подрібненню його структури, а відповідно підвищенню його механічних властивостей. Зокрема, міцність на згин легованого кремнієм композиту збільшується майже в 2 рази в порівнянні з нелегованим і досягає 460 МПа при температурі 20 °С та 487 МПа при 1600 °С.

Таким чином, спрямовано закристалізовані евтектичні сплави є цікавими їх багатоконпонентним

характером, який спонукає до пошуку взаємно підсилюючих ефектів, що обумовлені комбінацією різних властивостей в одному матеріалі, а також високотемпературними унікальними механічними властивостями і хімічною стійкістю, особливо при підвищених температурах. Дослідження впливу природи, кристалографічної орієнтації та кінетичних параметрів спрямованої кристалізації на формування структури та фізико-механічні властивості показало, що зменшення розмірів та збільшення кількості армувальних включень у вигляді дискретних волокон призводить до значного підвищення міцності, твердості та тріщиностійкості спрямовано армованих композитів.

Ефективним методом подрібнення структури у спрямовано закриталізованих евтектичних сплавах є введення додаткових фаз у евтектичну структуру. Часто це приводить до зменшення поперечних розмірів фаз в евтектиці. Використання даного підходу дозволило Опері зі співробітниками отримати СЗЕС потрібної системи Al_2O_3 -YAG-YSZ з міжфазною відстанню близько 100 нм. При цьому міцність даного матеріалу на згин становила близько 4,7 ГПа [55].

З метою подрібнення структури шляхом отримання квазі потрібних безоксидних СЗЕС досліджували формування мікроструктури та властивостей в системах V_4C-TiB_2 з додаванням третього нерозчинного компонента SiC в роботах [56, 57] та розчинного NbB_2 в системі $Mo-Mo_3Si-Mo_5SiB_2$ в [58–62]. Слід відмітити, що недолік вказаного методу полягає в тому, що потрібно ретельно підібрати компоненти з точки зору їх термодинамічної сумісності, а це часто обмежує можливості застосування високотемпературних речовин.

Застосування евтектичних порошків обумовлене їх підвищеними мікромеханічними характеристиками, а саме, мікротвердістю та тріщиностійкістю в порівнянні з чистими компонентами, що спонукало авторів робіт [63–68] вивчати закономірності ущільнення композиційних порошків V_4C-TiB_2 та авторів робіт [69, 70], що досліджували порошки LaB_6-TiB_2 з метою формування ізотропного армованого керамічного матеріалу та з'ясування механізмів формування ізотропної мікроструктури композиту в умовах іскро-плазмового спікання.

З метою збільшення ступеня ізотропії матеріалу, порошки доцільно отримувати способом розпилення розплаву евтектичного складу методом відцентрового розпилення, що характеризується значною простотою процесу [71–74]. Основною особливістю такого методу є те, що він являється саморегулюючим і дозволяє одержувати порівняно невелику різницю в гранулометричному складі частинок порошку. Крім того, можливість точного виконання умов розпилення стержня забезпечує високу однорідність одержаних

сферичних частинок. Використання як джерела нагріву високотемпературної плазмової дуги дозволяє одержувати порошки з частинками сферичної форми із матеріалів з високою температурою плавлення. При цьому, плазмова дуга також проявляє рафінуючу дію на розплави [71].

Метод відцентрового розпилення забезпечує вищі швидкості охолодження, до $105\text{ }^\circ\text{C}/\text{сек}$, в порівнянні з методом безтигельної зонної плавки ($102\text{ }^\circ\text{C}/\text{c}$) [75]. Вищі швидкості охолодження закономірно приводять до значно вищих температурних градієнтів, що, в свою чергу, сприяє подрібненню мікроструктури евтектичних сплавів, а відповідно вищих значень властивостей.

Вплив атмосфери спікання (азоту і аргону) на міцність композитів $(V_4C-TiB_2)-V_4C$ досліджували автори робіт [76, 77]. Вони дійшли висновку, що міцність композитів $(V_4C-TiB_2)-V_4C$, спечених в атмосфері азоту, на 16 % вище міцності зразків, спечених в атмосфері аргону. Цей результат вони пояснили утворенням нітридних фаз, що створюють ефект жорсткості.

Також в зразках, спечених в середовищі азоту, в деяких областях мікроструктури спостерігали зменшення розміру зерен карбіду бору, що також підтверджується даними робіт [76, 77]. Ця обставина вносить вклад у зміцнення композиту по зернограничному механізму. Крім того на поверхні руйнування матриці у спечених композитах $(V_4C-TiB_2)-V_4C$ після випробувань спостерігали двійникові утворення. Поява двійників у кераміці на основі карбіду бору є відомим ефектом [76, 77] і також вносить певний вклад у зміцнення композиту внаслідок створення бар'єру на шляху поширення тріщин.

Важливим питанням щодо застосування керамічних композитів є виникнення в них внутрішніх залишкових напружень внаслідок невідповідності теплового розширення між фазами. Крім того, при охолодженні матеріалу внутрішні залишкові напруження не можуть бути суттєво зниженими, внаслідок неможливості проходження пластичної деформації в кераміці. Це призводить до генерування високих значень внутрішніх теплових залишкових напружень, які можуть знижувати механічні властивості композиційного матеріалу в цілому. Особливо напруження розтягу в крихкій керамічній фазі можуть сприяти поширенню крихких тріщин [78].

З метою зниження рівня залишкових напружень у спрямовано закриталізованому евтектичному сплаві V_4C-TiB_2 , було проведено дослідження впливу термічної обробки при нагріванні до $1400\text{ }^\circ\text{C}$ у вакуумі [79]. При цьому результати даного дослідження свідчать про те, що у термічно обробленому при температурі $1400\text{ }^\circ\text{C}$ матеріалі спостерігається

зниження рівня напружень і наближення стану матричної фази спрямовано закристилизованого евтектичного сплаву V_4C-TiB_2 до рівноважного стану.

Крім того, авторами робіт [80–82] теж було проведене дослідження щодо можливостей застосування відпалу. В роботі [82] було встановлено, що відпал при температурах 1000–1600 °C спрямовано закристилизованого евтектичного сплаву LaB_6-TiB_2 приводить до підвищення механічних властивостей композиту на величину, пропорційну величині, на яку зменшуються залишкові напруження в матричній та армувальній фазах. Таким чином, застосовуючи вказані способи, є можливість довести значення механічних властивостей даних матеріалів до необхідних, які дозволяють виготовляти з них гарячі деталі теплових двигунів.

ККМ на основі оксидів, як правило, складаються з оксидного волокна та оксидної матриці. Найпоширенішими з оксидних матричних матеріалів є кераміки з оксиду алюмінію, берилію, церію та цирконію. Вони є стійкими до окислення матеріалами і використовуються в окислювальних середовищах, зокрема, в гарячих частинах теплових двигунів. На рис. 2 показано частини двигуна які виготовляються із ККМ [83].

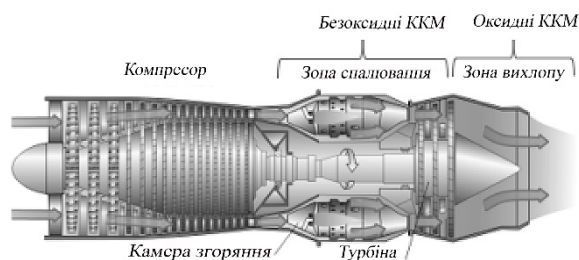


Рисунок 2. Частини двигуна, що виготовляються із ККМ [83]

Найбільш використовуваними оксидними композитними матеріалами є оксид алюмінію (глинозем) та алюмосилікати. ККМ на основі глинозему має високу твердість, високу міцність на стиск, хорошу хімічну та термічну стабільність [83]. Рисунок 3 ілюструє зростаючий інтерес до подібних ККМ.

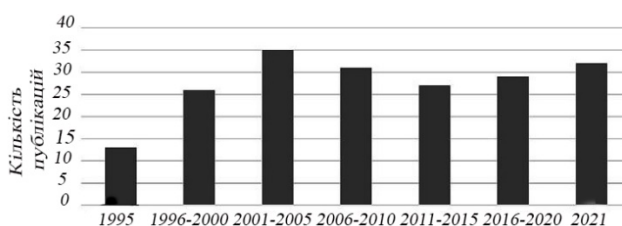


Рисунок 3. Кількість публікацій за роками з 1995 до 2021 р. [83]

Як видно, дані ККМ викликають постійний інтерес з 90-х років. Таким чином за останнє десятиліття властивості ККМ ініціювали вчених до проведення додаткових досліджень цього типу композитного матеріалу.

Однак застосування подібних ККМ як конструкційного матеріалу, поки що обмежено їх низькою в'язкістю та міцністю на розтяг. Це обумовлено тим, що тріщини легко поширюються в даних матеріалах і тому деталі можуть непередбачувано вийти з ладу під час експлуатації або обслуговування [84, 85]. З метою підвищення властивостей ККМ на основі глинозему, він може поєднуватись з карбідом бору, нітридом кремнію, карбідом титану та діоксидом титану.

Відомо [86], що підвищення властивостей глиноземної матриці було досягнуто шляхом армування її волокнами карбиду бору, що дозволило створити стійкий до високих температур і високого тиску ККМ. Зокрема авторами роботи [87] зазначено, що додавання 10–40 % об. ниткоподібних кристалів V_4C дозволяє отримати високі якісні показники механічних властивостей ККМ. Так, вказані композити з додаванням 10–20 об.% ниткоподібних кристалів V_4C показали підвищення в'язкості руйнування до $6,2 \text{ МПа} \cdot \text{м}^{1/2}$.

Завдяки високій твердості і в'язкості руйнування композити з матрицею з оксиду алюмінію (Al_2O_3), армованою волокнами із карбід бору (V_4C), були запропоновані для використання у високотемпературних двигунах, проте тільки для виготовлення окремих деталей, що в процесі експлуатації не піддаються значним динамічним навантаженням.

КМ з металевою матрицею (ММК), на сьогодні, є поширеними високотемпературними матеріалами. Часто це армовані волокнами сплави на основі нікелю, титану та алюмінію. Проте як матрицю уже використовують ніобієві, молібденові та вольфрамові сплави. На рис. 4 показано, в яких потенційних місцях застосовуються металоматричні композити (ММК).

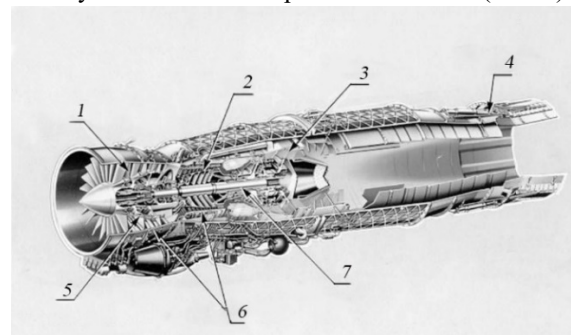


Рисунок 4. Потенційні місця застосування металоматричного композиту в двигуні EJ200, [88]:

- 1 – лопатки компресора, 2 – компресорні кільця,
- 3 – турбінні кільця, 4 – стійкі приводу, 5 – компресорні ущільнювачі, 6 – корпус компресора, 7 – вал

Для армування металевих КМ часто використовують безперервні волокна. зокрема, вуглецеві (BB), борні (B), з оксиду алюмінію (Al_2O_3), карбіду кремнію (SiC), карбіду бору (B_4C), нітриду бору (BN), дибориду титану (TiB_2), оксиду кремнію (SiO_2). Також, як волокна, застосовують металевий тонкий дріт, отриманий методом волочіння зі сталі, W, Ti, Mo і Be. Рідше використовують ниткоподібні, спеціально вирощені кристали різних матеріалів.

Оксидні волокна добре сумісні з нікелевою матрицею і є перспективними до застосування [88], проте проблему становить технологія виготовлення полікристалічних оксидних волокон, яка, зокрема, полягає у внутрішній кристалізації оксидів у каналах матриці і відбувається з порівняно низькою швидкістю. Крім того, жароміцність таких композиційних матеріалів залежить від міцності границі оксидного волокна і нікелевої матриці, регулювати яку в процесі створення виробів досить складно.

З метою регулювання міцності з'єднання та ступеню взаємодії волокон з матрицею на їх поверхню можуть наноситися покриття. Так, крім звичайного волокна карбіду кремнію промисловість виготовляє волокно карбіду кремнію SCS-2, покрите вуглецевим захисним шаром товщиною 1 мкм [89]. Проте таке рішення не є універсальним. В цій же роботі відзначається, що вивчення опору повзучості композиту з матрицею із сплаву ЖС-32 і евтектичним оксидним волокном $Al_2O_3-Al_5Y_3O_{12}$ при температурі 1150 °C показало, що при збільшенні об'ємної частки волокон більше деякої критичної величини міцність межі поділу зменшується, і відповідно знижується жароміцність композитного матеріалу в цілому. Тому, в кожному конкретному випадку потрібно проводити відповідні дослідження, що ускладнює технологію виробництва.

Досить доцільним є застосування, як волокон, дроту із вольфрамових сплавів, оскільки вони мають високі значення показників міцності та модулю пружності у широкому діапазоні температур, проте не мають достатньої міцності у поперечному напрямку, тобто волокна із вказаних сплавів схильні до розшарування. Цю проблему вирішували автори роботи [90], які показали, що схильність до розшарування пов'язана з технологією їх виготовлення і вирішити проблему запропонували шляхом використання для отримання волокон заготовок (штабиків) з частинками порошку менше за 200 нм і підбору оптимальної швидкості нагрівання їх при високотемпературному спіканню.

Цікавим є композиційний матеріал з шаруватою ніобій-титановою матрицею, зміцненою вольфрамовим дротом. Його процес формування досліджувався авторами роботи [91]. Композит формувався з

застосуванням технології контактного зварювання. Задача полягала в отриманні монолітного матеріалу з одночасним збереженням міцнісних характеристик армувального дроту і була вирішена застосуванням технології, що складається з двох етапів. На першому етапі, який характеризується «м'якими» режимами зварювання, здійснювали заповнення матеріалом матриці проміжків між волокнами внаслідок плинності матеріалу матриці, а на другому – з застосуванням «жорстких» режимів зварювання формували остаточні зони проплавлення, що повністю обволікали волокна. Таким чином, вдалося уникнути зменшення армувальних волокон і отримати монолітний ММК.

Великі перспективи мають нікелеві дисперсно-зміцнені сплави, які теж відносять до ММК, оскільки частинки зміцнювальної фази в них вводяться штучно. Їх матриця, що являє собою, наприклад, – γ - твердий розчин у нікелі 20 % хрому, або 15 % молібдену служить основним конструктивним елементом, який витримує навантаження, а дисперсні частинки гальмують рух дислокацій. Особливість дисперсно-зміцнених металевих композиційних матеріалів полягає у тому, що вони ізотропні за властивостями. Оптимальний ефект досягається при розмірі частинок 10...500 нм і відстані між ними – 100...500 нм при рівномірному розподілі їх у матриці. Автори дійшли висновку, що введення у матрицю тонкодисперсних порошоків діоксидів торію (ThO_2) або цирконію (ZrO_2) дозволяє підвищити робочу температуру жаростійких деталей двигуна з 1000 °C до 1200 °C [92].

Композиційні матеріали на металевій основі можуть також використовуватися як покриття деталей авіадвигунів, які працюють при високих температурах. Так, у роботі [93] як перспективний розглядається композит на металевій основі з використанням дибориду титану-хрому ($TiCrB_2$). Сам диборид титану-хрому становить твердий розчин хрому у дибориді титану, відрізняється високими жаро- та зносостійкістю і достатньо низькою густиною (4,5 г/см³). Його недоліком є висока крихкість. Але як компонент композиту з металевією матрицею він може суттєво підвищити жаростійкість матричного матеріалу. Показано, що перспективною матрицею для дибориду титану-хрому є хромонікелевий сплав з додаванням алюмінію (NiAlCr). Він добре змочує наповнювач і не взаємодіє з ним. Як покриття кращу жаростійкість показав композит $TiCrB_2 + 50\% NiAlCr$. Це пояснюється тим, що збільшення частки металевією фази покращує фізико-механічні властивості.

Важливою проблемою є розробка вольфрамових матеріалів для складних енергетичних систем, зокрема, таких як термоядерний реактор. Відомо [94], що основними недоліками вольфраму, який обмежує його застосування в подібних конструкціях, є його крихкість при помірних температурах і схильність до

окрихчення під час експлуатації, наприклад при дії нейтронного опромінення.

Зробити вольфрам більш стійким до негативних впливів можна шляхом використання композитного підходу. Вольфрамові композити, армовані вольфрамовими волокнами (Wf/W), успішно розробляються для подолання властивої вольфраму крихкості при звичайних температурах (20 °C) та його чутливості до крихкості під час експлуатації. Цей матеріал був успішно виготовлений і випробуваний протягом останніх років, і тепер увага приділяється технологічній реалізації його для використання в плазмових термоядерних пристроях. Випробування зразків даного ММК на удар за Шарпі показали підвищену енергію руйнування, в основному, внаслідок пластичної деформації вольфрамових волокон. Використання ММК Wf/W може значно розширити застосування вольфраму та усунути проблеми глибокого розтріскування, яке зазвичай виникає під час циклічного навантаження високим тепловим потоком [95–97]. З метою отримання вказаного композитного матеріалу були розроблені технології отримання вольфраму, армованого вольфрамовим волокном (Wf/W) з застосуванням процесу порошкової металургії [98]. У цьому дослідженні було розроблено новий тип Wf/W з пористою матрицею. У порівнянні зі звичайним Wf/W, розроблені технології дозволили зменшити взаємодію на границі волокно-матриця, що спростило виробничий процес. Механічні випробування показали, що даний композит Wf/W з пористою матрицею проявляє псевдопластичну поведінку з підвищеною в'язкістю руйнування порівняно з чистим вольфрамом.

Таким чином можна вважати, що наведені результати є доказом перспективності проведення досліджень КМ з металевою матрицею.

Доцільність армування металевих матриць вуглецевими волокнами. Стрімкий розвиток нанотехнологій останніми роками дозволяє розробляти передові нанокомпозити з металевою матрицею для структурної інженерії та функціональних пристроїв. В останні роки вуглецеві наноматеріали, включаючи графен та вуглецеві нанотрубки (ВНТ), стали важливим класом нових матеріалів для структурної інженерії та функціональних пристроїв завдяки їхньому надзвичайно високому модулю пружності та механічній міцності, а також високій електро- та теплопровідності. У поєднанні з їх високими характеристиками співвідношення довжини до діаметра або довжини до товщини графен і ВНТ вважаються найбільш ефективними армувальними наповнювачами для виготовлення композитних матеріалів.

Успішне застосування ВНТ в полімерних матеріалах (ПКМ) обумовило інтерес до використання їх як армувальної фази в композитах з металевою матрицею. У порівнянні з ПКМ, МКМ, що армовані ВНТ, мають ряд переваг таких як внутрішня стабільність при підвищеній температурі, висока міцність і жорсткість, чудова електро- і теплопровідність.

У відповідності з думкою авторів роботи [99], графен, завдяки своїм високим властивостям, (він має міцність на розрив до 1060 ГПа, модуль Юнга біля 1100 ГПа і низьку густину, яка становить 1,06 г/см³) на сьогодні, вважається ідеальним зміцнювачем для метало-матричних композитів. На даний момент це підтверджується результатами досліджень наведеними в багатьох роботах [100–105]. Зокрема, автори вказаних робіт зазначають, що графен може зміцнювати КМ за такими механізмами як зеренне зміцнення, дислокаційне зміцнення, а також зміцнення за механізмом Орована, завдяки чому є перспективним до застосування.

Це, зокрема, підтверджено результатами роботи [106], автори якої досліджували застосування одновимірних вуглецевих нанотрубок та двовимірних графенових нанолістів, як армувальних елементів у композитах з металевою матрицею. Автори вказаної роботи зазначають, що порівняно з керамічним армуванням, вуглецеві волокна та графітові частинки є привабливими армувальними матеріалами завдяки своїй високій теплопровідності і низькому коефіцієнту теплового розширення.

Слід відмітити, що вуглецеві волокна демонструють високу міцність на розрив (~3,10–4,07 ГПа), але при відносно низькому модулі (~231–248 ГПа). Підвищити модуль пружності до ~480 ГПа можна шляхом їх графітізації. Пояснюється вказане підвищення модуля пружності утворенням високоорієнтованих графітових шарів, проте міцність при цьому дещо знижується. Армування високомодульними волокнами надає значної розмірної стабільності. Дані МКМ особливо підходять для використання в космічному середовищі з екстремальними умовами, такими як вакуум, іонізуюче випромінювання та плазма [106].

Проте щодо застосування вказаних матеріалів існують проблемні питання, які потребують рішень. Зокрема, досить складно вводити ВНТ в метали, оскільки вони мають тенденцію агломеруватись у кластери всередині матриці. Інша проблема виникає через погане змочування ВНТ розплавленими металами внаслідок великої різниці в поверхневому натягу вуглецевих нанотрубок і металів; також утворення продуктів міжфазних реакцій та проблем, пов'язаних з гальванічною корозією. Тому, незважаючи на наведені переваги, комерційне

використання армованих ВНТ-ММК обмежене порівняно з їх аналогами з полімерних композитів ще й через високу вартість виробництва.

Компромід між високою міцністю і певним рівнем в'язкості часто є важкою дилемою при виборі конструкційних матеріалів. Наприклад, композит Nb/Nb₅Si₃ вважається критично важливим конструкційним матеріалом для заміни суперсплавів на основі нікелю в авіаційних двигунах через його високу робочу температуру (близько 1400 °C), добру стійкість до окислення, високу жорсткість, низьку густину і високу міцність. Однак низька в'язкість композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі ускладнює його застосування. В роботах [107–110] наголошено, що композит Nb/Nb₅Si₃ має високу робочу температуру, низьку густину, високу жорсткість, відмінну стійкість до окислення та високотемпературну міцність, і вважається заміником існуючих високотемпературних сплавів на основі нікелю в галузі авіаційних двигунів. Але низька міцність композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі перешкоджає його застосуванню в авіаційних двигунах [111–114], і на сьогодні є важливим питанням саме підвищення в'язкості даного композиту при кімнатній температурі. Як показано в багатьох роботах [115–124], зазвичай, ударну в'язкість подібних матеріалів підвищували за рахунок принесення в жертву їх міцності, що звичайно не бажано.

Наприклад, для підвищення в'язкості композиту Nb/Nb₅Si₃ при кімнатній температурі широко використовується метод легування [125–127]. Проте застосуванням вказаного методу досить важко задовольнити вимоги до рівня в'язкості, міцності та стійкості до окислення внаслідок суперечливих вимог до вказаних характеристик [127].

Поліпшення міцності та ударної в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃ іншим шляхом, а саме, додаванням в їх структуру графену досліджували автори роботи [128]. Позитивний вплив внаслідок додавання графену автори вказаної роботи пояснили тим, що при такому модифікуванні границі середньої невідповідності у вказаному КМ трансформуються в мультиграниці низької невідповідності Nb-Nb₄C₃-Nb₅Si₃ через включення графену та утворення нанорозмірних фаз Nb₄C₃ на границях зерен. Ці границі низької невідповідності перетворюють конструкційні матеріали у матеріали з чудовим поєднанням міцності та в'язкості. В даній роботі повідомляється про те, що з метою вирішення проблеми компромісу між міцністю та ударною в'язкістю було запропоновано кілька методів. Наприклад, налаштування міжфазної когерентності з використанням нанозерна-двійника та перехідної нанофазы, що дає змогу дислокаціям ковзати уздовж

меж зерен-двійників або переміщатися в сусідніх зернах і таким чином підвищити пластичність.

Ще один шлях вирішення вказаної проблеми дослідили автори роботи [129]. Вони, з метою виготовлення композиту Nb/Nb₅Si₃, армованого вуглецевими волокнами, застосували метод іскрового плазмового спікання. Ними було досліджено вплив температур спікання (1450 °C, 1500 °C і 1550 °C) на мікроструктуру поверхні поділу між матрицею та волокнами і механічні властивості композитів, включаючи твердість, пластичність та в'язкість руйнування. В результаті було досягнуто 99%-ї густини і майже рівномірного розподілу практично не пошкоджених коротких вуглецевих волокон по всьому композиту. На межі поділу між вуглецевим волокном і матричним сплавом була виявлена фаза, що відповідає хімічній формулі Nb₄C₃, завдяки якій волокна достатньо міцно з'єднувались з матрицею. У відповідності з результатами даного дослідження, найкращі механічні властивості були у композита, виготовленого при температурі спікання 1500 °C завдяки своїй високій густині, низькому пошкодженню волокон і задовільній міцності з'єднання між матрицею і волокнами. При підвищенні температури спікання до 1550°C механічні властивості композиту погіршувались, що автори пояснили пошкодженням вуглецевих волокон, яке відбувалось внаслідок реакції на межі поділу.

У відповідності до результатів роботи [130], графен був використаний для покращення механічних властивостей композиту Nb/Nb₅Si₃, який є кандидатом у наступне покоління високотемпературних конструкційних матеріалів для авіаційних двигунів. Авторами вказаної роботи системно досліджено мікроструктуру та механічні властивості зміцнених графеном композитів Nb/Nb₅Si₃ з міжфазною нанофазою Nb₄C₃. Зміцнений графеном композит Nb/Nb₅Si₃ із видатною в'язкістю руйнування та міцністю на стиск при кімнатній температурі був успішно виготовлений за допомогою іскрового плазмового спікання. Показано, що мікроструктура цього композиту змінюється від шаруватої морфології до рівномірно розподіленої рівноважної мікроструктури з підвищенням температури виготовлення від 1450 °C до 1550 °C. Високу міцність на стиск композитів Nb/Nb₅Si₃, зміцнених графеном, пояснено передачею навантаження на графен, і вказано, що ця ефективність передачі навантаження посилюється завдяки ефекту зчеплення міжфазної нанорозмірної фази Nb₄C₃. Високу міцність даного композиту пояснили можливістю висмикуванням графену при руйнуванні, а також відхиленням і перекриттям тріщин, що спричиняється графеном. Чудове поєднання міцності та в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃, зміцнених графеном, підтверджує, що

даний шлях успішно допоможе вирішити проблему компромісу між міцністю та в'язкістю подібних матеріалів.

Подібні результати наведено також у роботі [131]. В ній повідомляється, що компроміс між міцністю та в'язкістю є важкою проблемою в конструкційних матеріалах. Автори даної роботи пропонують стратегію синергічного підвищення міцності та в'язкості композитів Nb/Nb₅Si₃ шляхом введення високоефективного графену для адаптації когерентності міжфазної границі та зміцнення матриці. Виготовлений зміцнений графеном композит Nb/Nb₅Si₃ виділяється серед відомих подібних матеріалів підвищеними властивостями. Міжфазна границя Nb-Nb₅Si₃ із середньою невідповідністю за параметром ґратки перетворюється на мультиграницю Nb-Nb₄C₃-Nb₅Si₃ з низькою невідповідністю за параметром ґратки через додавання графену та утворення нанорозмірної фази Nb₄C₃ на границі між графеном і матрицею, що приводить до чудового поєднання міцності та в'язкості. Важливо відзначити, що низька невідповідність границь Nb₄C₃-Nb і Nb₄C₃-Nb₅Si₃ є корисною для формування міцного зв'язку між вказаними фазами, що сприяє передачі навантаження від матриці до графену. Також автори відзначають, що механізмами зміцнення в цьому композиті є відхилення від напрямку поширення та перекриття тріщин та мікротріщин. Таким чином, це дослідження розкриває стратегію вирішення проблеми компромісу між міцністю та в'язкістю в композитах Nb/Nb₅Si₃ шляхом додавання високоефективного графену для покращення когерентності міжфазної границі та зміцнення матриці.

Застосування графену з різною об'ємною часткою (0, 0,25 %, 0,50 %, 0,75 % та 1,0 %) для армування МКМ з матрицею Gr/Nb-Si, досліджували автори роботи [113]. Використання сучасної техніки, зокрема, сканувального електронного мікроскопа з польовою емісією HITACHI S4800 з енергодисперсійним спектрометром (FESEM/EDS); рентгівівської дифракції (XRD) D8; електронної мікроскопії, що просвічує (HRTEM) JEM-2100F дозволило встановити, що не було суттєвих змін у розмірі та морфології фази Nb₄C₃ зі збільшенням об'ємної частки графену, проте об'ємна частка фази Nb₄C₃ збільшувалась. Показано, що фаза Nb₄C₃ має стрижнеподібну морфологію. Примітно, що одна сторона фази Nb₄C₃ міцно зв'язана з графеном, а інша сторона вбудована міцно в матрицю МКМ. На думку авторів, ця форма зв'язку сприяє формуванню ефекту закріплення, тим самим підвищує міцність міжфазного зв'язку внаслідок зменшення міжфазної невідповідності та формування ефекту якоріння. Авторами даного дослідження було встановлено, що зі збільшенням об'ємної частки графену до 0,75 % міцність на стиск композиту

безперервно підвищується, проте з подальшим збільшенням об'ємної частки графену до 1,0% вона починає зменшуватись. Міцність на стиск та деформація композиту 0,75об. % Gr/Nb-Si становлять 2692 МПа та 9,87% відповідно, що приблизно на 41% і приблизно на 32% більше у порівнянні з неармованим композитом Nb/Nb₅Si₃. Це говорить про те, що міцнісні властивості композитів Gr/ Nb-Si можуть бути значно покращені шляхом введення відповідних кількостей графену.

Зниження міцнісних властивостей КМ при 1,0 об. % графену у КМ Gr/Nb-Si пояснено агломерацією графену. Шари в агломерованому графені зв'язані фізичними силами Ван-дер-Ваальса, які набагато нижчі за міцність ковалентного зв'язку між атомами вуглецю у графені, тому агломерація графену призводить до розриву між листами графену при досить низьких напруженнях, що, в свою чергу, призводить до зниження міцнісних властивостей КМ.

Крім того, авторами даної роботи було показано, що тенденція зміни в'язкості руйнування майже відповідає його міцностним властивостям. Середня в'язкість руйнування (38,25 МПа·м^{1/2}) композиту з 0,75об. % Gr/Nb-Si збільшується приблизно на 67% та на 32% порівняно з неармованим композитом Nb/Nb₅Si₃ (22,88 МПа·м^{1/2}) та композитом 0,25 об.% Gr/Nb-Si (28,88 МПа·м^{1/2}) відповідно. Ці результати показують, що введення графену в композити Gr/Nb-Si може ефективно покращити їх в'язкість руйнування.

На сьогодні рішеннями вказаних проблем зацікавлено багато дослідників. Наприклад, в роботі [132] широко представлено сучасний стан технології ВНТ-МКМ від їхнього синтезу до безлічі потенційних застосувань для кінцевого використання. У вказаній роботі розглядаються методи обробки, що використовуються для синтезу та виготовлення ВНТ-МКМ. При цьому наголошується на методах диспергування ВНТ в металевих системах, що є ключовим викликом для успішної та широкої реалізації ВНТ-МКМ. Представлено методи кількісної оцінки та покращеного контролю розподілу ВНТ. Розглянуто методи характеристики (сучасні методи визначення характеристик матеріалів та областей їх застосування), які унікально підходять для опису цих нанорозмірних матеріалів та їх численних хімічних і фізичних взаємодій з металевою матрицею, включаючи характеристику механізмів деформації в реальному часі (in-situ). Наводяться результати електронно-мікроскопічних досліджень, результати яких збагачують гіпотези щодо мікромеханічного моделювання, міжфазного дизайну, механічної поведінки та функціональних властивостей подібних композитних матеріалів. Охарактеризовані композити з подвійним армуванням, які мають на меті підвищити ефективність ВНТ і забезпечити задані властивості

матеріалу. Наведено кілька таблиць з переліком методів обробки, асоційованих станів ВНТ і властивостей, що отримуються в результаті, щоб допомогти наступному поколінню дослідників розвивати науку та інженерію ВНТ-ММК. Крім того, представлено огляд патентної літератури, щоб пролити світло на те, як може виглядати перша хвиля комерціалізації ВНТ-ММК і які виклики доведеться подолати як з технологічної, так і з комерційної точки зору.

Інтенсивна пластична деформація є багатообіцяючим методом виготовлення композитів із наддрібнозернистою структурою, а також композитів з наноструктурою. Існують різні способи інтенсивної пластичної деформації. На сьогодні, даними методами виготовляють широкий спектр різноманітних композитів, які включають композити метал-метал, композити з металевою матрицею та аморфні композити з металевою матрицею [133].

Наприклад, порівняння термічної стабільності ультрадрібнозернистих мікроструктур у зразках чистої міді та композитів мідь-вуглецеві нанотрубки, оброблених методом кручення під високим тиском, показало, що мікроструктура у зразку, консолідованому з чистого порошку Cu, має кращу стабільність, ніж у литому зразку Cu, а додавання ВНТ до порошку міді ще більше підвищило стабільність мікроструктури UFG у консолідованій матриці міді, перешкоджаючи рекристалізації. Проте це також призвело до зростання пористості та розтріскування композиту під час відпалу. Тим не менш було відзначено, що додавання ВНТ до Cu має загальну перевагу щодо її твердості в діапазоні температур від 300 до 1000 K [134].

Таким чином, з моменту відкриття вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та їх чудових механічних властивостей, вони використовуються як виняткові нановолокна [135]. Одночасне вдосконалення наявних процесів виробництва чистих вуглецевих нанотрубок (ВНТ) та вдосконалення існуючих методів для виготовлення кращих матричних матеріалів проклало шлях до отримання високоефективних композитних матеріалів з оптимізованими механічними властивостями. Сьогодні існує багато застосувань композитів, армованих ВНТ, але композити, армовані ВНТ, все ще є дефіцитними і використовуються лише в дуже специфічних сферах застосування.

Висновки

1. За результатами даного огляду можна констатувати, що металеві та неметалеві композити внаслідок своїх високих значень фізико-механічних питомих характеристик успішно застосовуються в авіаційній та космічній техніці для високонавантажених деталей, що піддаються інтенсивному нагріванню і високим навантаженням.

2. Показано, що саме в цих штучних матеріалах вдало поєднуються висока механічна міцність з їх високим модулем пружності, невеликою густиною та достатньою в'язкістю руйнування.

3. Встановлено, що в даний час КМ розглядаються для невеликої кількості високовартісних застосувань через їхню високу коштовність.

4. У процесі вибору оптимального високотемпературного композитного матеріалу відповідно до потреб та вимог конкретних умов експлуатації складання літературного огляду є важливим етапом, результати якого суттєво впливають на вартість проекту загалом.

5. Складним науково-технічним завданням, що стоїть у світі перед виробниками композитів, є розробка нових технологій їх виготовлення з більш низькими витратами, які підвищили б конкурентоспроможність КМ по відношенню до традиційних металів і сплавів.

6. Не дивлячись на помітні успіхи в освоєнні ВВК та ККМ для масового виробництва деталей двигунів, що нагріваються в процесі експлуатації, найбільш доцільним, на сьогодні, є ММК.

Список літератури

1. Potapov, A. Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines / Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. // *Acta Astronautica*, 2009. Vol. 64. No.1. – P. 22–27.
2. Gradl, P. R. Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines / Gradl, P. R., & Valentine, P. // In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference. – 2017. – 5064 p.
3. Потапов, А. М. Композиты: перспективы использования в ракетно-космической технике / Потапов, А. М. // *Космическая наука и технология*, 2015. – Т. 21. – №5. – 69 с.
4. Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen. / Anikin, A. V. et al. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2019. – Vol. 60. – P. 80–86.
5. Enhanced thermal conductivity of epoxy/Cu-plated carbon fiber fabric composites / S. Yu et al. *Macromolecular Research*. 2017.–Vol. 25.–No. 6.–P. 559–564. URL: <https://doi.org/10.1007/s13233-017-5114-9>.
6. Microstructure, Wear Resistance and Oxidation Behavior of Ni-Ti-Si Coatings Fabricated on Ti₆Al₄V by Laser Cladding / Q. Zhuang et al. // *Materials*. – 2017. – Vol. 10. – No. 11. – 1248 p. URL: <https://doi.org/10.3390/ma10111248>
7. Zamani, P. Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃, Cr₂O₃ and Cr₂O₃-Al₂O₃ composite coatings / Zamani, P., Valefi, Z. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 316. – P. 138–145.
8. Oxidative protection of a carbon-bonded carbon fiber composite with double-layer coating of MoSi₂-SiC

- whisker and TaSi₂-MoSi₂-SiC whisker by slurry method / Du, B. et al. // *Ceram. Int.* – 2017. – Vol. – No. 43. – P. 9531–9537.
9. Xiaojun, M. Structure and Photocatalytic Properties of Mn-Doped TiO₂ Loaded on Wood-Based Activated Carbon Fiber Composites / Xiaojun, M., Zhou, W., Yin, C. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 631 p.
10. High temperature oxidation behaviour of autocatalytic Ni-P-BN (h) coatings / Farrokhzad M.A. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 309. – P. 390–400.
11. Ablation behavior of rare earth La-modified ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites under an oxyacetylene torch. / Jia, Y. et al. // *Corros. Sci.* – 2016. Vol. – No. 104. – P. 61–70.
12. Improving the oxidation resistance under thermal shock condition of SiC-coated C/C composites with refined SiC grain size using ferrocene. / Huo, C. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2017, Vol. – 316. – P. 39–47.
13. Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO₂ coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. / Doganli G. J. et al. // *Journal of Coatings Technology and Research.* – 2016. – Vol. 13. – P. 257–265.
14. Microstructure and oxidation protection of a MoSi₂/SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃, coating for SiC-coated carbon/carbon composites. Surf / Yong, X. et al. // *Coat. Technol.* – 2017. – Vol. 311, 63–69.
15. Preparation of Continuous Al₂O₃/Y₂O₃ Coating on Carbon Fiber by a Novel Aqueous Plasma Electrolysis. / Zhang, Y.P. et al. // *Mater. Sci. Forum Trans. Tech. Publ.* – 2017. – Vol. 898. – P. 1575–1582.
16. Li, L. Damage evolution and life prediction of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composite under cyclic fatigue loading at room temperature and 800 °C in air. / Li, L. // *Materials.* – 2015. – Vol. 8. – P. 8539–8560.
17. The Microstructure of Nanocrystalline TiB₂ Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. / Huang, X. et al. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 1425 p.
18. Szczurek, A. Improvement of Interaction in a Composite Structure by Using a Sol-Gel Functional Coating on Carbon Fibers. / Szczurek, A. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 990 p.
19. Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered Ti₃SiC₂ / Tatarko, P., Casalegno, V., Hu, C. et al. // *MAX phase using Spark Plasma Sintering. J. Eur. Ceram. Soc.* – 2016. – Vol. 36. – P. 3957–3967.
20. Plasma Assisted Chemical Vapour Deposition Technological Design of Functional Coatings. / Januś, M., Kyzioł, K., Kluska et al. // *Arch. Metall. Mater.* – 2015. – Vol. 60. – P. 909–914.
21. Jonas, S., Januś, M., Jaglarz, J., Kyzioł, K. Formation of SixNy (H) and C:N:H layers by Plasma-Assisted Chemical Vapor Deposition method. *Thin Solid Films* 2016. – Vol. 600. – P. 162–168.
22. Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites / Lee, E.S., Lee, C.H., Chun, Y.S. et al. // *Compos. Part B Eng.* – 2017. – Vol. 116. – P. 451–458.
23. Deposition of copper thin films by plasma enhanced pulsed chemical vapor deposition for metallization of carbon fiber reinforced plastics / Guo, Z., Sang, L., Wang, Z. et al. // *Surf. Coat. Technol.* – 2016. – Vol. 307. – P. 1059–1064.
24. Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology / Wang, J., Lin, W., Yan, X. et al. // *Mater. Des.* – 2016. – Vol. 89. – P. 928–932.
25. Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions / Figueira, R.B., Callone, E., Silva, C.J. et al. // *Materials* 2017. – Vol. 10. – 306 p.
26. Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties / Xiang, Y., Li, X., Du, A. et al. // *J. Coat. Technol. Res.* – 2017. – Vol. 14. – P. 447–454.
27. Xia, K. Preparation of anti-oxidative SiC/SiO₂ coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol-gel method / Xia, K., Lu, C., Yang, Y. // *Appl. Surf. Sci.* 2013. – Vol. 265. – P. 603–609.
28. Preparation and oxidation behavior of a double-layer coating for three-dimensional braided carbon fiber / Wang Jingjing, et al. // *Surface and Coatings Technology.* – 2016. – Vol. 298. – P. 58–63.
29. Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions / Figueira, R.B., Callone, E., Silva, C.J. et al. // *Materials.* – 2017. – Vol. 10. – 306 p.
30. Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. / Xiang, Y., Li, X., Du, A. et al. // *J. Coat. Technol. Res.* – 2017. – Vol. 14. – P. 447–454.
31. Guanyuan, et al. Fabrication and anti-oxidation ability of SiC-SiO₂ coated carbon fibers using sol-gel method / Yang, G., Huang, Z., Wang, X. et al. // *Yang. Materials.* – 2018. – Vol. 11. – No. 3. – 350 p.
32. Improvement of carbon fiber oxidation resistance by thin ceramic coating using silica particles. / Kira, Kohei, et al. // *Carbon.* – 2024. – Vol. – No. 228. – 119417 p.
33. Effects of carbon nanotubes by electrophoretic deposition on interlaminar properties of two dimensional carbon/carbon composites / Li, Y., Guo, L., Li, H. et al. // *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.* – 2017. – Vol. 32. – No. 5. – P. 994–1000.
34. Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: Mechanical performance and effects of heat treatments. / Volkmann, E., Tushtev, K., Koch, D. et al. // *Compos. Part A Appl. Sci. Manuf.* – 2015. – Vol. 68. – P. 19–28.
35. Pritzkow, Walter, Andreas Nöth, and Arne Rüdinger. Oxide ceramic matrix composites-manufacturing, machining, properties and industrial applications. – 2015. – 150 p.
36. On the thermal shock resistance and mechanical properties of novel unidirectional UHTCMCs for extreme environments. / Zoli, L., Vinci, A., Galizia et al. // *Scientific Reports.* – 2018. – Vol. 8. – No. 1. – P. 1–9.

37. Ultra-high-temperature ceramic matrix composites in hybrid rocket propulsion environment. / Mungiguerra, S., Di Martino, G. D., Savino, R. et al. // In: 2018 international energy conversion engineering conference. – 2018. – 4694 p.
38. Богомол Ю. І. Фізико-хімічні основи керування структурою та властивостями армованих керамічних матеріалів для роботи в екстремальних умовах експлуатації: дис. ...д-ра техн. наук: 05.16.06. / Богомол Ю. І. – К., 2019. – 371 с.
39. Microstructure and properties of directionally solidified LaB₆(100)-ZrB₂ eutectic composite prepared by the optical zone melting method. / Yang X., Zhao J., Zhu Z. et al. // Journal of the European Ceramic Society. – 2019. – No. 39. – P. 1803–1809.
40. Microstructure, mechanical and thermionic emission properties of a directionally solidified LaB₆-VB₂ eutectic composite / Yang, X., Wang, P., Wang, Z. et al. // Materials & Design, 2017. – Vol. – No. 133. – P. 299–306.
41. Local investigation of the emissive properties of LaB₆-ZrB₂ eutectics. / Berger, M. H., Back, T. C., Soukiassian, P. et al. // Journal of Materials Science. – 2017. – No. 52. – P. 5537–5543.
42. Demirskyi D., Sakka Y. In Situ Fabrication of B₄C-NbB₂ Eutectic Composites by Spark-Plasma Sintering. Journal of the American Ceramic Society. 2014. №97. P. 2376-2378.
43. Demirskyi D. High-Strength B₄C-TaB₂ Eutectic Composites Obtained via in situ by Spark Plasma Sintering / Demirskyi D., Sakka Y., Vasykiv O. // Journal of the American Ceramic Society. – 2016. – No. 99. – P. 2436–2441.
44. Demirskyi D. Analysis of the high-temperature flexural strength behavior of B₄C-TaB₂ eutectic composites produced by in situ spark plasma sintering / Demirskyi D., Vasykiv O. // Materials Science & Engineering A. – 2017. – No. 697. – P. 71–78.
45. Demirskyi D. Consolidation of B₄C-VB₂ eutectic ceramics by spark plasma sintering / Demirskyi D., Sakka Y., Vasykiv O. // Journal of the Ceramic Society of Japan. 2015. – No. 123. – P. 1051–1054.
46. Demirskyi D. Mechanical properties of SiC-NbB₂ eutectic composites by in situ spark plasma sintering / Demirskyi D., Vasykiv O. // Ceramics International. – 2016. – No. 42. – P. 19372–19385.
47. Loboda, P. I. Structure and properties of reinforced ceramic materials produced by directional solidification / Loboda, P. I. // Powder Metallurgy and Metal Ceramics. – 2018. – Vol. 57. – P. 13–26.
48. Directionally Solidified Boride and Carbide Eutectic Ceramics. / Chen, W. T., White, R. M., Goto, T., & Dickey, E. C. // Journal of the American Ceramic Society. – 2016. – No. 99. – P. 1837–1851.
49. Llorca J. Directionally solidified eutectic ceramic oxides / Llorca J., Orera V. M. // Progress in Materials Science. – 2006. – No. 51. – P. 711–809.
50. Лобода П. І. Спрямовано закристалізовані бориди / Llorca J., Orera V. M. – К. : Праймдрук, 2012. 395 с.
51. Вплив механічних коливань на формування мікроструктури монокристалів та керамічних композитів під час вирощування з розплаву / П. І. Лобода та ін. // Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2013. – № 6. – С. 65–72.
52. Лобода П. І. Вплив ультразвуку на структуру і властивості спрямовано закристалізованих евтектичних сплавів. / П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, Т. О. Соловйова // Металознавство та обробка металів. 2012. – № 4. – С. 23–28.
53. Ремізов Д. О. Вплив структурно-геометричних характеристик фазових складових на механічні властивості закристалізованого із розплаву евтектичного складу Ti-TiB / Ремізов Д.О., Богомол, Ю. І., Лобода, П. І. // Problems of Friction and Wear. – 2020. – Vol. 2. – No. 87. P. 68–77.
54. Room and high temperature toughening in directionally solidified B₄C-TiB₂ eutectic composites by Si doping. / Bogomol, I., Badica, P., Shen, Y. et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2013. – No. 570. – P. 94–99.
55. Ultra-High-Strength Nano-fibrillar Al₂O₃-YAG-YSZ Eutectics / Oliete P.B., Peña J.I., Larrea A. et al. // Advanced Materials. – 2007. – №19. – P. 2313–2318.
56. Богомол Ю. І. Структура та властивості квазіпотрійних спрямовано армованих композитів системи B₄C-TiB₂-SiC. Ю.І. / Богомол, П.І. Лобода, Я.Б. Головенько // Металознавство та обробка металів. – 2015. – № 2. – С. 37–42.
57. Bogomol I. High-temperature mechanical behaviour of the directionally solidified ceramic eutectics / Bogomol I. // 2019 International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research, and Application. Nanchang, China. 2019. – P. 38–39.
58. Multiphase Mo-Si-B Alloys Processed by Directional Solidification / Kruger M., Hasemann G., Bogomol I., Loboda P. I. // Materials Research Society Symposium Proceeding. – No.1516. – P. 1684–1689.
59. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy / G. Hasemann et al. Intermetallics. 2014. No.48. P. 28–33.
59. Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy / Hasemann, G., Bogomol, I., Schliephake, D. et al. // Intermetallics. – 2014. – No. 48, P. 28–33.
60. Структура та властивості спрямовано закристалізованого сплаву системи Mo-8,7Si-18B / Ю. І. Богомол та ін. Наукові вісті НТУУ «КПІ». – 2016. – No 2. – С. 69–76.
61. Near-Eutectic Ternary Mo-Si-B Alloys: Microstructures and Creep Properties / G. Hasemann et al. // Journal of Metals. – 2016. – No. 68. – P. 2847–2853.
62. Вплив перемішування розплаву на структуру та властивості спрямовано закристалізованого сплаву Mo-17,5Si-8B. / М. І. Упатов, Ю. І. Богомол, В. В. Болбуг, Лобода П. І. // Металознавство та обробка металів. – 2018. – № 1. – С. 22–29.
63. Dense and tough (B₄C-TiB₂)-B₄C composite within a composite' by spark plasma sintering / Bogomol,

- I., Borodianska, H., Zhao, T. et al. // *Scripta Materialia*. – 2014. – No.71. – P. 17–20.
64. Одержання композиту $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$ з ізотропною евтектичною мікроструктурою та його властивості. / І.О. Гусарова, О.М. Потапов, Є.В. Солодкий, Ю.І. Богомол // *Порошкова металургія*. – 2018. – №03/04. – С. 108–116.
65. Спосіб отримання керамічних полікристалічних матеріалів на основі карбіду бору методом електророзрядного спікання : пат. 87076 Україна, № u201307486 ; заявл. 12.06.2013 ; опубл. 27.01.2014, Бюл. № 2.
66. Спосіб отримання керамічного бронематеріалу на основі карбіду бору та дибориду титану: пат. 114502 Україна, № u201609558 ; заявл. 16.09.2016 ; опубл. 10.03.2017, Бюл. № 5.
67. Антоненко О.О. Дослідження властивостей і структури металокерамічних композитів системи $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2-\text{Al}$ / Антоненко О.О., Богомол Ю.І. // Збірка тез доповідей XII Міжнародної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених Перспективні технології на основі новітніх фізико-матеріалознавчих досліджень та комп'ютерного конструювання матеріалів, 18–19 квітня 2019 року, Київ. – С. 183–185.
68. Антоненко О. О. Дослідження властивостей і структури металокерамічних композитів системи $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2-\text{Cu}$ / Антоненко О. О., Богомол Ю. І. // *Матеріали XI Міжнародної науково-технічної конференції «Нові матеріали і технології в машинобудуванні»*, КПІ ім. Ігоря Сікорського, м. Київ, 30–31 травня 2019 р., 21 с.
69. Мікроструктура та механічні властивості евтектичного сплаву $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ одержаного електророзрядним спіканням. / Загородня Е. В., Лобода П. И., Богомол Ю. І. та ін. // *Металознавство і новітні технології*. – 2011. – т. 33. Спецвипуск. – С. 351–360.
70. Спосіб отримання керамічних евтектичних полікристалічних матеріалів методом електророзрядного спікання: пат. 74036 Україна, № u201205104 ; заявл. 24.04.2012 ; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19.
71. Лобода П. І. Структура та властивості розпиленних порошків евтектичного сплаву $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. / П. І. Лобода, Ю. І. Богомол, О. І. Білий // *Металознавство та обробка металів*. – 2015. – № 3. – С. 46–52.
72. Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ System / Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I. et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2015. – No. 37. – P. 394–401.
73. Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі гексабориду лантану методом відцентрового плазмового розпилення: пат. 99564 Україна, № u201414167 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
74. Спосіб отримання керамічних евтектичних порошків на основі карбіду бору методом відцентрового плазмового розпилення: пат. 99563 Україна, № u201414166 ; заявл. 30.12.2014 ; опубл. 10.06.2015, Бюл. № 11.
75. Effect of the Cooling Rate During Melt Solidification on the Structure and Properties of $\text{WC}-\text{W}_2\text{C}$. / Trosnikova, I. Y., Loboda, P. I., Karasevska, O. P., & Bilyi, O. I. // *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*. – 2014. – No. 52. – P. 674–679.
76. High Hardness $\text{BaCb}-(\text{BxOy}/\text{BN})$ Composites with 3D Mesh-Like Fine Grain-Boundary Structure by Reactive Spark Plasma Sintering. / Vasylykiv, O., Borodianska, H., Badica, P. et al. // *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. – 2012. – No. 12. – P. 959–965.
77. Toughness control of boron carbide obtained by spark plasma sintering in nitrogen atmosphere / Badica, P., Borodianska, H., Xie, S. et al. // *Ceramics International*. 2014. – No. 40. – P. 3053–3061.
78. Llorca J. Directionally solidified eutectic ceramic oxides / Llorca J., Orera V.M. // *Progress in Materials Science*. – 2006. – No. 51. – P. 711–809.
79. Вплив термічної обробки на механічні властивості та на внутрішні напруження в спрямовано закристалізованому евтектичному сплаві $\text{W}_4\text{C}-\text{TiB}_2$. / Ю. В. Кобилінський, В. В. Болбут, Ю. І. Богомол, П. І. Лобода // VIII Міжнародна науково-технічна конференція «Нові матеріали і технології в машинобудуванні». – 2016. – С. 77–78.
80. Mechanical properties of HfB_2 whiskers. / Dub, S. N., Loboda, P. I., Bogomol, Y. I. et al. // *Journal of Superhard Materials*. – 2013. – No. 35. – P. 234–241.
81. Mechanical properties of single crystals of transition metals diborides TM_2B_2 (TM = Sc, Hf, Zr, Ti). Experiment and theory. / Dub S. N., Sichkar S. M., Bilous V. et al. // *Journal of Superhard Materials*. 2017. – No. 39. – P. 308–318.
82. Influence of annealing on crucible-free float zone melted $\text{LaB}_6-\text{TiB}_2$ composites. / Soloviova, T., Karasevska O. P., Vleugels J. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2017. – No. 729. – P. 749–757.
83. Karadimas, G. Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review / Karadimas, G., & Salonitis, K. // *Applied Sciences*, 2023. – Vol. 13. – No. 5. – 3017 p.
84. Study on the wear resistance of graphene modified nanostructured $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{TiO}_2$ coatings. / Wang, L., Liu, S., Gou, J. et al. // *Appl. Surf. Sci.* 2019. – Vol. 492. – P. 272–279.
85. Aviation G. E. GE Successfully Tests World's First Rotating Ceramic Matrix Composite Material for Next-Gen Combat Engine. GE Aviation, 2015.
86. Cavdar, U. In-situ compaction and sintering of $\text{Al}_2\text{O}_3-\text{W}_4\text{C}$ composites by using a High-Frequency Induction System / Cavdar, U., Altintas, A., Karaca, B. // *Met. Mater.* – 2018. – Vol. 56. P. 177–181.
87. Lin, X. Pressureless sintering of W_4C whisker reinforced Al_2O_3 matrix composites // Lin, X., Ownby, P. // *J. Mater. Sci.* 2000. – Vol. 35. – P. 411–418.
88. Doorbar, Phillip J. 4.19 development of continuously-reinforced metal matrix composites for aerospace applications / Doorbar, Phillip J., Kyle-Henney, Stephen // *Compr. Compos. Mater.* 2018. – Vol. 4. – P. 439–463.

89. Плєскач, В. М. Жароміцні композити на металевій, інтерметалідній і керамічній основі / Плєскач, В. М., Ольшанецький В. Ю. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2019. – №1. – С. 87–89.
90. Исследование влияния технологии производства штабиков на склонность проволоки из торированных вольфраморениевых сплавов к расслоению / В. С. Винниченко, Кононенко Ю. І., Ольшанецький В. Е., Орлов М. Р. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2004. №1. – С. 84–88.
91. Коробко А. В. О формировании листовых высокотемпературных металлокомпози́тов с матрицами на основе ниобия, упрочнённых тугоплавкими вольфрамовыми волокнами / Коробко А. В. Лавренко А. С. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2012. – № 1. – 52 с.
92. Судаков А. И. Перспективы применения композиционных материалов в ракетостроении / Судаков А. И., Геращенко В. В. // Актуальные проблемы авиации и космонавтики. – 2016. – Т. 1. – С. 173–174.
93. Коновал В. П. Стойкость к высокотемпературному окислению композиционных материалов и покрытий на основе диборида титана-хрома / Коновал В. П. // Доповіді НАН України. – 2015. № 5. – С. 83–89.
94. Tungsten fiber reinforced tungsten (Wf/W) using yarn based textile preforms. / Coenen, J. W., Huber, P., Lau, A. et al. // *Physica Scripta*. 2021. – Vol. 96. – No. 12. –124063 p.
95. Chemically deposited tungsten fibre-reinforced tungsten – The way to a mock-up for divertor applications. Riesch, J., Aumann, M., Coenen, J. W. et al. // *Nuclear Materials and Energy*. – 2016. – Vol. 9. – P. 75–83.
96. Large-scale tungsten fibre-reinforced tungsten and its mechanical properties / D. Schwalenberg & Neu, R. et al. // *Journal of Nuclear Engineering*. – 2022. – Vol. 3. – No. 4 P. 306–320.
97. Coenen, Jan Willem. Fusion materials development at Forschungszentrum Jülich / Coenen, Jan Willem // *Advanced Engineering Materials*. – 2020 Vol. 22. – No. 6. – 1901376 p.
98. Evolution of Tungsten Fiber-Reinforced Tungsten-Remarks on Production and Joining / Coenen, J. W., Lee, V. Y., Mao, Y. et al. // *Advanced Engineering Materials*. – 2023. – Vol. 25. – No. 19. – 2300569 p.
99. Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. / Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W. et al. // *Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. Science*. – 2008. – Vol. 321. – No. 5887. – P. 385–388.
100. Interfacial microstructure of graphite flake reinforced aluminum matrix composites fabricated via hot pressing. Hiroki Kurita et al. *Composites Part A // Applied Science and Manufacturing* 2015. – Vol. 73. – P. 125–131.
101. Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite / Mu, X. N., Cai, H. N., Zhang, H. M. et al. // *Materials & design*. – 2018. – Vol. 140. – P. 431–441.
102. Bioinspired, graphene-enabled Ni composites with high strength and toughness / Zhang, Y., Heim, F. M., Bartlett, J. L. et al. // *Science Advances*. – 2019. – Vol. 5. – No. 5: eaav5577.
103. Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nanophases. Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2023. – Vol. 25. – P. 6886–6897.
104. Strengthening effect induced by interfacial reaction in graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites / Xiong, B., Liu, K., Xiong, W. et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 845. – 156282 p.
105. Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high-performance conductor / Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // *Composites Part B: Engineering*, 2019. – Vol. 167. – P. 93–99.
106. Tjong, Sie Chin. Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets / Tjong, Sie Chin // *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 2013. – Vol. 74. – No. 10: 281–350.
107. Strengthening mechanisms in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composite. Bowen, Xiong et al. *Journal of Alloys and Compounds*, 2024, Vol. No. 970: 172600.
108. Tang, Ye, Guo, Xiping. Role of deformation temperature and strain rate on microstructural evolution of hot compressed Nb-Si based ultrahigh temperature alloy / Tang, Ye, Guo, Xiping // *Intermetallics*, 2020. – Vol. 119. – 106719 p.
109. Surface microstructure modification of hypereutectic Nb-Si based alloys to improve oxidation resistance without damaging fracture toughness. / Guo, Y., Li, Z., He, J. et al. // *Materials Characterization*. – 2020. – Vol. 159. – 110051 p.
110. Rapid directionally solidified microstructure characteristic and fracture behaviour of laser melting deposited Nb-Si-Ti alloy / . Liu, W., Ren, X., Li, N. et al. // *Progress in Natural Science: Materials International*. – 2021. –Vol. 31(1). – P. 113–120.
111. Fang, Xin. Variation in morphology and crystallographic orientation of directionally solidified Nb-Si based alloys at high withdrawal rates / Fang, Xin, Guo, Xiping, Qiao, Yanqiang // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2020. – Vol. 819. – 153023 p.
112. Long, W. Y. Preparation of CNTs reinforced Nb/Nb₅Si₃ in-situ composites by spark plasma sintering / Long, W. Y., Xiong, W., Yao, J. P. // *Special Casting Nonferrous Alloys*. – 2015. – Vol. 35. – P. 119–123.
113. Interfacial phase induced load transfer in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites / Xiong, B., Wang, C., Liu, K. et al. // *Materials Science and Engineering: A*, 2021. – Vol. 799. – 140156 p.
114. Strengthening mechanisms in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial reaction

- / Xiong, B., Peng, F., Wang, C. et al. // Materials Science and Engineering: A, 2021. – Vol. 825. – 141884 p.
115. Synergistic effects of Fe and C on microstructure and properties of Nb-Ti-Si based alloys. / Wang, Q., Wang, Q., Chen, R. et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 936. – 168167 p.
116. Ultra-fine Nbss/Nb5Si3 in situ composites with remarkable properties prepared by ultrasonic melt treatment. / Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R. et al. // Journal of Alloys and Compounds. – 2023. – Vol. 940. – 168940 p.
117. Balancing the fracture toughness and tensile strength by multiple additions of Zr and Y in Nb-Si based alloys / Sun, G., Jia, L., Ye, C. et al. // Intermetallics. – 2021. – Vol. 133. – 107172 p.
118. Sala, Kasturi Effect of Ti addition and microstructural evolution on toughening and strengthening behavior of as cast or annealed Nb-Si-Mo based hypoeutectic and hypereutectic alloys / Sala, Kasturi, Mitra, Rahul // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2021. – Vol. 52. – P. 3436-3459.
119. Improving the mechanical properties of Nb-24Ti-16Si-2Al alloy by adding Zr and Fe to regulate silicide / Wang, Q., Wang, Q., Chen, R. et al. // Materials Characterization. – 2023. – Vol. 196. – 112566 p.
120. Improvement of fracture toughness of Nb-Si alloy by two-step heat treatment / Ye, C., Li, H., Jia, L. et al. // International Journal of Refractory Metals and Hard Materials. – 2021. – Vol. 94. – 105378 p.
121. Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast and ultrasonic treated Nb-16Si-xCr alloys / Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R. et al. // Journal of Materials Research and Technology, 2022. – Vol. 17. – P. 2856–2863.
122. Effect of Ni on microstructures and mechanical properties for Multielemental Nb–Si-based alloys / Chen, D., Wang, Q., Chen, R. et al. // Metallurgical and Materials Transactions A. – 2022. – Vol. 53. – No. 5. – P. 1793–1805.
123. Microstructure evolution and mechanical properties of ZrC-added Nb-16Si-20Ti alloys / Dezhi, Chen et al. Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 829. – 142159 p.
124. Strengthening and toughening effect of laser melting deposited Nb-16Si-20Ti-3Al with nano-ZrC additions / Yin, X., Liang, J., Jia, X. et al. // Materials Science and Engineering: A. – 2022. – Vol. 850. – 143509 p.
125. Grammenos, I. Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb–18Si–5Hf base alloys / Grammenos, I., Tsakiroopoulos, P. // Intermetallics. – 2010. – Vol. 18. – No. 2. P. 242–253.
126. Grammenos, I. Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf base alloys. / Grammenos, I., Tsakiroopoulos, P. // Intermetallics. – 2010. – Vol. 18. – No. 2. – P. 242–253.
127. A review of ultra high temperature Nb-Si based superalloys. / Jia, L., Weng, J., Sha, J. et al. // Mater. China. – 2015. – Vol. – No. 34. – P. 372–382.
128. Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites / Xiong, B., Wang, Z., Peng, F. et al. // Intermetallics. – 2024. – Vol. 174. – 108440 p.
129. Effects of sintering temperature on interface and mechanical properties of short carbon fiber reinforced Nb/Nb5Si3 composites fabricated by spark plasma sintering / Xiong, B., Wang, C., Xiong, Y. et al. // Intermetallics. – 2019. – Vol. 108. – P. 66–71.
130. Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites with interfacial nanophases / Xiong, B., Peng, F., Chen, W. et al. // Journal of Materials Research and Technology. – 2023. – Vol. 25. – P. 6886–6897.
131. Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb5Si3 composites / Xiong, B., Wang, Z., Peng, F. et al. // Intermetallics. – 2024. – Vol. 174. – 108440 p.
132. Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites / Nieto, A., Agarwal, A., Lahiri, D. et al. // CRC press, 2021.
133. Bachmaier, A. Generation of metallic nanocomposites by severe plastic deformation / Bachmaier, A., Pippan, R. // International materials reviews. – 2013. – Vol. 58. – No. 1. – P. 41–62.
134. High temperature thermal stability of pure copper and copper-carbon nanotube composites consolidated by high pressure torsion / Jenei, P., Gubicza, J., Yoon, E. Y. et al. // Composites Part A: Applied Science and Manufacturing. – 2013. – Vol. No. – 51. P. 71–79.
135. Nuno, Silvestre. State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites / Nuno, Silvestre // International Journal of Composite Materials, 2013. – Vol. 3. – No. 6A. – P. 28–44.

Одержано 06.12.2024

STATE OF THE ISSUE REGARDING THE POSSIBILITY OF ENHANCING THE CHARACTERISTICS OF HIGH-TEMPERATURE COMPOSITES

Sergiy Byelikov

Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Transport Technologies, Zaporizhia Polytechnic National University, Zaporizhia, Ukraine, *e-mail: belikov@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9510-8190

Valeriy Vinichenko

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physical Material Science, of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valeryi_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822

Oleksandr Korobko	Senior teacher, Department of Occupational Safety and Environmental Protection, of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>sany.kor.17@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0001-9461-7762
Vadim Shalomееv	Dr. Sc., Professor, Vice-Rector for Research, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>shalomeev@zntu.edu.ua</i> , ORCID: 0000-0002-6091-837X
Dmytro Parkhisenko	Postgraduate of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>aviapdi@gmail.com</i> , ORCID: 0009-0004-2100-8201
Anatoliy Ershov	Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail</i> : <i>eav.nuzp@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0002-9485-4896

Purpose. To compile a scientific and technical review of the state of the art, achievements and prospects for development in the field of composites for use in the aerospace industry and the development of technologies for their production. Summarise and critically analyse the known research results on the development and use of composites in the aerospace industry. Identify areas where further research is needed. Indicate authoritative sources of research results in the field of composites.

Research methods. A search was conducted for information on carbon-carbon, ceramic, and metal-matrix CMCs published over the past 15 years. The articles were found by searching the Internet in databases such as Scopus, Web of Science, and Google Scholar. Zotero software was used to collect, organise and cite research materials.

Results obtained. The state of the art, achievements and prospects for development in the field of high-temperature composites and the development of technologies for their production are systematised and analysed. The promising opportunities for increasing the operating temperatures of high-temperature composites are considered. The choice of the main directions of modern research on the use of composites in the aerospace industry is substantiated.

Scientific novelty. The information on the prospects of creating high-temperature composites with an increased operating temperature and the development of technologies that will increase their operating temperature and reduce technological energy consumption in the production of heat engine parts from them has been expanded.

Practical value. The information provided in this scientific and technical review can be used both for the development of new high-temperature composites and for improving the compositions and production technologies of known composite systems, for a reasonable choice of their phase components, as well as by graduate students when choosing a dissertation topic; help to formulate the objectives of the dissertation research, to choose modern methods of research.

Key words: high-temperature composites, matrix, fibres, moulding technology, nozzle extensions.

References

1. Potapov, A., Shtefan, Y., & Lichman, E. (2009). Research of material for uncooled nozzle extensions of liquid rocket engines. *Acta Astronautica*, 64(1), 22–27.
2. Gradl, P. R., & Valentine, P. (2017). Carbon-carbon nozzle extension development in support of in-space and upper-stage liquid rocket engines. In *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* (p. 5064).
3. Potapov, A. M. (2015). Kompoziti: perspektivi ispolzovaniya v raketno-kosmicheskoi tekhnike. *Kosmicheskaya nauka i tekhnologiya*, 21(5), 69.
4. Anikin, A. V., Berdov, R. D., Volkov, N. N., Volkova, L. I., Gurina, I. N., & Tsatsuev, S. M. (2019). Long-run testing of model nozzle extensions made of a carbon-carbon composite material in a liquid-propellant rocket engine operating on hydrogen and oxygen. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 60, 80–86.
5. Yu, S., Park, K., Lee, J. W., Hong, S. M., Park, C., Han, T. H., & Koo, C. M. (2017). Enhanced thermal conductivity of epoxy/Cu-plated carbon fiber fabric composites. *Macromolecular Research*, 25(6), 559–564.
6. Zhuang, Q., Zhang, P., Li, M., Yan, H., Yu, Z., & Lu, Q. (2017). Microstructure, wear resistance and oxidation behavior of Ni-Ti-Si coatings fabricated on Ti6Al4V by laser cladding. *Materials*, 10(11), 1248.
7. Zamani, P., & Valefi, Z. (2017). Microstructure, phase composition and mechanical properties of plasma sprayed Al₂O₃, Cr₂O₃ and Cr₂O₃-Al₂O₃ composite coatings. *Surface and Coatings Technology*, 316, 138–145.
8. Du, B., Hong, C., Qu, Q., Zhou, S., Liu, C., & Zhang, X. (2017). Oxidative protection of a carbon-bonded carbon fiber composite with double-layer coating of MoSi₂-SiC whisker and TaSi₂-MoSi₂-SiC whisker by slurry method. *Ceramics International*, 43(12), 9531–9537.
9. Ma XiaoJun, M. X., Zhou WanRu, Z. W., & Chen Yin, C. Y. (2017). Structure and photocatalytic properties of Mn-doped TiO₂ loaded on wood-based activated carbon fiber composites.
10. Farrokhzad, M. A. (2017). High temperature oxidation behaviour of autocatalytic Ni-P-BN (h) coatings. *Surface and Coatings Technology*, 309, 390–400.

11. Jia, Y., Li, H., Feng, L., Sun, J., Li, K., & Fu, Q. (2016). Ablation behavior of rare earth La-modified ZrC coating for SiC-coated carbon/carbon composites under an oxyacetylene torch. *Corrosion Science*, 104, 61–70.
12. Huo, C., Guo, L., Feng, L., Wang, C., Li, Z., Zhang, Y., & Kou, G. (2017). Improving the oxidation resistance under thermal shock condition of SiC-coated C/C composites with refined SiC grain size using ferrocene. *Surface and Coatings Technology*, 316, 39–47.
13. Doganli, G., Yuzer, B., Aydin, I., Gultekin, T., Con, A. H., Selcuk, H., & Palamutcu, S. (2016). Functionalization of cotton fabric with nanosized TiO₂ coating for self-cleaning and antibacterial property enhancement. *Journal of Coatings Technology and Research*, 13, 257–265.
14. Yong, X., Cao, L., Huang, J., Kong, W., Su, J., Li, C., ... & Liu, J. (2017). Microstructure and oxidation protection of a MoSi₂/SiO₂-B₂O₃-Al₂O₃ coating for SiC-coated carbon/carbon composites. *Surface and Coatings Technology*, 311, 63–69.
15. Zhang, Y. P., Shen, Y. H., Chen, W. W., Cheng, H. W., & Wang, L. (2017, July). Preparation of continuous Al₂O₃/Y₂O₃ coating on carbon fiber by a novel aqueous plasma electrolysis. In *Materials Science Forum*, 898, 1575–1582. Trans Tech Publications Ltd.
16. Li, L. (2015). Damage evolution and life prediction of cross-ply C/SiC ceramic-matrix composite under cyclic fatigue loading at room temperature and 800 C in air. *Materials*, 8(12), 8539–8560.
17. Huang, X., Sun, S., Tu, G., Lu, S., Li, K., & Zhu, X. (2017). The Microstructure of Nanocrystalline TiB₂ Films Prepared by Chemical Vapor Deposition. *Materials*, 10(12), 1425.
18. Szczurek, A., Barcikowski, M., Leluk, K., Babiarczuk, B., Kaleta, J., & Krzak, J. (2017). Improvement of interaction in a composite structure by using a sol-gel functional coating on carbon fibers. *Materials*, 10(9), 990.
19. Tatarko, P., Casalegno, V., Hu, C., Salvo, M., Ferraris, M., & Reece, M. J. (2016). Joining of CVD-SiC coated and uncoated fibre reinforced ceramic matrix composites with pre-sintered Ti₃SiC₂ MAX phase using Spark Plasma Sintering. *Journal of the European Ceramic Society*, 36(16), 3957–3967.
20. Januś, M., Kyzioł, K., Kluska, S., Konefał-Góral, J., Małek, A., & Jonas, S. (2015). Plasma assisted chemical vapour deposition-technological design of functional coatings. *Archives of Metallurgy and Materials*, 60.
21. Jonas, S., Januś, M., Jaglarz, J., & Kyzioł, K. (2016). Formation of SixNy (H) and C: N: H layers by plasma-assisted chemical vapor deposition method. *Thin Solid Films*, 600, 162–168.
22. Lee, E. S., Lee, C. H., Chun, Y. S., Han, C. J., & Lim, D. S. (2017). Effect of hydrogen plasma-mediated surface modification of carbon fibers on the mechanical properties of carbon-fiber-reinforced polyetherimide composites. *Composites Part B: Engineering*, 116, 451–458.
23. Guo, Z., Sang, L., Wang, Z., Chen, Q., Yang, L., & Liu, Z. (2016). Deposition of copper thin films by plasma enhanced pulsed chemical vapor deposition for metallization of carbon fiber reinforced plastics. *Surface and Coatings Technology*, 307, 1059–1064.
24. Wang, J., Lin, W., Yan, X., Wu, X., Wu, F., & Yang, Y. (2016). Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology. *Materials & Design*, 89, 928–932.
25. Figueira, R. B., Callone, E., Silva, C. J., Pereira, E. V., & Dirè, S. (2017). Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions. *Materials*, 10(3), 306.
26. Xiang, Y., Li, X., Du, A., Wu, S., Shen, J., & Zhou, B. (2017). Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 447–454.
27. Xia, K., Lu, C., & Yang, Y. (2013). Preparation of anti-oxidative SiC/SiO₂ coating on carbon fibers from vinyltriethoxysilane by sol-gel method. *Applied Surface Science*, 265, 603–609.
28. Wang, J., Lin, W., Yan, X., Wu, X., Wu, F., & Yang, Y. (2016). Preparation and microstructure of Al₂O₃-SiO₂-TiO₂ coating on three-dimensional braided carbon fiber by sol-gel technology. *Materials & Design*, 89, 928–932.
29. Figueira, R. B., Callone, E., Silva, C. J., Pereira, E. V., & Dirè, S. (2017). Hybrid coatings enriched with tetraethoxysilane for corrosion mitigation of hot-dip galvanized steel in chloride contaminated simulated concrete pore solutions. *Materials*, 10(3), 306.
30. Xiang, Y., Li, X., Du, A., Wu, S., Shen, J., & Zhou, B. (2017). Timing of polyethylene glycol addition for the control of SiO₂ sol structure and sol-gel coating properties. *Journal of Coatings Technology and Research*, 14, 447–454.
31. Yang, G., Huang, Z., Wang, X., & Wang, B. (2018). Fabrication and anti-oxidation ability of SiC-SiO₂ coated carbon fibers using sol-gel method. *Materials*, 11(3), 350.
32. Improvement of carbon fiber oxidation resistance by thin ceramic coating using silica particles. / Kira, Kohei, et al. *Carbon*, 2024, Vol. No. 228. P. 119417.
33. Li, Y., Guo, L., Li, H., Ma, H., & Song, Q. (2017). Effects of carbon nanotubes by electrophoretic deposition on interlaminar properties of two dimensional carbon/carbon composites. *Journal of Wuhan University of Technology-Mater. Sci. Ed.*, 32(5), 994–1000.
34. Volkmann, E., Tushtev, K., Koch, D., Wilhelmi, C., Göring, J., & Rezwani, K. (2015). Assessment of three oxide/oxide ceramic matrix composites: mechanical performance and effects of heat treatments. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 68, 19–28.
35. Pritzkow, W., Nöth, A., & Rüdinger, A. (2015). Oxide ceramic matrix composites-manufacturing, machining, properties and industrial applications.
36. Zoli, L., Vinci, A., Galizia, P., Melandri, C., & Sciti, D. (2018). On the thermal shock resistance and

mechanical properties of novel unidirectional UHTCMCs for extreme environments. *Scientific Reports*, 8(1), 1–9.

37. Mungiguerra, S., Di Martino, G. D., Savino, R., Zoli, L., Sciti, D., & Lagos, M. A. (2018). Ultra-high-temperature ceramic matrix composites in hybrid rocket propulsion environment. In 2018 international energy conversion engineering conference, 4694.

38. Bogomol, Yu. I. (2019). Fiziko-himichni osnovi keruvannya strukturoyu ta vlastivostyami armovanih keramichnih materialiv dlya roboti v ekstremalnih umovah ekspluatatsiyi.

39. Wang, Z., Yang, X., Zhao, J., Zhu, Z., Wang, Y., & Zhang, J. (2019). Microstructure and properties of directionally solidified LaB₆ (100)-ZrB₂ eutectic composite prepared by the optical zone melting method. *Journal of the European Ceramic Society*, 39(5), 1803–1809.

40. Yang, X., Wang, P., Wang, Z., Hu, K., Cheng, H., Li, Z., & Zhang, J. (2017). Microstructure, mechanical and thermionic emission properties of a directionally solidified LaB₆-VB₂ eutectic composite. *Materials & Design*, 133, 299–306.

41. Berger, M. H., Back, T. C., Soukiassian, P., Martinotti, D., Douillard, L., Fairchild, S. B., ... & Sayir, A. (2017). Local investigation of the emissive properties of LaB₆-ZrB₂ eutectics. *Journal of materials science*, 52, 5537–5543.

42. Demirskyi, D., & Sakka, Y. (2014). In situ fabrication of B₄C-NbB₂ eutectic composites by spark-plasma sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 97(8), 2376–2378.

43. Demirskyi, D., Sakka, Y., & Vasylyk, O. (2016). High-strength B₄C-TaB₂ eutectic composites obtained via in situ by spark plasma sintering. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(7), 2436–2441.

44. Demirskyi, D., & Vasylyk, O. (2017). Analysis of the high-temperature flexural strength behavior of B₄C-TaB₂ eutectic composites produced by in situ spark plasma sintering. *Materials Science and Engineering: A*, 697, 71–78.

45. Demirskyi, D., Sakka, Y., & Vasylyk, O. (2015). Consolidation of B₄C-VB₂ eutectic ceramics by spark plasma sintering. *Journal of the Ceramic Society of Japan*, 123(1443), 1051–1054.

46. Demirskyi, D., & Vasylyk, O. (2016). Mechanical properties of SiC-NbB₂ eutectic composites by in situ spark plasma sintering. *Ceramics International*, 42(16), 19372–19385.

47. Loboda, P. I. (2018). Structure and properties of reinforced ceramic materials produced by directional solidification. *Powder Metallurgy and Metal Ceramics*, 57, 13–26.

48. Chen, W. T., White, R. M., Goto, T., & Dickey, E. C. (2016). Directionally solidified boride and carbide eutectic ceramics. *Journal of the American Ceramic Society*, 99(6), 1837–1851.

49. LLorca, J., & Orera, V. M. (2006). Directionally solidified eutectic ceramic oxides. *Progress in materials science*, 51(6), 711–809.

50. Лобода П.І. Спрямовано закристалізовані бориди. К.: Праймдрук, 2012. 395 с.

51. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Solovjova, T. O. (2013). Vpliv mehanichnih kolivan na formuvannya mikrostrukturi monokristaliv i keramichnih kompozitiv pid chas viroshuvannya z rozplavu. *Naukovi visti Nacionalnogo tehnicnogo universitetu Ukrayini Kiyivskij politehnicnij institut*, (6), 65–72.

52. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Solovjova, T. O. (2012). Vpliv ultrazvuku na strukturu i vlastivosti spryamovano zakristalizovanih evtektichnih splaviv. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (4), 23–28.

53. Remizov D. O., Bogomol, Yu. I., Loboda P. I. (2020). Influence of structural and geometric characteristics of phase components on the mechanical properties of the eutectic Ti-TiB composition crystallized from the melt, *Problems of Friction and Wear*, 2, 87, 68–77.

54. Bogomol, I., Badica, P., Shen, Y., Nishimura, T., Loboda, P., & Vasylyk, O. (2013). Room and high temperature toughening in directionally solidified B₄C-TiB₂ eutectic composites by Si doping. *Journal of alloys and compounds*, 570, 94–99.

55. Oliete, P. B., Peña, J. I., Larrea, A., Orera, V. M., LLorca, J., Pastor, J. Y., ... & Segurado, J. (2007). Ultra-high-strength nanofibrillar Al₂O₃-YAG-YSZ eutectics. *Advanced Materials*, 19(17), 2313–2318.

56. Bogomol, Yu. I., Loboda, P. I., & Golovenko, Ya. B. (2015). Struktura ta vlastivosti kvazipotrijnih spryamovano armovanih kompozitiv sistemi V₄S-TiB₂-SiC. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (2), 37.

57. Bogomol I. (2019). High-temperature mechanical behaviour of the directionally solidified ceramic eutectics. *International Conference on the Cooperation and Integration of Industry, Education, Research, and Application*. Nanchang, China. P. 38–39.

58. Kruger M., Hasemann G., Bogomol I., Loboda P. I. (2013). Multiphase Mo-Si-B Alloys Processed by Directional Solidification. *Materials Research Society Symposium Proceeding*, 1516, 1684–1689.

59. Hasemann, G., Bogomol, I., Schliephake, D., Loboda, P. I., & Krüger, M. (2014). Microstructure and creep properties of a near-eutectic directionally solidified multiphase Mo-Si-B alloy. *Intermetallics*, 48, 28–33.

60. Bogomol, Yu. I., Popovich, O. I., Kryuger, M., Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., Popovich, O. I., ... & Loboda, P. I. (2016). Struktura i vlastivosti spryamovano zakristalizovanogo splavu sistemi Mo-8, 7 Si-18 V.

61. Hasemann, G., Kaplunenko, D., Bogomol, I., & Krüger, M. (2016). Near-eutectic ternary Mo-Si-B alloys: microstructures and creep properties. *JOM*, 68, 2847–2853.

62. Upatov, M. I., Bogomol, Yu. I., Bolbut, V. V., & Loboda, P. I. (2018). Vpliv peremishuvannya rozplavu na strukturu ta vlastivosti spryamovano zakristalizovanogo splavu Mo-17, 5Si-8B. *Metaloznavstvo ta obrobka metaliv*, (1), 22–29.

63. Bogomol, I., Borodianska, H., Zhao, T., Nishimura, T., Sakka, Y., Loboda, P., & Vasylyk, O. (2014). A dense and tough (B₄C-TiB₂)-B₄C 'composite within a composite' produced by spark plasma sintering. *Scripta Materialia*, 71, 17–20.

64. Gusarova I.O., Potapov O.M., Solodkii Є.V., Bogomol Yu.I. (2018). Oderzhannya kompozitu B_4C-TiB_2 z izotropnoyu yevtektichnoyu mikrostrukturoyu ta yogo vlastivosti. Poroshkova metalurgiya, 03/04, 108–116.
65. Sposib otrimannya keramichnykh polikristalichnykh materialiv na osnovi karbidu boru metodom yelektrozryadnogo spikannya: pat. 87076 Ukraïna, № u201307486; declared 12.06.2013; published 27.01.2014, Byul. № 2.
66. Sposib otrimannya keramichnogo bronematerialu na osnovi karbidu boru ta diboridu titanu: pat. 114502 Ukraïna, № u201609558; declared 16.09.2016; published 10.03.2017, Byul. № 5.
67. Antonenko O.O., Bogomol Yu.I. (2019). Doslidzhennya vlastivostei i strukturi metalokeramichnykh kompozitiv sistemi B_4C-TiB_2-Al / Zbirka tez dopovidei KhII Mizhnarodnoi konferentsii studentiv, aspirantiv ta molodik vchenikh "Perspektivni tekhnologii na osnovi novitnykh fiziko-materialoznavchikh doslidzhen ta komp'yuternogo konstruyuvannya materialiv, 18–19 kvitnya roku Kiïv, Ukraïna, 183–185.
68. Antonenko O.O., Bogomol Yu.I. (2019). Doslidzhennya vlastivostei i strukturi metalokeramichnykh kompozitiv sistemi B_4C-TiB_2-Cu / Materiali XI Mizhnarodnoi naukovy-tekhnichnoi konferentsii «Novi materialy i tekhnologii v mashinobuduvanni», KPI im. Igorya Sikorskogo, m. Kiïv, 30–31 travnya, 21.
69. Zahorodnia E.V., Loboda P.I., Bohomol Yu.I., Solodkyi Ye.V., Zyma R.A. (2011). Mikrostruktura ta mekhanichni vlastyvosti evtektichnogo splavu LaB_6-TiB_2 oderzhanoho elektroozryadnym spikanniam. Metalofizyka i novitni tekhnologii, 33. Spetsvypusk. 351–360.
70. Sposib otrymannya keramichnykh evtektichnykh polikristalichnykh materialiv metodom elektroozryadnogo spikannya: pat. 74036 Ukraina, № u201205104; declared 24.04.2012 ; published 10.10.2012, Biul. № 19.
71. Loboda, P. I., Bogomol, Yu. I., & Bilij, O. I. (2015). Struktura ta vlastivosti rozpylenih poroshkiv evtektichnogo splavu V_4S-TiV_2 . Metaloznavstvo ta obrobka metaliv, (3), 46–52.
72. Loboda P.I., Soloviova T.O., Bogomol Yu.I., Remizov D.O., Bilyi O.I. (2015). Effect of the Crystallization Kinetic Parameters on the Structure and Properties of a Eutectic Alloy of the LaB_6-TiB_2 System. Journal of Superhard Materials, 37, 394–401.
73. Sposib otrymannya keramichnykh evtektichnykh poroshkiv na osnovi heksaborydu lantanu metodom vidtsentrovoho plazmovoho rozpylennia: pat. 99564 Ukraina, № u201414167; declared 30.12.2014; published.10.06.2015, Biul. № 11.
74. Sposib otrymannya keramichnykh evtektichnykh poroshkiv na osnovi karbidu boru metodom vidtsentrovoho plazmovoho rozpylennia: pat. 99563 Ukraina, № u201414166; declared 30.12.2014 ; published 10.06.2015, Biul. № 11.
75. Trosnikova, I. Y., Loboda, P. I., Karasevska, O. P., & Bilyi, O. I. (2014). Effect of the cooling rate during melt solidification on the structure and properties of WC–W 2 C. Powder Metallurgy and Metal Ceramics, 52, 674–679.
76. Vasylykiv, O., Borodianska, H., Badica, P., Grasso, S., Sakka, Y., Tok, A., ... & Ma, J. (2012). High hardness B a C b-(B x O y/BN) composites with 3D mesh-like fine grain-boundary structure by reactive spark plasma sintering. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 12(2), 959–965.
77. Badica, P., Borodianska, H., Xie, S., Zhao, T., Demirskyi, D., Li, P., ... & Vasylykiv, O. (2014). Toughness control of boron carbide obtained by spark plasma sintering in nitrogen atmosphere. Ceramics International, 40(2), 3053–3061.
78. Llorca J., Orera V.M. (2006). Directionally solidified eutectic ceramic oxides. Progress in Materials Science, 51, 711–809.
79. Kobylinskyi Yu.V., Bolbut V.V., Bohomol Yu.I., Loboda P.I. (2016). Vplyv termichnoi obrobky na mekhanichni vlastyvosti ta na vnutrishni napruzhennia v spriamovano zakrystalizovanomu evtektichnomu splavu B_4C-TiB_2 . VIII Mizhnarodna naukovy-tekhnichna konferentsiia "Novi materialy i tekhnologii v mashinobuduvanni". 77–78.
80. Dub, S. N., Loboda, P. I., Bogomol, Y. I., Tolmacheva, G. N., & Tkach, V. N. (2013). Mechanical properties of HfB₂ whiskers. Journal of Superhard Materials, 35, 234–241.
81. Dub S.N., Sichkar S.M., Bilous V., Tolmachova G.N., Loboda P.I., Bogomol I., Kysla G.P. (2017). Mechanical properties of single crystals of transition metals diborides TMB_2 (TM = Sc, Hf, Zr, Ti). Experiment and theory. Journal of Superhard Materials, 39, 308–318.
82. Soloviova. T., Karasevska O. P., Vleugels J., Loboda P. I. (2017). Influence of annealing on crucible-free float zone melted LaB_6-TiB_2 composites. Journal of Alloys and Compounds, 729, 749–757.
83. Karadimas, G., & Salonitis, K. (2023). Ceramic matrix composites for aero engine applications—a review. Applied Sciences, 13(5), 3017.
84. Wang, L., Liu, S., Gou, J., Zhang, Q., Zhou, F., Wang, Y., & Chu, R. (2019). Study on the wear resistance of graphene modified nanostructured Al_2O_3/TiO_2 coatings. Applied Surface Science, 492, 272–279.
85. Aviation, G. E. (2015). GE Successfully Tests World's First Rotating Ceramic Matrix Composite Material for Next-Gen Combat Engine. GE Aviation. Available online: <https://www.geaerospace.com/press-release/military-engines/ge-successfully-tests-worlds-first-rotating-ceramic-matrix-composite> (accessed on 31 December 2022).
86. Cavdar, U., Altintaş, A., & Karaca, B. (2018). In-situ compaction and sintering of $Al_2O_3-B_4C$ composites by using a High-Frequency Induction System. Metallic Materials, 56, 177–181.
87. Lin, X., & Darrell Ownby, P. (2000). Pressureless sintering of B_4C whisker reinforced Al_2O_3 matrix composites. Journal of materials science, 35(2), 411–418.
88. Doorbar, P. J., & Kyle-Henney, S. (2018). 4.19 development of continuously-reinforced metal matrix composites for aerospace applications. Compr. Compos. Mater, 4, 439–463.

89. Pleskach, V. M., & Olshaneckij, V. Yu. (2019). Zharomicni kompoziti na metalevij, intermetalidnij i keramichnij osnovi. Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni, (1), 87–89.
90. Vinichenko V. S., Kononenko Yu. Y., Olshanetskiy V. E., Orlov M. R. (2004). Yssledovanye vliyaniya tekhnolohyy proizvodstva shtabykov na sklonnost provoloky yz torygovannykh volframorenyevykh splavov k rassloenyiu, Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni, (1), 84–88.
91. Korobko, A. V., & Lavrenko, A. S. (2012). O formirovannii listovykh vysokotemperaturnykh metallokompozitov s matricami na osnove niobiya, uprochnennykh tugoplavkimi volframovymi voloknami. Novi materiali i tehnologiyi v metalurgiyi ta mashinobuduvanni, (1), 52–54.
92. Sudakov, A. I., & Gerashenko, V. V. (2016). Perspektivy primeneniya kompozicionnykh materialov v raketostroeniii. Aktualnye problemy aviacii i kosmonavtiki, 1(12), 173–174.
93. Konoval, V. P. (2015). Stojkost k vysokotemperaturnomu okisleniyu kompozicionnykh materialov i pokrytij na osnove diborida titana–hroma. Dopovidi Nacionalnoyi akademiyi nauk Ukrayini, (5), 83–89.
94. Coenen, J. W., Huber, P., Lau, A., Raumann, L., Schwalenberg, D., Mao, Y., ... & Neu, R. (2021). Tungsten fiber reinforced tungsten (Wf/W) using yarn based textile preforms. *Physica Scripta*, 96(12), 124063.
95. Riesch, J., Aumann, M., Coenen, J. W., Gietl, H., Holzner, G., Höschen, T., ... & Neu, R. (2016). Chemically deposited tungsten fibre-reinforced tungsten—The way to a mock-up for divertor applications. *Nuclear Materials and Energy*, 9, 75–83.
96. D. Schwalenberg & Neu, R. (2022). Large-scale tungsten fibre-reinforced tungsten and its mechanical properties. *Journal of Nuclear Engineering*, 3(4), 306–320.
97. Coenen, J. W. (2020). Fusion materials development at Forschungszentrum Jülich. *Advanced Engineering Materials*, 22(6), 1901376.
98. Coenen, J. W., Lee, V. Y., Mao, Y., Morrison, A., Dorow-Gerspach, D., Tan, X., ... & Linsmeier, C. (2023). Evolution of Tungsten Fiber-Reinforced Tungsten—Remarks on Production and Joining. *Advanced Engineering Materials*, 25(19), 2300569.
99. Lee, C., Wei, X., Kysar, J. W., & Hone, J. (2008). Measurement of the elastic properties and intrinsic strength of monolayer graphene. *science*, 321(5887), 385–388.
100. Kurita, H., Miyazaki, T., Kawasaki, A., Lu, Y., & Silvain, J. F. (2015). Interfacial microstructure of graphite flake reinforced aluminum matrix composites fabricated via hot pressing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 73, 125–131.
101. Mu, X. N., Cai, H. N., Zhang, H. M., Fan, Q. B., Zhang, Z. H., Wu, Y., ... & Wang, D. D. (2018). Interface evolution and superior tensile properties of multi-layer graphene reinforced pure Ti matrix composite. *Materials & design*, 140, 431–441.
102. Zhang, Y., Heim, F. M., Bartlett, J. L., Song, N., Isheim, D., & Li, X. (2019). Bioinspired, graphene-enabled Ni composites with high strength and toughness. *Science Advances*, 5(5), eaav5577.
103. Xiong, B., Peng, F., Chen, W., Li, C., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Cheng, D. (2023). Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nano-phases. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 6886–6897.
104. Xiong, B., Liu, K., Xiong, W., Wu, X., & Sun, J. (2020). Strengthening effect induced by interfacial reaction in graphene nanoplatelets reinforced aluminum matrix composites. *Journal of Alloys and Compounds*, 845, 156282.
105. Zhou, W., Mikulova, P., Fan, Y., Kikuchi, K., Nomura, N., & Kawasaki, A. (2019). Interfacial reaction induced efficient load transfer in few-layer graphene reinforced Al matrix composites for high-performance conductor. *Composites Part B: Engineering*, 167, 93–99.
106. Tjong, S. C. (2013). Recent progress in the development and properties of novel metal matrix nanocomposites reinforced with carbon nanotubes and graphene nanosheets. *Materials Science and Engineering: R: Reports*, 74(10), 281–350.
107. Xiong, B., Cheng, D., Zheng, F., Peng, F., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Wang, Z. (2024). Strengthening mechanisms in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composite. *Journal of Alloys and Compounds*, 970, 172600.
108. Tang, Y., & Guo, X. (2020). Role of deformation temperature and strain rate on microstructural evolution of hot compressed Nb–Si based ultrahigh temperature alloy. *Intermetallics*, 119, 106719.
109. Guo, Y., Li, Z., He, J., Su, H., Jia, L., Zhang, J., ... & Zhang, H. (2020). Surface microstructure modification of hypereutectic Nb–Si based alloys to improve oxidation resistance without damaging fracture toughness. *Materials Characterization*, 159, 110051.
110. Liu, W., Ren, X., Li, N., Gao, C., & Xiong, H. (2021). Rapid directionally solidified microstructure characteristic and fracture behaviour of laser melting deposited Nb–Si–Ti alloy. *Progress in Natural Science: Materials International*, 31(1), 113–120.
111. Fang, X., Guo, X., & Qiao, Y. (2020). Variation in morphology and crystallographic orientation of directionally solidified Nb–Si based alloys at high withdrawal rates. *Journal of Alloys and Compounds*, 819, 153023.
112. Long, W. Y., Xiong, W., & Yao, J. P. (2015). Preparation of CNTs reinforced Nb/Nb₅Si₃ in-situ composites by spark plasma sintering. *Special Casting Nonferrous Alloys*, 35, 119–123.
113. Xiong, B., Wang, C., Liu, K., Wang, Z., Xie, Z., Zhang, T., & Li, X. (2021). Interfacial phase induced load transfer in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Materials Science and Engineering: A*, 799, 140156.
114. Xiong, B., Peng, F., Wang, C., Liu, K., & Wang, Z. (2021). Strengthening mechanisms in short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial

- reaction. *Materials Science and Engineering: A*, 825, 141884.
115. Wang, Q., Wang, Q., Chen, R., Wang, X., Su, Y., & Fu, H. (2023). Synergistic effects of Fe and C on microstructure and properties of Nb-Ti-Si based alloys. *Journal of Alloys and Compounds*, 936, 168167.
116. Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R., Chen, D., & Fu, H. (2023). Ultra-fine Nb₅Si₃/Nb₅Si₃ in situ composites with remarkable properties prepared by ultrasonic melt treatment. *Journal of Alloys and Compounds*, 940, 168940.
117. Sun, G., Jia, L., Ye, C., Jin, Z., Wang, Y., Li, H., & Zhang, H. (2021). Balancing the fracture toughness and tensile strength by multiple additions of Zr and Y in Nb-Si based alloys. *Intermetallics*, 133, 107172.
118. Sala, K., & Mitra, R. (2021). Effect of Ti addition and microstructural evolution on toughening and strengthening behavior of as cast or annealed Nb-Si-Mo based hypoeutectic and hypereutectic alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 52, 3436–3459.
119. Wang, Q., Wang, Q., Chen, R., Wang, X., Su, Y., & Fu, H. (2023). Improving the mechanical properties of Nb-24Ti-16Si-2Al alloy by adding Zr and Fe to regulate silicide. *Materials Characterization*, 196, 112566.
120. Ye, C., Li, H., Jia, L., Jin, Z., Sun, G., & Zhang, H. (2021). Improvement of fracture toughness of Nb-Si alloy by two-step heat treatment. *International Journal of Refractory Metals and Hard Materials*, 94, 105378.
121. Zhou, Z., Wang, Q., Chen, R., Zhao, T., Chen, D., & Su, Y. (2022). Microstructure evolution and mechanical properties of as-cast and ultrasonic treated Nb-16Si-xCr alloys. *Journal of Materials Research and Technology*, 17, 2856–2863.
122. Chen, D., Wang, Q., Chen, R., Zhou, Z., Su, Y., & Fu, H. (2022). Effect of Ni on microstructures and mechanical properties for Multielemental Nb-Si-based alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 53(5), 1793–1805.
123. Chen, D., Wang, Q., Chen, R., Zhou, Z., Su, Y., Guo, J., & Fu, H. (2022). Microstructure evolution and mechanical properties of ZrC-added Nb-16Si-20Ti alloys. *Materials Science and Engineering: A*, 829, 142159.
124. Yin, X., Liang, J., Jia, X., Chen, S., Shang, S., Sui, Y., & Liu, C. (2022). Strengthening and toughening effect of laser melting deposited Nb-16Si-20Ti-3Al with nano-ZrC additions. *Materials Science and Engineering: A*, 850, 143509.
125. Grammenos, I., & Tsakiroopoulos, P. (2010). Study of the role of Al, Cr and Ti additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf base alloys. *Intermetallics*, 18(2), 242–253.
126. Grammenos, I., & Tsakiroopoulos, P. (2010). Study of the role of Mo and Ta additions in the microstructure of Nb-18Si-5Hf silicide based alloy. *Intermetallics*, 18(8), 1524–1530.
127. Jia, L., Weng, J., Sha, J., Zhou, C., & Zhang, H. (2015). A review of ultra high temperature Nb-Si based superalloys. *Mater. China*, 34, 372–382.
128. Xiong, B., Wang, Z., Peng, F., Tu, Z., Yan, Y., Zheng, F., ... & Wang, Z. (2024). Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Intermetallics*, 174, 108440.
129. Xiong, B., Wang, C., Xiong, Y., Xie, D., & Zhang, X. (2019). Effects of sintering temperature on interface and mechanical properties of short carbon fiber reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites fabricated by spark plasma sintering. *Intermetallics*, 108, 66–71.
130. Xiong, B., Peng, F., Chen, W., Li, C., Zhu, Q., Niu, Z., ... & Cheng, D. (2023). Outstanding strength and toughness in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites with interfacial nano-phases. *Journal of Materials Research and Technology*, 25, 6886–6897.
131. Xiong, B., Wang, Z., Peng, F., Tu, Z., Yan, Y., Zheng, F., & Wang, Z. (2024). Evading strength and toughness trade-off in graphene reinforced Nb/Nb₅Si₃ composites. *Intermetallics*, 174, 108440.
132. Nieto, A., Agarwal, A., Lahiri, D., Bisht, A., & Bakshi, S. R. (2021). *Carbon nanotubes: reinforced metal matrix composites*. CRC press.
133. Bachmaier, A., & Pippan*, R. (2013). Generation of metallic nanocomposites by severe plastic deformation. *International materials reviews*, 58(1), 41–62.
134. Jenei, P., Gubicza, J., Yoon, E. Y., Kim, H. S., & Lábár, J. L. (2013). High temperature thermal stability of pure copper and copper-carbon nanotube composites consolidated by high pressure torsion. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 51, 71–79.
135. Silvestre, N. (2013). State-of-the-art review on carbon nanotube reinforced metal matrix composites. *International Journal of Composite Materials*, 3(6A), 28–44.

УДК 669.046.587.4

- Андрій Борковських аспірант кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: aayy6491@gmail.com, ORCID: 0000-0003-3662-0597
- Сергій Лушин канд. фіз.-мат. наук, доцент кафедри фізики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: luschin@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0003-2135-0520
- Микола Борковських інженер, м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: borkovskihnikolaj@gmail.com, ORCID: 0009-0000-8283-4620

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОТРИМАННЯ АЛЮМІНІЄВО-ЦИРКОНІЄВОЇ ЛІГАТУРИ МЕТАЛОТЕРМІЧНИМ СПОСОБОМ ІЗ ФТОРИДНО-ХЛОРИДНОГО РОЗПЛАВУ

Мета роботи. Розробка методу промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву.

Методи дослідження. Експериментальний метод отримання лігатури. Спектротричний аналіз. Теоретичний аналіз.

Отримані результати. Розроблено метод промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву. Алюмінотермічне відновлення оксиду цирконію з метою отримання алюмінієво-цирконієвих сплавів було вибрано як найбільш економічно доцільний метод. Наведено результати дослідно-промислового виробництва лігатури та вплив технологічних параметрів на техніко-економічні показники процесу. Проведено лабораторні випробування для оцінки оптимальних технологічних параметрів процесу алюмотермії. На отриманих металевих зразках виконувалося спектротричне визначення вмісту цирконію та проводився розрахунок повноти його вилучення. На основі отриманих результатів була обрана принципова технологічна схема для отримання лігатури з вмістом цирконію 5%. Встановлено, що зі зменшенням температури нагріву розплаву флюсу вилучення цирконію в алюмінієвій розплав збільшується. З метою підвищення вилучення цирконію було запропоновано введення флюсу для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури в роздавальну піч до введення в розплав алюмінію алюмінієво-цирконієвої лігатури.

Наукова новизна. Показано, що найбільша розчинність оксиду цирконію в криоліті спостерігається при криолітному числі рівному 3,0. Це підтверджує, що розчинником оксиду цирконію (як оксиду алюмінію) є іон AlF^6+ . При зниженні температури процесу та збільшенні часу перемішування розплаву вилучення цирконію в лігатуру зростає. При вивченні різних способів введення шихти в піч максимальне вилучення цирконію в лігатуру в лабораторних дослідках досягнуто при введенні алюмінієвих гранул у сольовий розплав і досягало 92–93%. Попередня обробка розплаву алюмінію в роздавальній печі флюсом від отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури дозволяє досягти 99,5% вилучення цирконію із ZrO_2 .

Практична цінність. Наведено результати дослідно-промислового виробництва алюмінієво-цирконієвої лігатури металотермічним способом із фторидно-хлоридного розплаву на наявному пічному устаткуванні заводу з виробництва провідниково-кабельної продукції ТОВ «Крок ГТ» та вплив технологічних параметрів на техніко-економічні показники технологічного процесу промислового отримання лігатури.

Ключові слова: лігатура, алюміній, цирконій, алюмінотермія, фторидно-хлоридний розплав, флюс, вилучення.

Вступ

Алюмінієві сплави з різними легуючими елементами завдяки своїм унікальним властивостям знайшли широке застосування в різних галузях промисловості: авіабудуванні, машинобудуванні, електротехніці тощо. Розвиток застосування різних виробів на основі алюмінієвих сплавів визначається наявністю технології їх виготовлення або можливістю розробки такої технології з прийнятними технічними та економічними показниками.

Серед іншого, досягнення високих експлуатаційних характеристик алюмінієвих сплавів ґрунтується

на використанні відповідних лігатур. Чим вищі вимоги пред'являються до споживчих властивостей кінцевого продукту, тим суворіші вимоги до прецизійності складу сплаву, стабільності технологічних параметрів його отримання та подальшої обробки.

Прецизійність складу, у свою чергу, визначається рядом властивостей сировини та матеріалів (хімічний, фазовий, гранулометричний склад тощо), та технологічними параметрами процесів сплавлення, таких як температура, тривалість процесу, необхідність перемішування або, навпаки, створення умов для седиментації гетерофазної системи «розп-

лав–кристали». На все це накладаються обмеження щодо досягнення економічної ефективності процесу в цілому.

Аналіз досліджень та публікацій

Розроблено та пройшли промислові випробування три способи отримання лігатур алюмінію з рідкісними та рідкісноземельними металами (РМ та РЗМ): пряме сплавлення, алюмініотермічне відновлення легуючих металів з їх солей та оксидів, а також електролітичне отримання лігатур [1–3].

Пряме сплавлення, яке передбачає попереднє отримання рідкісного та рідкісноземельного металу в металевому стані, дозволяє точно контролювати склад лігатури, але веде до підвищення собівартості процесу, оскільки вартість металу завжди значно вища, ніж його сполук з іншими елементами. Крім того, для сплавлення алюмінію з набагато більш тугоплавкими РМ або РЗМ необхідно створювати вищі температури порівняно з температурами переробки власне алюмінію та його сплавів (з 750–900 °С до 1200 °С і вище) [1–3].

Отримання алюмінієвих лігатур в електролізерах обмежує можливість вмісту РМ чи РЗМ трохи більше ніж 3%. Це визначається встановленням рівноваги в системі «розплав металу–розплав кріоліту» з відповідними сполуками РМ або РЗМ. При цьому необхідні вищі температури та більші кількості кріоліту порівняно з алюмініотермічним відновленням [4, 5].

Використання алюмініотермічного методу отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур дозволяє використовувати вже встановлене промислове обладнання завдяки сумісності температур протікання процесів без його реконструкції, що є істотним фактором при прийнятті рішення про освоєння нового технологічного процесу [6–9]. Отримання сплавів алюмінію з цирконієм, гафнієм і скандієм зазвичай здійснюється шляхом введення фторцирконату (гафнату) калію в розплав хлоридів калію і натрію, після чого вводять хлорид (фторид) легуючого металу з подальшим введенням порцій алюмінієво-магнієвого сплаву [7].

Використання оксидів цирконію та гафнію для синтезу лігатури через їх низьку розчинність і високу корозійну стійкість вимагає високого відношення галогенідного розплаву до алюмінієво-магнієвого сплаву (від 1.2 до 1.6) і температури 1000 °С [7, 8]. Відновлення при більш низькій температурі та меншому співвідношенні сольового розплаву до сплаву можна проводити з використанням солей хлориду, проте це призводить до значного винесення рідкісних металів ($\text{HfCl}_4 - t_{\text{востг}} = 315 \text{ }^\circ\text{C}$; $\text{ZrCl}_4 - t_{\text{востг}} = 333 \text{ }^\circ\text{C}$) та ймовірності вибухів при розгерметизації апарату. У зв'язку з вищевикладеним, автори [10,11] пропонують переведення оксидів цих металів в оксифториди. Одержання оксифторидів з їх діоксидів виділяється в окрему стадію процесу, що полягає в обробці концентрованими розчинами плавикової кислоти. В результаті в осаді виходять $\text{Hf}(\text{Zr})\text{F}_4 \cdot n\text{H}_2\text{O}$, які при видаленні вологи на повітрі при температурі 200 °С дають оксо-

фториди. Продукти їхнього термічного розкладання мають склад: для гафнію – $\text{Hf}_4\text{F}_{12}\text{O}_2$, а для цирконію – $\text{Zr}_4\text{F}_{10}\text{O}_3$ [10–12].

Найкращими показниками характеризується спосіб алюмініотермічного відновлення цирконію з фторцирконату калію або натрію, яким досягається вилучення цирконію в лігатуру до 90–95 %. Однак через високу вартість і дефіцит фторцирконату цей спосіб не знайшов широкого промислового застосування. Найбільш доступним з цирконійвмісних сполук є оксид цирконію – ZrO_2 . Однак розчинність його у комплексних фтористих солях невисока. Так, у кріоліті при 1050 °С розчиняється всього 2,2 % [10].

Мета роботи

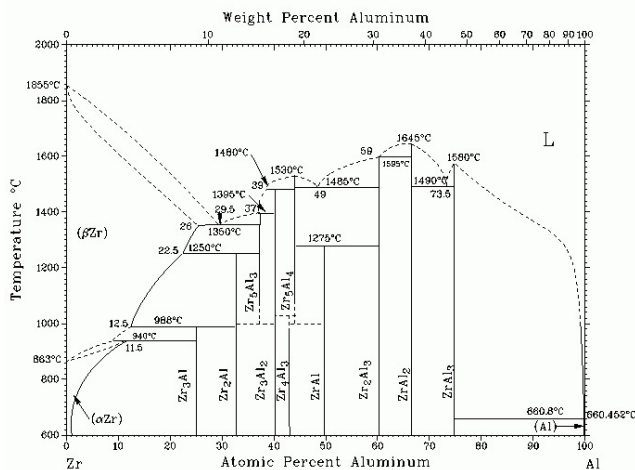
У цій роботі ставилась мета провести розробку технологічного процесу промислового отримання алюмінієво-цирконієвих лігатур на наявному пічному устаткуванні заводу з виробництва провідниково-кабельної продукції ТОВ «Крок ГТ». Технологічні параметри процесів та якісні характеристики сировини і готової алюмінієво-цирконієвої лігатури повинні забезпечувати можливість використання устаткування, що знаходиться в експлуатації, без його реконструкції. Крім того, на наявному устаткуванні було необхідно досягти порівнянних швидкостей (кг/год) виготовлення лігатури та її витрат у роздавальній печі для приготування алюмінієвого сплаву, легованого цирконієм, який може бути використаний в електротехнічній промисловості [13–15].

Таким чином, температура пічного переділу приготування алюмінієво-цирконієвої лігатури не повинна перевищувати 850–900 °С. Температура «засвоєння» лігатури у роздавальній печі також не повинна перевищувати 850–900 °С. При цьому час «засвоєння» має бути порівнянним із часом заповнення роздавальної печі розплавленим алюмінієм із шахтної печі. Під «засвоєнням» розуміється повний перехід всього цирконію в лігатуру в розчин цирконію в розплаві алюмінію без залишкової наявності фаз інтерметалідів складу Al_xZr_y або випадання цих фаз внаслідок перекристалізації. Вміст цирконію в лігатурі має бути максимально допустимим за умови виконання зазначених вимог.

Матеріал і методика досліджень

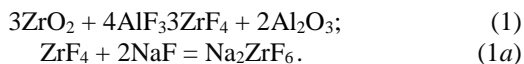
Як компоненти сольової системи при алюмініотермічному відновленні цирконію з ZrO_2 у роботі були обрані фториди натрію, фторид алюмінію та хлорид калію. Хлорид калію служить середовищем (фоном) під час проведення процесу, забезпечуючи необхідну рідкопоточність сольового розплаву при помірно високих температурах. Фториди натрію та алюмінію беруть участь у комплексоутворенні при взаємодії з простими сполуками цирконію. Фторид алюмінію, крім того, має сильну фторуєчу дію на оксиди при високих температурах процесу [16]. Для оцінки ймовірності утворення інтерметалевих сполук у досліджуваних реакціях відновлення було розглянуто діаг-

рами фазової рівноваги металевих систем. Відповідно до [17–19], система Zr–Al (рис. 1) характеризується утворенням наступних інтерметалевих сполук: AlZr, AlZr₂, AlZr₃, Al₂Zr, Al₂Zr₃, Al₃Zr, Al₃Zr₂, Al₃Zr₅, Al₄Zr₅, Al₉Zr₄. При температурах вище 1400 °C можливе утворення стабільних конгруентних інтерметалідів Al₄Zr₅, Al₂Zr, Al₃Zr.

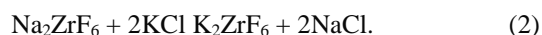


Рисунки 1. Фазова діаграма системи Zr – Al [19]

Комплексні фториди цирконію утворюються в системі NaF–ZrF₄ [19], що визначає метод їх отримання шляхом сплавлення відповідних компонентів фторидів лужних металів з фторидом цирконію:



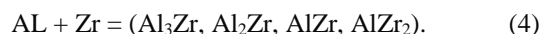
При сплавленні Na₂ZrF₆ з хлоридом калію утворюється гексофторцирконат калію:



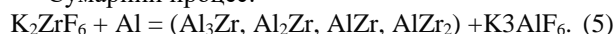
Процес алюмінотермічного відновлення фторцирконату калію протікає за реакцією:



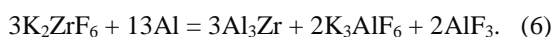
Відновлений цирконій взаємодіє з алюмінієм:



Сумарний процес:



За даними багатьох досліджень і з фотографій шліфів можна дійти невтішного висновку, що утворюється Al₃Zr [18,19]. Таким чином, за реальних умов організації процесу реакція має вигляд:

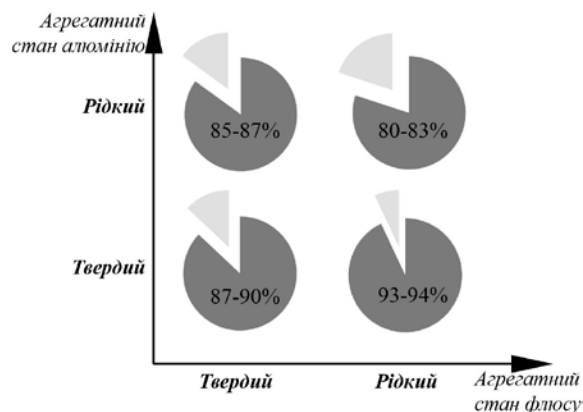


Визначення вмісту цирконію в дослідних зразках алюмінієво-цирконієвих лігатур виконувалось спектрометричним методом на іскровому спектрометрі Spectrolab.

Результати досліджень

Одержання лігатури Al–Zr проводили в печі опору САТ-0,16. (Виробник: ТОВ «ЛК «МЕЛТ», м. Мелітополь, Україна).

Для оцінки оптимальних технологічних параметрів процесу алюмотермії було проведено лабораторні випробування. Для цього в три алунові тигли була поміщена суміш сухих ZrO₂, NaF, AlF₃, KCl. Після цього тигли по черзі встановлювалися в лабораторну муфельну піч, де проводився нагрівання до обраної температури. Після досягнення заданої температури та повного розплаву флюсу вводилася розрахована кількість алюмінію у вигляді нарізаного дроту. Маса алюмінію вибиралася стехіометричною з введеним у флюс оксидом цирконію. Після введення алюмінію кожні п'ять хвилин проводилося перемішування трубкою алуновою. Одночасно з перемішуванням проводився відбір отриманого металевого розплаву цієї алунової трубкою шляхом нанесення краплі розплаву на поліровану сталеву плиту. На отриманих металевих зразках виконувалося спектрометричне визначення вмісту цирконію та проводився розрахунок повноти його вилучення. Отримані дані представлені на рис. 2.



Рисунки 2. Вилучення цирконію в лігатуру (Al–5Zr%) залежно від різного агрегатного стану компонентів шихти (без перемішування) при температурі 800–850 °C, час витримки розплаву – 20 хв. Умовні позначення: темно-сірий – відсоток вилучення Zr в лігатуру; світло-сірий – відсоток Zr, що залишився у флюсі

На основі отриманих результатів була обрана принципова технологічна схема для отримання лігатури з вмістом цирконію 5%, яка представлена на рис. 3.

Для випробування в печі опору САТ-0,16 було обрано варіант введення твердого алюмінію в розплав флюсу. Одержання алюмінієво-цирконієвої лігатури проводили для трьох температур: 850, 880 та 920 °C. Проби металевого розплаву відбиралися кожні п'ять

хвилин після розплавлення алюмінію. Результати представлені у табл. 1.

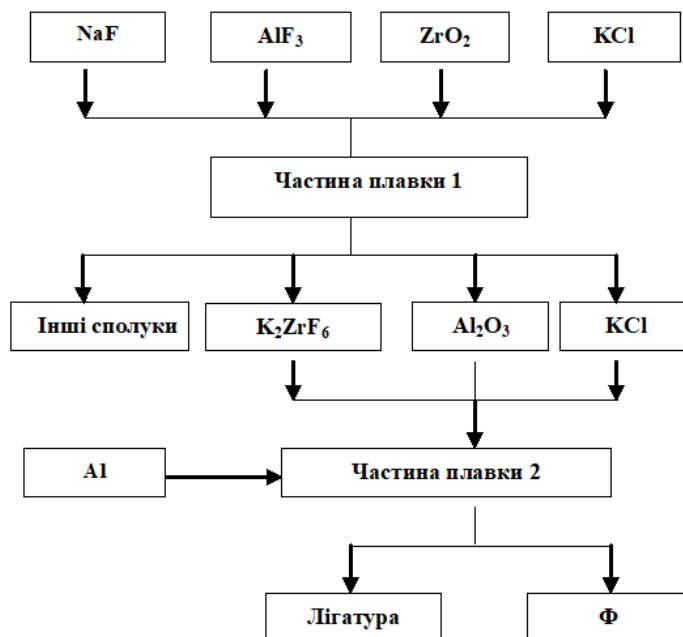


Рисунок 3. Технологічна схема виробництва алюмінієво-цирконієвих лігатур

Таблиця 1 – Залежність вилучення цирконію від часу витримки розплаву

Час експозиції, хв	Вилучення Zr, у залежності від температури, %		
	850 °C	880 °C	920 °C
5	50	65	89
10	70	80	88
15	81,5	95	87,5
20	88	93,5	86,5
25	91	92,5	85,5
30	95	91	84
35	93	90,5	83
40	92,5	90	82

З розгляду даних таблиці 1 видно, що зі зменшенням температури нагріву флюсу розплаву вилучення цирконію в алюмінієвий розплав збільшується. Час витримки при кожній температурі характеризується наявністю екстремуму для виходу цирконію в алюмінієвий розплав.

Для оптимального технологічного режиму була обрана температура 850 °C і витримка розплаву протягом 25–30 хвилин. З метою підвищення вилучення цирконію було запропоновано введення флюсу для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури в роздавальну піч до введення в розплав алюмінію алюмінієво-цирконієвої лігатури.

Висновки

1. Застосування оксиду цирконію, як найбільш доступного із цирконієвих сполук, для отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури металотермічним способом є найбільш прийнятливим.

2. Найбільша розчинність оксиду цирконію в кріоліті спостерігається при кріолітному числі рівному 3,0. Це підтверджує, що розчинником оксиду цирконію (як оксиду алюмінію) є іон AlF_6^{3-} .

3. При зниженні температури процесу та збільшенні часу перемішування розплаву вилучення цирконію в лігатуру зростає.

4. При вивченні різних способів введення шихти в піч максимальне вилучення цирконію в лігатуру в лабораторних дослідах досягнуто при введенні алюмінієвих гранул у сольовий розплав і досягало 92–93 %.

5. Попередня обробка розплаву алюмінію в роздавальній печі флюсом від отримання алюмінієво-цирконієвої лігатури дозволяє досягти 99,5% вилучення цирконію із ZrO_2 .

Подяки

Стаття присвячується світлій пам'яті Чадова Олега Олексійовича директора ТОВ «Крок-ГТ», який виступив ініціатором робіт з отримання кабельно-провідникової продукції на основі сплавів цирконію та алюмінію, надав потужності свого заводу для про-

ведення робіт та вирішив багато організаційних питань.

Список літератури

1. Juneja, J. M. Preparation of aluminium-zirconium master alloys // *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*. – 2002. – Vol. 9 (June). – P. 187–190.
2. Kubínáková, E., Danielik, V., Híves, J. Al–Zr alloys synthesis: Characterization of suitable multi-component low-temperature melts // *Journal of Materials Research and Technology*. – 2019. – Vol. 8, № 6. – P. 6053–6061. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.088.
3. Knych, T., Piwowska-Uljasz, M., & Uljasz, P. Aluminium alloys with zirconium additions, in the range from 0.05 to 0.32%, intended for applications in the overhead electrical power engineering // *Archives of Metallurgy and Materials*. – 2014. – Vol. 59, № 1. – P. 313–317. doi: 10.2478/amm-2014-0056.
4. Kolobov, G. A., Karpenko, A. V. Refining of light rare, rare earth and radioactive metals // *Problems of Atomic Science and Technology*. – 2016. – № 1. – P. 3–9.
5. Тітов, О. О. Дослідження електрохімічного отримання сплаву магній-неодим із оксифторидних серед / О. О. Тітов, В. Х. Новічков, Н. М. Степарьова, Н. Л. Ополченова // *Кольорові метали*. – 2004. – № 8. – С. 49–52.
6. Method for preparing titanium or titanium aluminum alloy and byproduct – titanium-free cryolite through two-stage aluminothermic reduction. Патент EP на винахід / Naixiang Feng, Kun Zhao, Yaowu Wang, Jianping Peng, Yuezhong Di. – № 3327154B1; МПК C22B 34/12, C22B 5/04; published 17.07.2019, Bulletin № 2019/29.
7. Process for producing improved grain refining aluminum–titanium–boron master alloys for aluminum foundry alloys. Патент US / Yucel Birol. – № 8992827B2; МПК C22C 1/05, C22C 1/04; published 31.03.2015.
8. Liu, F. Preparation of Aluminum-Zirconium Master Alloy by Aluminothermic Reduction in Cryolite Melt / F. Liu, C. Ding, W. Tao, X. Hu, B. Gao, Z. Shi, Z. Wang. // *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*. – 2017. – Vol. 69, № 12. – P. 4589–4594. doi: 10.1007/s11837-017-2548-7.
9. Ri, E. H. Production of aluminum alloys modifier from ligature / E. H. Ri, Hosen Ri, S. N. Khimukhin, M. A. Ermakov, T. S. Khimukhin // *RPN Journal of Engineering and Applied Sciences*. – 2018. – Vol. 13, № 4. – P. 1265–1271. – ISSN 1819-6608.
10. Щека, И. А. Химия гафния / И. А. Щека, К. Ф. Карлышева. – К. : Наукова думка, 1972. – 456 с.
11. Clark, R. J. H., Bradley, D. C., Thornton, P. The Chemistry of Titanium, Zirconium and Hafnium / R. J. H. Clark, D. C. Bradley, P. Thornton. – Pergamon Texts in Inorganic Chemistry, 2018. – 150 p. – ISBN 9781483159218.
12. Likhatskyi, I. F. World experience of aluminum master alloys application and advanced Ukrainian developments in this field / I.F. Likhatskyi, M.M. Voron, K.V. Mikhalekov // *Metal and Casting of Ukraine*. – 2020. – Vol. 28, № 4. – P. 63–68. doi: 10.15407/steelcast2020.04.063.
13. Lushchin, S.P. Analysis of electrotechnical properties of innovative high-temperature wires for overhead power transmission lines / S.P. Lushchin, A.V. Borkovskih, M.V. Borkovskih // *Electrical engineering and power engineering*. – 2018. – 2. – P. 37–44. doi: 10.15588/1607-6761-2018-2-4.
14. IEC 62004. Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. First edition, 2007-02. – International Electrotechnical Commission, 2007. – 16 p.
15. ASTM B941-16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes. – 4 p.
16. Посыпайко, В. И. Диаграммы плавкости солевых систем / В. И. Посыпайко, Е. А. Алексеева. – М.: Металлургия, 1977. – 415 с.
17. Хансен, М., Структуры двойных сплавов. Т. 1 / М. Хансен, К. М. Адерко. – М. : Гос. науч.-тех. изд-во лит-ры по чер. и цвет. металлургии, 1962. – 608 с.
18. Murray, J., The Al–Zr (Aluminum–Zirconium) System / J. Murray, A. Peruzzi, J. P. Abriata // *J. of Phase Equilibria*. – 1992. – Vol. 13, № 3. – P. 277–291.
19. Massalski, T. B. Binary Alloy Phase Diagrams / T. B. Massalski. – 2nd ed. – Ohio, USA: ASM International Materials Park, 1990. – 3503 p.

Одержано 12.11.2024

DEVELOPMENT OF THE METHOD OF OBTAINING ALUMINUM-ZIRCONIUM MASTER ALLOY BY METALOTHERMAL METHOD FROM FLUORIDE-CHLORIDE MELT

Andriy Borkovskykh	Postgraduate student of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: aayy6491@gmail.com</i> , ORCID: 0000-0003-3662-0597
Sergiy Lushchin	Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Physics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: lushchin@zp.edu.ua</i> , ORCID: 0000-0003-2135-0520
Mykola Borkovskykh	Engineer, Zaporizhzhia, Ukraine, <i>e-mail: borkovskihnikolaj@gmail.com</i> , ORCID: 0009-0000-8283-4620

Purpose. Development of a method for the industrial production of aluminum-zirconium master alloy by a metal-thermal method from a fluoride-chloride melt.

Research methods. Experimental method of obtaining a master alloy. Spectrometric analysis. Theoretical analysis.

Results. A novel industrial production method for an aluminum-zirconium master alloy by metal-thermal method from fluoride-chloride melt has been developed. The most economically feasible method was determined to be the aluminum-zirconium alloy production process, which involves the reduction of zirconium oxide through an aluminothermic reaction. The findings of the research and industrial production of the master alloy, along with the impact of the technological parameters on the technical and economic indicators of the process, are presented. Laboratory tests were conducted with the objective of identifying the optimal technological parameters for the aluminothermy process. The zirconium content of the obtained metal samples was determined by means of spectrometry, and the completeness of its extraction was calculated. In light of the findings, a fundamental technological scheme was selected for the production of a master alloy with a zirconium content of 5%. It was established that a reduction in the heating temperature of the melt flux results in an enhanced extraction of zirconium into the aluminum melt. In order to enhance the extraction of zirconium, it was suggested to introduce a flux for obtaining an aluminum-zirconium master alloy into a distribution furnace before introducing an aluminum-zirconium master alloy into the aluminum melt.

Scientific novelty. The highest solubility of zirconium oxide in cryolite is observed at a cryolite number of 3.0, as demonstrated in the findings. This finding confirms that the solvent of zirconium oxide (like aluminum oxide) is the AlF_6^{4-} ion. As the temperature of the process decreases and the mixing time of the melt increases, the extraction of zirconium into the master alloy increases. In the course of investigating various methodologies for introducing the charge into the furnace, the maximum extraction of zirconium in the master alloy in laboratory experiments was achieved when aluminum granules were introduced into the salt melt and reached 92-93%. The preliminary treatment of the aluminum melt in the distribution furnace with flux derived from the production of aluminum-zirconium master alloy has been demonstrated to facilitate the extraction of zirconium from ZrO_2 to a level of 99.5%.

Practical value. The results of the experimental and industrial production of an aluminum-zirconium master alloy by the metallothermal method from a fluoride-chloride melt on the existing furnace equipment of the plant for the production of conductor and cable products of “Krok GT” LLC and the influence of technological parameters on the technical and economic indicators of the technological process of the industrial obtaining of master alloy are given.

Key words: master alloy, aluminum, zirconium, aluminothermy, fluoride-chloride melt, flux, extract.

References

1. Juneja, J. M. (2002). Preparation of aluminium-zirconium master alloys. *Indian Journal of Engineering & Materials Sciences*, 9(June), 187-190.
2. Kubináková, E., Danielik, V., & Híves, J. (2019). Al-Zr alloys synthesis: Characterization of suitable multi-component low-temperature melts. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(6), 6053-6061. doi: 10.1016/j.jmrt.2019.10.088.
3. Knych, T., Piwowarska-Uliasz, M., & Uliasz, P. (2014). Aluminium alloys with zirconium additions, in the range from 0.05 to 0.32%, intended for applications in the overhead electrical power engineering. *Archives of Metallurgy and Materials*, 59(1), 313-317. doi: 10.2478/amm-2014-0056.
4. Kolobov, G.A., Karpenko, A.V. (2016). Refining of light rare, rare earth and radioactive metals. *Problems of Atomic Science and Technology*, 1, 3-9.
5. Titov, O. O., Novichkov, V. Kh., Stepareva, N. M., & Opolchenova, N. L. (2004). Doslidzhennya elektrohimichnogo otrymannya splavu magnii-neodym iz oksifitoridnyh sered. *Kolyorovi metaly*, 8, 49-52.
6. Feng, N., Zhao, K., Wang, Y., Peng, J., & Di, Y. (2019). Method for preparing titanium or titanium aluminum alloy and byproduct-titanium-free cryolite through two-stage aluminothermic reduction. *European Patent №. 3327154B1. C22B 34/12, C22B 5/04. Published 17.07.2019, Bulletin 2019/29.*

7. Birol, Y. (2015). Process for producing improved grain refining aluminum-titanium-boron master alloys for aluminum foundry alloys. U.S. Patent № 8992827B2. C22C I/05, C22C I/04. Published 31.03.2015.
8. Liu, F., Ding, C., Tao, W., Hu, X., Gao, B., Shi, Z., & Wang, Z. (2017). Preparation of Aluminum-Zirconium Master Alloy by Aluminothermic Reduction in Cryolite Melt. *JOM: The Journal of the Minerals, Metals & Materials Society*, 69(12). doi:10.1007/s11837-017-2548-7.
9. Ri, E. H., Ri, H., Khimukhin, S. N., Ermakov, M. A., Khimukhin, T. S. (2018). Production of aluminum alloys modifcator from ligature. *ARPJN Journal of Engineering and Applied Sciences*, 13, (4), 1265-1271. ISSN 1819-6608.
10. Shcheka, I. A., & Karlysheva, K. F. (1972). *Khimiya gafniya*. Kyiv: Naukova Dumka, 456 .
11. Clark, R. J. H., Bradley, D. C., Thornton, P. (2018). *The Chemistry of Titanium, Zirconium and Hafnium Pergamon Texts in Inorganic Chemistry*. – 150. ISBN: 9781483159218.
12. Likhatskyi, I.F., Voron, M., Mikhalenkov, K.V. (2020). World experience of aluminum master alloys application and advanced Ukrainian developments in this field. *Metal and Casting of Ukraine*, 28(4), 63–68. doi: 10.15407/steelcast2020.04.063.
13. Lushchin, S.P., Borkovskih, A.V., Borkovskih, M.V. (2018). Analysis of electrotechnical properties of innovative high-temperature wires for overhead power transmission lines. *Electrical engineering and power engineering*, 2, 37-44. doi: 10.15588/1607-6761-2018-2-4.
14. IEC 62004. (2007) Thermal-resistant aluminium alloy wire for overhead line conductor. first edition 2007-02. International electrotechnical commission, 16.
15. ASTM B941-16. Standard Specification for Heat Resistant Aluminum-Zirconium Alloy Wire for Electrical Purposes, 4.
16. Posypaiko, V. I., & Alekseeva, E. A. (1977). Diagrammy plavkosti solevykh system. *Metallurgiya*, 415.
17. Hansen, M., Aderko, K. M. (1962). *Struktury dvojnnyh splavov*. T.I. Gos. nauch.-teh. izd-vo lit-ry po cher. i cvet. metallurgii, 608.
18. Murray, J. A. Peruzzi, A., Abriata, J.P. (1992). The Al – Zr (Aluminum – Zirconium) System. *J. of Phase Equilibria*. 13(3), 277 – 291.
19. Massalski, T. B. (1990). *Binary alloy phase diagrams* (2nd ed.). Ohio, USA: ASM International Materials Park, 3503.

UDC 621.621.45.032.3

- Serhii Chigileychik Leading engineer at ZMDB SE "Ivchenko-Progres", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: ChigileychikSL@ivchenkoprogres.com, ORCID: 0000-0002-2372-9078
- Yurii Torba Candidate of Technical Sciences, Deputy director at ZMDB SE "Ivchenko-Progres", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Torba.Yuriy@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8470-9049
- Ruslan Kulykovskiy Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Vice-rector National university Zaporizhzhia polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: kulikovski@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-8781-2113
- Nataliia Shyrokobokova Candidate of Technical Sciences, Associate professor, National university Zaporizhzhia polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: nsonik11@gmail.com, ORCID: 0000-0002-7009-6218
- Oleksandr Chechet Deputy head of the production department at JSC "Motor Sich", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: Chechetalex1979@gmil.com, ORCID: 0009-0003-2070-9875

INFLUENCE OF ACTIVE GAS CONTENT IN POWDER ON MECHANICAL PROPERTIES OF WORKPIECE BLANKS PRODUCED BY PLASMA ADDITIVE TECHNOLOGIES

Purpose. Analysis of the influence of powder quality (content of active gases) on the level of mechanical properties of workpieces produced by plasma additive technologies.

Research methods. Chemical composition of the powders was determined in accordance with regulatory document. The presence of non-metallic inclusions and contaminants in the powders was determined visually.

To quantify the oxygen in the powders, the vacuum extraction method was used in accordance with ДСТУ ISO 4491-4:2016. Oxygen and nitrogen gas analyser TC 500 (company LECO). Before being loaded into the dosing unit, all powders were dried in an oven (temperature - 250°C, for 1 hour).

Samples (size 130×70×14 mm) were produced by additive growth by plasma powder surfacing (PPS) on a specialised robotic device STARWELD 190H.

The chemical composition of the grown samples was determined by the spectral method using a SPECTROMAX optical emission spectrometer according to standard methods in accordance with GOCT19863.1-19863.12.

The content of nitrogen and oxygen in the deposited metal was determined in accordance with TC 500 (company LECO).

Microstructural analysis were carried out on the samples in the longitudinal and cross directions before and after heat treatment, after etching in a reagent for electrowinning of heat-resistant alloys ($H_3PO_4 - 800 \text{ ml} + CrO_3 - 100\text{ml}$).

The mechanical properties of the alloy were obtained on standard cylindrical samples according to GOCT 1497-84, GOCT 1497-84, GOCT 10145-81s.

Results. The chemical composition of the deposited metal is determined by the chemical composition of the powder. The content of oxygen and nitrogen in the deposited metal is determined by the content of these elements in the powder itself, as well as by the protection of the weld pool with argon. It has been established that in the alloy ЭП-648ВІІ when the powder contains nitrogen in the amount of $[N] \geq 0.03 \text{ wt. \%}$, or oxygen in $[O] \geq 0.02 \text{ wt. \%}$ in the deposited metal at a temperature of 1100 °C, a significant decrease in its deformation capacity ($\epsilon \leq 3.8 \%$) is recorded, which under the influence of thermal stresses leads to the appearance of hot cracks, and as a result, we see a significant decrease in the strength and plasticity in the longitudinal direction.

Scientific novelty. The influence of the quality of the alloy ЭП-648ВІІ powder on the properties of workpieces obtained using additive technologies has been established.

Practical value. The negative effect of the content of active gases on the mechanical properties of the grown workpieces, established in this work, will allow to screen out powder with an unacceptable content of active gases ($[N] \geq 0.03 \text{ wt. \%}$, or oxygen in $[O] \geq 0.02 \text{ wt. \%}$) at the stage of incoming inspection.

Key words: additive technologies, plasma surfacing, mechanical propities, aircraft engines, growing

Introduction

Additive growth processes by microplasma deposition using powder can be thought of as melting

processes with a small bath and short crystallisation times. The melt bath dimensions are in the range of 10-1000 μm , and the cooling rate can reach 10^6 K/s . Thus, the theory of welding and rapid curing can be used to

describe the process and curing conditions in additive manufacturing [1].

Like most complex alloys, nickel-based alloys solidify within a temperature range (soft zone) determined by the liquidus temperature (beginning) and the solidus temperature (end of solidification). This is due to the different solubility of elements in liquid and solid state, which leads to an increase in emissions from the initial liquid composition and a decrease in the liquidus temperature during solidification [2].

As long as the diffusion rate is sufficiently high to maintain thermodynamic equilibrium at the solidification front with the actual liquid temperature, the flat morphology of the solidification front is maintained and growth occurs [3]. Cooling rates in casting processes and powder bed additive growth processes are typically too high [4]. The actual temperature at the solidification front falls below the local liquidus temperature and thermodynamic equilibrium cannot be maintained. The flat solidification front becomes unstable and cells begin to form. With a further increase in the degree of constitutional hypothermia, dendritic morphology is favoured over cellular morphology. As long as the heat is dissipated through the solid, directional growth takes place and a columnar dendritic solidification structure develops. Once the constitutive supercooling becomes high enough so that heat is dissipated through the liquid, multiple nucleation centres can form and equiaxial dendritic growth begins [2, 5]. As the curing rate increases, the potential for maintaining thermodynamic equilibrium through diffusion decreases, and the range of natural supercooling increases. This is reflected in the influence of two combined parameters on the curing structure: the ratio of the temperature gradient and the curing rate

The specifics of transfer, heating and melting of the filler material (powder) primarily distinguish microplasma powder surfacing from other surfacing methods with a consumable and non-consumable electrode [6].

The thermal cycle can be divided into a crystallisation process with liquid-solid interaction and a process that takes place in the solid state after complete crystallisation [7].

The solidification process is determined by the solidification conditions at and around the solidification front as well as the elements involved and the forming phases. The solidification conditions are a consequence of the melt bath geometry and the process conditions (liquid volume, heat flow and direction, etc.). In combination with the thermophysical properties of the elements present (liquid and solid solubility, diffusion coefficients, etc.), both aspects determine the morphology of the solidification front. From there, the type and scale of the curing structure (microstructure) [2, 8].

The process of growing workpieces by microplasma powder surfacing (MPS) can be represented as a set of the following technological stages of a nickel heat-resistant alloy that have a significant impact on the properties of

the grown workpiece:

- 1) production of cast metal by vacuum induction smelting;
- 2) producing filler powder by spraying a cast billet;
- 3) applying a certain amount of deposited metal to the surface of the workpiece to be grown by means of compressed arc surfacing [9].

The first two technological stages affect the chemical composition of the deposited metal and impart a certain 'heredity' in the form of the content of impurity elements of oxygen and nitrogen. This will ultimately have a significant impact on the welding and technological properties of the dispersed additive, the energy conditions for the formation of the weld pool and the specified cross-section of the metal to be deposited. The third process step has an impact on the stress-strain state and technological strength of the grown workpiece [10].

Problem statement

The use of plasma powder surfacing is a promising method of manufacturing workpieces for aircraft engines, which allows for high accuracy of geometric shapes and reduced material waste. However, the process of forming the deposited metal is accompanied by a number of challenges that affect the quality of the final parts. One of the main factors affecting the mechanical properties of products is the chemical composition of the powder, in particular, the content of active gases such as oxygen and nitrogen.

The urgency of the task is the need for an in-depth analysis of the influence of the chemical composition of powders on the processes of microplasma surfacing of heat-resistant nickel alloys. It is known that an excessive amount of oxygen and nitrogen in the powder leads to a decrease in plasticity, increased brittleness and the occurrence of cracks in the deposited metal. This, in turn, significantly limits the use of such materials under high mechanical and thermal loads.

The aim of the study is to determine the relationship between the content of active gases in powders and the structure and properties of the deposited metal, as well as to assess their influence on the level of mechanical characteristics of the workpieces obtained by plasma additive growth.

Research objectives:

- analysis of the chemical composition of powders and deposited metal to determine the content of active gases;
- assessment of the influence of oxygen and nitrogen on the crystallisation processes of the deposited metal, in particular on the formation of the microstructure and its defects;
- investigation of the relationship between the content of active gases in powders and the mechanical properties of workpieces grown by microplasma surfacing;
- development of recommendations for ensuring the

stability of mechanical properties by controlling the content of active gases in powders.

The results of the study are expected to identify the permissible limits for the content of active gases in powders and develop recommendations for improving the plasma powder surfacing technology. This will help to improve the reliability and performance of parts produced by the additive growth method, in particular for use in aircraft engines.

Results and discussion

The objects of study were powders from the nickel-based heat-resistant alloy ХН50ВМТЮБ-ВІ (ЭП648ВІ) of five different batches. The chemical composition and content of oxygen and nitrogen in the powder are given in tables 1 and 2.

As can be seen from Table 2, the oxygen content is highest in powder № 5 ($O_2=0.026\%$), and lowest in powder №2 ($O_2=0.0054\%$). The nitrogen content is highest in powder № 1 ($N_2=0.0358\%$), and the lowest in powder № 3 ($N_2=0.0191\%$).

Table 1 – Chemical composition of powders

№	Content of elements, %						
	Mo	W	Cr	Al	Nb	Ti	Ni
1	3.25	4.9	33.7	0.6	1.0	0.7	base
2	2.9	4.7	32.8	1.0	1.0	0.96	
3	3.3	5.0	33.2	1.0	1.1	1.0	
4	3.0	4.9	34	0.7	0.9	0.8	
5	3.2	5.0	33.8	0.9	0.8	0.9	

Table 2 – Gas content of powders

№	Gas content, %	
	O_2	N_2
1	0.0196	0.0358
2	0.0054	0.0271
3	0.0085	0.0191
4	0.015	0.0215
5	0.026	0.0230

In addition, it should be noted that the high content of oxygen and nitrogen in powders can be the result of insufficiently controlled conditions of their manufacture or storage. It is important to bear in mind that even minimal fluctuations in the content of these gases can have a significant impact on subsequent stages of the technological process, including the formation of the deposited metal and its mechanical properties.

The chemical composition of the deposited metal and gas content are presented in tables 3, 4.

Table 3 – Chemical composition of the deposited metal

№	Content of elements, %						
	Mo	W	Cr	Al	Nb	Ti	Ni
1	3.12	4.72	34.6	0.62	0.98	0.72	base
2	2.97	4.81	33.6	0.97	1.03	0.98	
3	3.23	4.87	34.2	0.9	1.07	0.96	
4	3.08	4.97	33.4	0.72	0.93	0.83	
5	3.13	4.9	33.2	0.93	0.81	0.88	

From all five powders, samples of the following sizes were grown on the STARWELD 190H using the MPS method at the same modes 140/70/14 mm.

Table 4 – Gas content in the weld metal

№	Gas content, %	
	O_2	N_2
1	0.02436	0.0818
2	0.0068	0.03323
3	0.1093	0.02267
4	0.0187	0.02715
5	0.031	0.0290

After growing, the samples were heat treatment in the following modes: hardening ($T_h = 1140 \pm 10^\circ\text{C}$, $\tau = 4$ hours, air cooling); ageing ($T_a = 900^\circ\text{C}$, $\tau = 16$ hours, air cooling).

From tables 1 and 3, we can see that the difference between the chemical elements in the powder and in the deposited metal is insignificant and is within the range of 1-5%. Therefore, it can be concluded that the chemical composition of the deposited metal is determined by the chemical composition of the powder.

It should be noted that even minor deviations in the chemical composition, such as increased oxygen or nitrogen content, can affect the final properties of the product, contributing to the formation of microstructural defects, such as carbides or nitrides. This emphasises the need to optimise the composition of powders to reduce the impact of impurities.

From tables 2 and 4 and the shielding gas, we can see that the difference between the oxygen and nitrogen content of the powder and the deposited metal is in the range of 20-30%. Based on this, it can be concluded that the content of oxygen and nitrogen in the deposited metal is determined by the content of these elements in the powder itself, as well as by the protection of the weld pool with argon (quality of argon and stability of its supply).

It should be noted that an increase in the content of active gases in the deposited metal compared to the powder can also be caused by technological factors of external contamination or insufficient equipment tightness. This feature requires not only enhanced control over the shielding gas supply conditions, but also proper purity of the argon used during surfacing.

The samples were made after heat treatment, the tests were carried out in the longitudinal and cross directions relative to the growth layers, and the following results were obtained [11, 12]:

for powder №1:

- cross direction: $\sigma_u = 878.1$ MPa; $\sigma_{0.2} = 532.1$ MPa; $\delta = 16.4\%$; $\psi = 15.2\%$;
- longitudinal direction: $\sigma_u = 443.9$ MPa; $\sigma_{0.2} = 485.1$ MPa; $\delta = 2.2\%$; $\psi = 5.9\%$;

for powder №2:

- cross direction: $\sigma_u = 918.3$ MPa; $\sigma_{0.2} = 625.2$ MPa; $\delta = 20.6\%$; $\psi = 26.0\%$;

- longitudinal direction: $\sigma_u = 873.1$ MPa; $\sigma_{0.2} = 457.1$ MPa; $\delta = 13.8$ %; $\psi = 15.8$ %;
- for powder №3:
- cross direction: $\sigma_u = 883.0$ MPa; $\sigma_{0.2} = 633.1$ MPa; $\delta = 23.7$ %; $\psi = 42.3$ %;
 - longitudinal direction: $\sigma_u = 906.5$ MPa; $\sigma_{0.2} = 689.9$ MPa; $\delta = 12.8$ %; $\psi = 17.8$ %;
- for powder №4
- cross direction: $\sigma_u = 945.7$ MPa; $\sigma_{0.2} = 645.8$ MPa; $\delta = 18.7$ %; $\psi = 24.7$ %;
 - longitudinal direction: $\sigma_u = 799.7$ MPa; $\sigma_{0.2} = 535.1$ MPa; $\delta = 9.2$ %; $\psi = 16.8$ %;
- for powder №5:
- cross direction: $\sigma_u = 883.0$ MPa; $\sigma_{0.2} = 633.08$ MPa; $\delta = 23.7$ %; $\psi = 42.3$ %;
 - longitudinal direction: $\sigma_u = 575.3$ MPa; $\sigma_{0.2} = 501.8$ MPa; $\delta = 2.8$ %; $\psi = 9.1$ %.

It should be noted that for specimens № 1 and № 5, we can see a significant decrease in strength in the longitudinal direction (for № 1 – more than two times; for № 5 – one and a half times), and plasticity is practically absent. The cause of the brittle fracture of the longitudinal specimens are the cracks detected during the metallographic examination. During testing, the load on the longitudinal specimens is applied perpendicular to the cracks, which leads to their development and subsequent fracture of the specimens. Metallographic studies confirm that the high content of active gases in the powder contributes to the formation of cracks in the deposited metal, which are concentrated at the grain boundaries. This directly affects the ductility and strength in the longitudinal direction. On the contrary, powders with a minimum content of active gases demonstrate better mechanical properties due to a reduction in the likelihood of defect formation.

On cross-sectional specimens, the stress is applied along the cracks, so they do not have a significant impact on the mechanical properties.

Metallographic examination of the microgrooves of samples № 1 and № 5, made in longitudinal and cross sections, revealed cracks.

After electrolytic etching of the grinds in a 10% oxalic acid solution, it was found that the cracks developed along the grain boundaries along the heat sink, across the layers (fig. 1). In the areas of crack propagation, accumulations of large carbides along the grain boundaries are observed (fig. 2). It should also be noted that the crack surfaces have smoothed melted edges.

The fracture fractogram shows that almost the entire fracture surface (~98 %) of the opened crack is characterised by a smoothed «melted» surface, which is typical for hot crack fractures (see fig. 2). There are small individual areas with a cellular structure, which is characteristic of plastic fracture (see fig. 2).

The fractographic analysis also shows the importance of proper thermal cycle control during the surfacing process. The cyclical heating typical of repeated

surfacing can increase the tendency to crack formation, especially in materials with high oxygen and nitrogen content. Optimising cooling and heat treatment conditions can significantly reduce the risk of such defects.

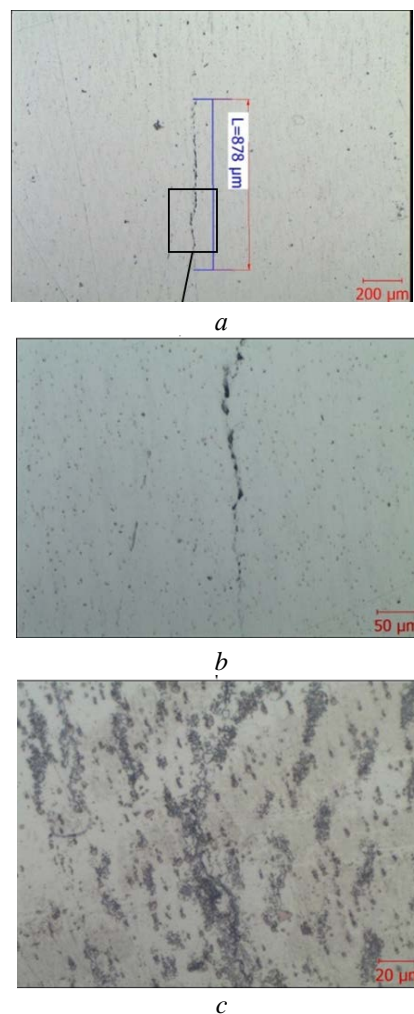


Figure 1. Crack on the samples: *a* – unetched grinding, $\times 50$; *b* – unetched grinding, $\times 200$; *c* – grinding after etching, $\times 500$

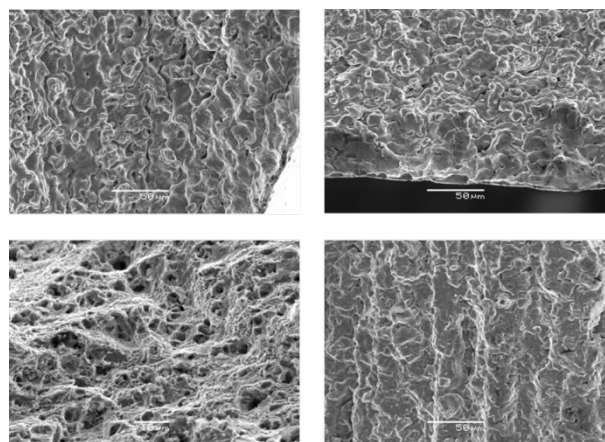


Figure 2. Fracture pattern of an open crack

It is known that in the process of multilayer surfacing, the surface of several previous rolls under the weld pool is reheated to temperatures of 1100-1200°C (fig. 3), and under conditions of transverse vibrations, such cyclic reheating can also be present for the already pre-crystallised metal behind the weld pool of the deposited roller [13, 14]. Under these conditions, the tensile welding deformations with residual stresses are added up in the above-mentioned zones of the deposited metal. In the case of a sufficiently high stiffness of the additive structure, when their total value exceeds the relatively small deformation capacity of the deposited metal with a high content of dissolved gases within the temperature of 1100°C, during repeated heating of the deposited metal, its destruction occurs by the mechanism of «ductility dip cracking» (classification according to [15-16].

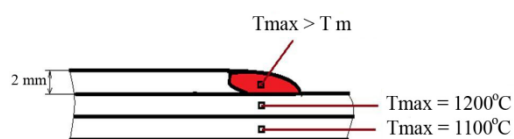


Figure 3. Temperature of the previous rollers under the weld pool

Thus, if the nitrogen content is $[N] \geq 0.03$ wt. % in the initial filler material, or oxygen in $[O] \geq 0.02$ wt. % in the welded metal of heat-resistant nickel alloys at a temperature of 1100°C, a significant decrease in its deformation capacity ($\epsilon \leq 3.8\%$) is recorded.

Conclusions

1. It has been established that the content of active gases ($[O]$ and $[N]$) in the powder of the ЭП 648 ВІ alloy significantly affects the mechanical properties of the workpieces obtained by the plasma additive growth method. At the same time, the chemical composition of the deposited metal is determined by the chemical composition of the powder, which is confirmed by minimal deviations within 1-5%.

2. It has been proved that an excess of nitrogen $[N] \geq 0,03$ wt.% or oxygen $[O] \geq 0,02$ wt.% in the powder of the ЭП-648ВІ alloy leads to the formation of hot cracks in the deposited metal at a temperature of 1100°C. This causes a significant decrease in its deformation capacity ($\epsilon \leq 3,8\%$), which, in turn, affects the reduction of strength and ductility in the longitudinal direction.

3. The microstructure of samples with a high content of active gases shows a tendency to form cracks that develop along grain boundaries. In the cross direction, the samples retain better mechanical properties due to less cracking. The cracks have melted edges characteristic of hot cracks, which confirms the fracture mechanism of «ductility dip cracking».

4. The content of oxygen and nitrogen in the deposited metal increases by 20-30% compared to the powder, which indicates the importance of argon quality and stability of its supply. The use of high-quality

shielding gas is critical to reducing the risk of defects.

The results of the study can be used to improve the technology of plasma powder surfacing by:

- selection of powders with acceptable limits of active gas content ($[O] \leq 0,02$ wt.%, $[N] \leq 0,03$ wt.%);
- ensuring a stable thermal cycle during surfacing to avoid hot cracks;
- use of high-quality protective argon to minimise the penetration of oxygen and nitrogen into the weld metal.

Thus, the results of the study provide a scientific and technical basis for optimising the conditions of additive growth, which allows to improve the quality and reliability of aircraft parts.

References

1. Sames et al. (2016). The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing. *International Materials Reviews*, 61, 315–360.
2. Kou, S., Hoboken N.J. (2003). *Welding metallurgy*. 2nd ed. Wiley-Interscience publication, 466.
3. McLean, M. (1983) *Directionally solidified materials for high temperature service*. London. The Metals Society, 337.
4. Kurz et al. (1994). Rapid solidification processing and microstructure formation. *Materials Science and Engineering*, 46–51, 179–180.
5. Luo, X., Li, J. and Li, G.J. (2015). Effect of NiCrBSi content on microstructural evolution, cracking susceptibility and wear behaviors of laser cladding WC/Ni- NiCrBSi composite coatings. *J. Alloys Compd.*, 626, 102–111.
6. Zeng, C., Tian, W., Liao, W.H. and Hua, L. (2016). Microstructure and porosity evaluation in laser-cladding deposited Ni-based coatings. *Surface and Coatings Technology*, 294, 122–130.
7. Chen, Y., Zhang, Q., Chen, Z., Wang, L., Yao, J. and Kovalenko, V. (2019). Study on the element segregation and Laves phase formation in the carbon nanotubes reinforced IN718 superalloy by laser cladding. *Powder Technol.*, 355, 163–171.
8. Kakinuma, Y., Mori, M., Oda, Y., Mori, T., Kashihara, M., Hansel, A. and Fujishima, M. (2016). Influence of metal powder characteristics on product quality with directed energy deposition of Inconel 625. *CIRP Ann. Manuf. Technol.*, 65, 1, 209–212.
9. Bürgel, R. (2011). *Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen, Hochtemperatur-legierungen und beschichtungen*. 4th ed. Wiesbaden. Vieweg+Teubner. Handbuch, 182.
10. Chygileichyk, S., Petryk, I.A., Ovchinnikov, O.V., Kirilaha, S.V. (2022). Experience in implementing additive technologies during repair of GTE parts from alloy EP 648 VI (KHN50VMTYUB-VI) under conditions of serial production. *Aerospace Technic and Technology*, 1(177), 57–64.
11. Balushok, K., Chygileichyk, S., Petryk, I., Sakhno, S., Kulykovskiy, R. (2024). Developing

technology of directed energy deposition of workpieces of parts of aircraft engines from heat-resistant nickel alloys by means of using layer-by-layer microplasma surfacing method. *Mechanics and Advanced Technologies*, 8, 2, 121–129.

12. Yuschenko, K.A., Yarovytsyn, O.V. (2014). Influence of active gas content and disperse filler continuity on the process of bead formation in microplasma powder surfacing of nickel superalloys. *Autom. Welding*, 6-7, 119–127.

13. Yuschenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Khruschov, H.D., Petryk, I.A., Chyhileychik, S.L. (2022). Research and optimization of HPT blades of the D-18T aircraft gas turbine engine by micro-plasma powder welding. *Aerospace Technic and Technology*, 28, 3–11, 3–16.

14. Yarovytsyn, O.V., Khruschov, H.D., Chyhileychik, S.L. (Jan. 2019) Estimation to optimize

energy spent on a single welding pool creation in microplasma powder deposition process of JS32 nickel superalloy HPT blade's bandage shelve. *International Journal of Mechanical and Production Engineering*, 7, 1, 5 - IJMPE-IRAJ-DOI-14928.

15. Yarovytsyn, O. V. (2015). Energy approach in analysis of microplasma powder surfacing modes. *Autom. Welding*, 5–6, 18–25.

16. Yuschenko, K.A., Yarovytsyn, O.V., Khruschov, H.D., Petryk, I.A., Chyhileychik, S.L. (23-26 May 2017). Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges. *Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies. PWI NAS of Ukraine*, 257–261.

ОЦІНКА ВПЛИВУ ВМІСТУ АКТИВНИХ ГАЗІВ У ПОРОШКУ НА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ЗАГОТОВОК ДЕТАЛЕЙ, ОТРИМАНИХ МЕТОДОМ ПЛАЗМОВИХ АДИТИВНИХ ТЕХНОЛОГІЙ

Сергій Чигілейчик

провідний інженер ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, *e-mail: ChigileychikSL@ivchenkoprogres.com*, ORCID: 0000-0002-2372-9078

Юрій Торба

канд. техн. наук, заступник директора ДП ЗМКБ «Івченко-Прогрес», Запоріжжя, Україна, *e-mail: Torba.Yuriy@gmail.com*, ORCID: 0000-0001-8470-9049

Руслан Куликовський

канд. техн. наук, доцент, проректор з науково-педагогічної роботи та питань перспектив розвитку Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, *e-mail: kulikovski@zpu.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-8781-2113

Наталія Широкобокова

канд. техн. наук, доцентка, Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, Україна, *e-mail: nsonik11@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-7009-6218

Олександр Чечет

заступник начальника цеху, ОАО «Мотор Січ», Запоріжжя, Україна, *e-mail: Chechetalex1979@gmail.com*, ORCID: 0009-0003-2070-9875

Мета роботи. Аналіз впливу якості порошку (вміст активних газів) на рівень механічних властивостей заготовок, отриманих методом плазмових адитивних технологій.

Методи дослідження. Хімічний склад порошків визначали у відповідності за нормативними документами: ГОСТ 17745, ОСТ 1 90134, ОСТ 1 90136, ОСТ 1 90137, ОСТ 1 90138.

Наявність неметалевих включень і забруднень в порошках визначали шляхом зовнішнього огляду.

Для кількісної оцінки кисню у порошках використовували метод вакуумної екстракції у відповідності із ДСТУ ISO 4491-4:2016. Газоаналізатор кисню і азоту ТС 500 (фірма LECO). Перед завантаженням у дозатор установки усі порошки пройшли операцію просушування у печі (температура – 250°C, впродовж 1 години).

Зразки (розмір 130×70×14 мм) були виготовлені адитивним виробництвом методом плазмової порошкової наплавки (МПН) на спеціалізованій роботизованій установці STARWELD 190H.

Хімічний склад вироцених зразків визначали спектральним методом з використанням оптико-емісійного спектрометра SPECTROMAX за стандартними методиками у відповідності з ГОСТ 19863.1-19863.12.

Вміст азоту та кисню у наплавленому металі визначали у відповідності ТС 500 (фірма LECO).

Мікроструктурний аналіз проводився на шліфах у повздовжньому та поперечному напрямках до та після термообробки, після травлення у реактиві для електротравлення жароміцних сплавів ($H_2PO_4 - 800\text{мл} + CrO_3 - 100\text{мл}$).

Механічні властивості сплаву визначали на стандартних циліндричних зразках по ГОСТ 1497-84, ГОСТ 1497-84, ГОСТ 10145-81.

Отримані результати. Хімічний склад наплавленого металу задається хімічним складом порошку. Вміст кисню та азоту у наплавленому металі задається вмістом кисню та азоту у самому порошку, а також захистом при наплавленні зварювальної ванни аргоном. Встановлено, що в сплаві ЕП-648ВІ при вмісті у порошку з азоту у кількості $[N] \geq 0,03$ ваг. %, або кисню у $[O] \geq 0,02$ ваг. % в наплавленому металі при температурі 1100°C фіксується значне зниження його деформаційної здатності ($\epsilon \leq 3,8$ %), що під впливом термічних напруг призводить до появи гарячих тріщин, а як наслідок у поздовжньому напрямі ми бачимо значне падіння міцності та пластичності.

Наукова новизна. Встановлено вплив якості порошку сплаву ЕП-648ВІ на властивості заготовок, отриманих за адитивними технологіями.

Практична цінність. Встановлений в роботі негативний вплив вмісту активних газів на механічні властивості вироцнених заготовок дозволить на стадії вхідного контролю відсіяти порошок з неприпустимим вмістом активних газів ($[N] \geq 0,03$ ваг. %, або кисню у $[O] \geq 0,02$ ваг. %).

Ключові слова: адитивні технології, плазмове наплавлення, механічні властивості, авіаційні двигуни, вироцнення.

Список літератури

1. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [Text] / Sames et al. // International Materials Reviews. – 2016. – № 61. – P. 315–360.
2. Kou S. Welding metallurgy. 2nd ed. [Text] / S. Kou, N. J. Hoboken // Wiley-Interscience. – 2003. – 466 p.
3. McLean M. Directionally solidified materials for high temperature service [Text] / M. McLean // London: The Metals Society. – 1983. – 337 p.
4. Rapid solidification processing and microstructure formation. [Text] / Kurz et al. // Materials Science and Engineering: A. –1994. – P. 179–180, 46–51.
5. Luo X. Effect of NiCrBSi content on microstructural evolution, cracking susceptibility and wear behaviors of laser cladding WC/Ni- NiCrBSi composite coatings [Text] / X. Luo, J. Li and G.J. Li, // J. Alloys Compd. – 2015. – Vol. 626. – P. 102–111.
6. Microstructure and porosity evaluation in laser-cladding deposited Ni-based coatings [Text] / C. Zeng, W. Tian [et al.] // Surf. Coatings Technol. – 2016. – Vol. 294. – P. 122–130.
7. Study on the element segregation and Laves phase formation in the carbon nanotubes reinforced IN718 superalloy by laser cladding [Text] / Y. Chen, Q. Zhang, Z. Chen, L. [et al.] // Powder Technol. – 2019. – Vol. 355. – P. 163–171.
8. Influence of metal powder characteristics on product quality with directed energy deposition of Inconel 625 [Text] / Y. Kakinuma, M. Mori, Y [et al.] // CIRP Ann: Manuf. Technol. – 2016, Vol. 65. – № 1. – P. 209–212.
9. Bürgel R. Handbuch Hochtemperatur-Werkstofftechnik: Grundlagen, Werkstoffbeanspruchungen Hochtemperaturlegierungen und -beschichtungen. [Text] / R. Bürgel // 4th ed. Wiesbaden: Vieweg+Teubner. – 2011. – 182 p.
10. Experience in implementing additive technologies during repair of GTE parts from alloy EP 648 VI (KHN50VMTYUB-VI) under conditions of serial production [Text] / S.L. Chygileichyk, I.A. Petryk [et al.] // Aerospace Technic and Technology. – 2022/ – № 1(177). – P. 57–64.
11. Developing technology of directed energy deposition of workpieces of parts of aircraft engines from heat-resistant nickel alloys by means of using layer-by-layer microplasma surfacing method [Text] / K. Balushok, S. Chygileichyk [et al.] // Mechanics and Advanced Technologies. – 2024. – Vol. 8. – No. 2. – P. 121–129.
12. Yuschenko K.A. Influence of active gas content and disperse filler continuity on the process of bead formation in microplasma powder surfacing of nickel superallos [Text] / K.A. Yuschenko, O.V. Yarovytsyn // Autom. Welding–2014. – № 6–7. – P. 119–127.
13. Research and optimization of HPT blades of the D-18T aircraft gas turbine engine by micro-plasma powder welding [Text] / K.A. Yuschenko, O.V. Yarovytsyn [et al.] // Aerospace Technic and Technology. – 2022. – Vol. 28. – № 3. – № 11. – P. 3–16.
14. Yarovytsyn O.V. Estimation to optimize energy spent on a single welding pool creation in micro-plasma powder deposition process of JS32 nickel superalloy HPT blade's bandage shelve [Text] / O.V. Yarovytsyn, H.D. Khuschchov, S.L. Chyhileychik // International Journal of Mechanical and Production Engineering. – Jan. 2019., V. 7, Issue 1. - 5 p. IJMPE-IRAJ-DOI-14928.
15. Yarovytsyn O.V. Energy approach in analysis of microplasma powder surfacing modes [Text] / O. V. Yarovytsyn // Autom. Welding – 2015. – № 5–6. – P. 18–25.
16. Understanding the impact of oxygen and nitrogen content in metal powder on microplasma multilayers deposition of aircraft GTE blade edges [Text] / K.A. Yuschenko, O.V. Yarovytsyn, [et al.] // Proceedings of 9th International conference of young scientist on welding and related technologies, PWI NAS of Ukraine. – 2017. – P. 257–261.

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.431

- Георгій Слинко д-р техн. наук, професор, професор кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Роман Сухонос магістр, старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: romevs@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Віра Слинко старший викладач кафедри автомобілів, теплових двигунів та гібридних енергетичних установок Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4553-8387
- Віталій Лук'яненко магістр, незалежний дослідник, Німеччина

ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ РЕЗОНАНСНОГО НАДДУВУ БЕНЗИНОВОГО ДВОТАКТНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ШВИДКІСНУ ХАРАКТЕРИСТИКУ

Мета роботи. Дослідити ефективність резонансного наддуву двотактного бензинового двигуна; поліпшити енергетичні характеристики існуючого двигуна внутрішнього згорання шляхом встановлення модернізованої системи резонансного наддуву.

Методи дослідження. Наведено результати розрахунку резонатора системи випуску двотактного бензинового двигуна за комбінованою методикою Блера і Григор'єва. Моделювання потоків відпрацьованих газів виконувалось в середовищі САПР SolidWorks Flow Simulation. Для розрахунку циклу двигуна використовувалась комп'ютерна програма Engine Calculation. Об'єкт дослідження – двотактний одноциліндровий бензиновий двигун мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350.

Отримані результати. Вирішено актуальне питання підвищення потужності 2-тактного бензинового ДВЗ за рахунок реалізації явища резонансного наддуву в системі випуску відпрацьованих газів. Виконано розрахунок термодинамічного циклу двигуна ІЖ Планета Спорт 350 з визначенням його основних циклових параметрів, тиску та температури відпрацьованих газів. Виконано розрахунок резонатора, який забезпечить максимальне покращення показників двигуна на номінальному режимі роботи; побудовано 3D моделі системи випуску в трьох варіантах: базової конструкції (без резонатора), з резонатором заводу-виробника, та з резонатором власної розробки авторів дослідження. Виконано моделювання переміщення відпрацьованих газів в резонаторах різних моделей в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Виконано стендові випробування двигуна на навантажувальному стенді, побудовані швидкісні характеристики при роботі з різними системами випуску.

Наукова новизна. Отримано модель руху робочої суміші в резонаторі системи випуску на режимі резонансу. Доведено, що в розрахованому резонаторі дійсно відбувається повернення 15...20 % робочої суміші назад до циліндру. Встановлено, що двигун ІЖ Планета Спорт 350 з модернізованою системою випуску за рахунок реалізації резонансного наддуву має максимальну ефективну потужність 24,4 кВт – на 3 % більшу, ніж базовий двигун.

Практична цінність. Методика розрахунку впливу ефектів резонансного наддуву бензинового 2-тактного двигуна на ефективні показники двигуна може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих ДВЗ різного призначення.

Ключові слова: 2-тактний двигун внутрішнього згорання, відпрацьовані гази, ефективна потужність, резонансний наддув, резонатор, система випуску, швидкісна характеристика.

Вступ

В багатьох сферах використання 2-тактних ДВЗ є більш доцільним, ніж 4-тактних. 2-тактні ДВЗ мають більш просту конструкцію, більшу питому потужність. Проте їх розвиток та сфера використання суттєво обмежені сучасними екологічними вимогами. Тим не менше, 2-тактні ДВЗ є актуальними в малій авіації, засобах малої механізації.

Сучасні дослідники [1–5] розглядають, як найбільш перспективні, наступні основні напрямки підвищення економічності та екологічності 2-тактних ДВЗ:

- повернення частини відпрацьованих газів в циліндр – для догорання залишкових (неспалених) вуглеводнів;
- організація безпосереднього впорскування палива в циліндр;
- організація пошарового введення свіжого заряду.

Другий і третій напрямки забезпечують найбільш ефективно покращення показників двигуна, проте вимагають суттєвої зміни конструкції та введення дороговартісних технічних рішень. Реалізація першого принципу можлива або організацією рециркуляції частини відпрацьованих газів або використанням явища резонансу у випускній системі.

Саме по собі явище резонансного наддуву відомо та досліджено вже доволі давно, проте мають місце значні проблеми щодо його практичного впровадження в кожному окремому випадку під окремий двигун. А зважаючи на очікування вичерпаності паливних енергоресурсів, покращення діючих зразків 2-тактних ДВЗ різного призначення є актуальним науковим та практичним питанням.

Аналіз досліджень та публікацій

Принципова відмінність між двотактним і чотиритактним двигунами полягає в тому, що в двотактних двигунах випуск відпрацьованих газів і надходження нової порції паливо-повітряної суміші здійснюються практично одночасно. При цьому виникають дві проблеми: з одного боку, відпрацьований газ частково залишається в циліндрі, що зменшує потужність при подальшому такті, оскільки суміш, що знаходиться в камері згорання, менш схильна до займання. З іншого боку, через випускне вікно разом з відпрацьованим газом виходить і частина свіжої суміші, що призводить до більш високої витрати палива і створює загрозу для забруднення навколишнього середовища. Ці недоліки можна мінімізувати шляхом створення випускної труби особливої форми. Перш за все, випускна труба розширюється конусоподібною насадкою – дифузором. У ньому, на відміну від циліндра, виникає знижений тиск, внаслідок чого відпрацьований газ, отриманий в процесі згорання, відсмоктується при відкритті випускного вікна циліндра. Проте, відразу після цього необхідно створити підвищений тиск, що дозволить утримувати в циліндрі свіжу паливно-

повітряну суміш, до тих пір, поки знов не закриється випускне вікно. Щоб створити даний тиск, після дифузора встановлюється другий, звужуючий, конус. Від нього відбивається частина газу, що виходить через глушник. Внаслідок цього через вихідний отвір випускної труби витікає лише частина газу. Частина хвилі, що залишається, відбивається в напрямку випускного вікна циліндра і затримує там свіжу порцію газу наступного такту (рисунк 1).

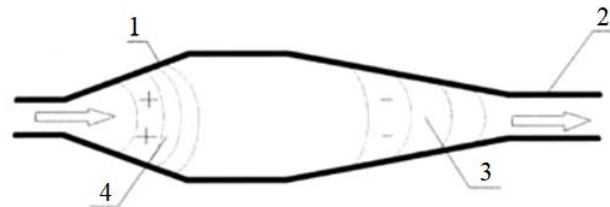


Рисунок 1. Розподіл тиску у випускній системі [6]:

- 1 – випускна система; 2 – патрубок; 3 – зона пониженого тиску; 4 – зона підвищеного тиску

Для досягнення якомога кращих показників двигуна необхідно забезпечити співставність величин кількості і швидкості випускного газу з часом відкриття випускного вікна, для забезпечення якісної продувки – високого значення коефіцієнта наповнення і низького значення коефіцієнта залишкових газів. Слід мати на увазі, що режим резонансу відпрацьованих газів для резонатора простої конструкції може відбуватись тільки у певному діапазоні швидкостей обертання колінчастого валу. Велике значення має величина і довжина випускної труби [7, 8].

Якщо випускна система буде надмірно великою в діаметральній площині, то тиск буде занадто малим, і досить багато свіжої паливно-повітряної суміші буде виходити через випускну трубу. Якщо ж випускна система занадто мала, то тиск хвилі буде дуже високим і згорілий газ не зможе виходити належним чином. Збільшення тиску веде до підвищення температури випускної системи і двигуна, що створює більшу вірогідність прогорання поршня.

Все це має велике значення, однак, оскільки двотактні двигуни існують вже давно, і їх дослідженням займалися багато вчених то відомий цілий ряд формул, що враховують параметри 2-тактних ДВЗ [6–12].

Оскільки для розрахунку системи випуску 2-тактного ДВЗ необхідно враховувати значну кількість емпіричних коефіцієнтів, що встановлюються дослідним шляхом, при розробці нових двигунів оптимальні розміри елементів системи випуску часто визначають експериментально на гальмівному стенді. Нерідко серія експериментів дозволяє значно швидше і точніше, ніж розрахунковим шляхом, визначити всі необхідні характеристики конкретної конструкції ДВЗ.

За минулі десятки років розвитку ДВЗ увага двигунобудівників до систем випуску то слабшала, то

посилювався. Основні результати досліджень (насамперед за межами України) були отримані з впровадженням обчислювальної техніки. В СРСР дослідження проводилися не надто систематично і неповно. Однак досягнуті результати свідчать про те, що роботи такі велися і були остаточно припинені лише наприкінці 1980-х років.

До того часу в Європі склалися істотно відмінні, від прийнятих в нашій моторобудівній промисловості, схеми, конфігурації і методи розрахунку випускних систем згідно з працями Григор'єва [10, 13]. У працях Блера [9, 14] описуються інші підходи до конструювання резонаторів, однак саме такі резонатори встановлюються практично на всіх імпортованих мотоциклах з двотактними двигунами. Основними даними для розрахунку системи випуску є величини середнього ефективного тиску і температури відпрацьованих газів.

Блер спирається на результати великої кількості експериментів, даючи розроблені ним формули. На жаль, його методики розрахунку не дають конкретних відповідей в питаннях взаємозв'язку довжин і діаметрів елементів резонатора та системи випуску і ефективності роботи двигуна.

Мета роботи

Дослідити ефективність резонансного наддуву двотактного бензинового двигуна; поліпшити енергетичні характеристики існуючого двигуна внутрішнього згорання шляхом встановлення модернізованої системи резонансного наддуву.

Матеріал і методика досліджень

Дослідження впливу резонансного наддуву на швидкісну характеристику двигуна виконано за наступною методикою.

- розрахунок термодинамічного циклу двигуна з визначенням його основних циклових параметрів, тиску та температури відпрацьованих газів – за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation [15];

- розрахунок розмірів резонатора, який забезпечить високий рівень резонансу в системі випуску на всіх режимах роботи двигуна, – за методикою [9, 14];

- побудова 3D моделі резонаторів базової конструкції, та модернізованого – в середовищі SolidWorks;

- моделювання переміщення відпрацьованих газів в резонаторах різних моделей – в середовищі SolidWorks Flow Simulation;

- експериментальна перевірка ефективності базової системи випуску, а також системи з резонатором – з побудовою зовнішньої швидкісної характеристики.

В роботі розглянуто та порівняно 3 варіанти системи випуску двигуна мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350:

- система базової конструкції, без резонатора;

- система з резонатором, запропонована заводом-виробником;

- система з резонатором, запропонована авторами роботи.

Виклад основного матеріалу дослідження

Виконано розрахунок резонатора для двигуна ІЖ Планета Спорт 350. Оскільки існує велике різноманіття систем резонансного наддуву, було прийнято рішення для встановлення на досліджуваній двигун резонансного наддуву з двоступінчастим дифузorzом випускної системи.

Система резонансного наддуву залежить від великої кількості індивідуальних показників двотактного двигуна. В якості об'єкта дослідження обрано 1-циліндровий бензиновий двигун мотоцикла ІЖ Планета Спорт 350 робочим об'ємом 340 см^3 , ступенем стиснення $10 \dots 10,5$, номінальною потужністю $N_e = 22,1 \text{ кВт}$ при $n = 6100 \dots 6700 \text{ хв}^{-1}$. Максимальний обертальний момент двигуна $35 \text{ Н}\cdot\text{м}$ при $n = 5600 \dots 5800 \text{ хв}^{-1}$. Максимальна частота обертання колінчастого валу $n = 7200 \text{ хв}^{-1}$. Схема продувки – трьохканальна, з п'ятьма продувочними вікнами. Двигун карбюраторний, з карбюратором МІКУНІ АЕХ, із повітряним охолодженням циліндра набігаючим потоком повітря [16].

В розрахунках роботи системи випуску ІЖ Планета Спорт 350 приймалось, що випуск відбувається при повороті колінчастого валу на $94^\circ 5'$ від верхньої мертвої точки (ВМТ), випускне вікно залишається відкритим 171° , тобто випускне вікно повністю закривається через $265^\circ 5'$ ПКВ. Процес дозаряду відбувається після проходження нижньої мертвої точки (НМТ), приблизно $85^\circ 5'$ триває інтенсивний випуск відпрацьованих газів, потім ще приблизно 10° ПКВ – випуск за рахунок інерції, коли поршень піднімається вгору. Тому при резонансному наддуву процес дозаряду може відбуватися зі 190° до $265^\circ 5'$ і триває $75^\circ 5'$ ПКВ [16].

Після розрахунку термодинамічного циклу двигуна за допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation [15] та визначення величини середнього ефективного тиску $p_e = 0,7 \text{ МПа}$, за емпіричною формулою розраховано середню температуру випускних газів при проходженні випускного вікна [9]:

$$T_k = 534,67e^{0,048p_e} = 534,67e^{0,048 \cdot 7} = 794,5 \text{ К}, \quad (1)$$

де $534,67$ і $0,048$ – емпіричні коефіцієнти; P_e – середній ефективний тиск, бар.

Далі визначено швидкість тиску хвиль, яка використовується в розрахунку резонатора:

$$a_0 = \sqrt{\gamma RT_k} = \sqrt{1,4 \cdot 287 \cdot 794,5} = 548,8 \text{ м}\cdot\text{с}^{-1}, \quad (2)$$

де $\gamma = 1,4$ – емпіричний коефіцієнт; $R = 287 \text{ Дж}\cdot\text{кг}^{-1}\cdot\text{К}^{-1}$ – універсальна газова стала; T_k – температура випускних газів, К.

Визначено довжину резонатора L_t за допомогою методики Блера [9, 14], яка показує, що довжина резонатора визначається до кінця звужуючого конусу

$$L_t = \frac{1000 \cdot a_0 \cdot Q_{ep}}{12n} = \frac{1000 \cdot 548,8 \cdot 171}{12 \cdot 6700} = 1167 \text{ мм}, \quad (3)$$

де a_0 – швидкість звуку в відпрацьованих газах, $\text{м} \cdot \text{с}^{-1}$; Q_{ep} – довжина фази випуску, ° повороту колінчастого валу (ПКВ) [10]; n – кількість обертів двигуна, для яких розраховується резонатор, хв^{-1} .

Ефективний діаметр випуску – діаметр труби, який відповідає випускному вікну гільзи двигуна

$$D_b = \sqrt{\frac{ab}{\pi}} = \sqrt{\frac{4 \cdot 30 \cdot 32 \cdot 2}{3,14}} = 50 \text{ мм}, \quad (4)$$

де a – ширина випускного вікна, мм; b – висота випускного вікна, мм; 2 – кількість випускних вікон розрахованого двигуна.

Далі розраховано коефіцієнти випуску, що використовуються в розрахунку резонатора. Вони є функціями режиму та типу двигуна:

- коефіцієнт для визначення діаметра кінця звужуючого конуса (конфузор):

$$K_0 = 1,0322e^{-0,0498p_e} = 1,0322e^{-0,0498 \cdot 7} = 0,73; \quad (5)$$

- коефіцієнт для визначення початкового діаметра конуса, що розширюється (дифузор):

$$K_1 = 1,9899e^{-0,0581p_e} = 1,9899e^{-0,0581 \cdot 7} = 1,33; \quad (6)$$

- коефіцієнт для визначення діаметра центральної циліндричної частини резонатора:

$$K_2 = 0,8439e^{-0,1226p_e} = 0,8439e^{-0,1226 \cdot 7} = 2,01. \quad (7)$$

Виконано розрахунок розмірів довжин основних частин випускної системи з двоступінчастим розширенням дифузору, за методикою [10]:

- довжина випускного патрубку, що знаходиться у циліндрі двигуна, вимірюється від стінки поршня до фланця кріплення резонатора

$$L_1 = 0,1 \cdot L_t = 0,1 \cdot 1167 = 116,7 \text{ мм}, \quad (8)$$

де L_t – довжина модернізованої випускної системи, мм;

- довжина першої ступені дифузора

$$L_2 = 0,41 \cdot L_t = 0,41 \cdot 1167 = 478,5 \text{ мм}; \quad (9)$$

- довжина другої ступені дифузора

$$L_3 = 0,14 \cdot L_t = 0,14 \cdot 1167 = 163,4 \text{ мм}; \quad (10)$$

- довжина центральної циліндричної частини випускної системи

$$L_4 = 0,11 \cdot L_t = 0,11 \cdot 1167 = 128,4 \text{ мм}; \quad (11)$$

- довжина конфузора

$$L_5 = 0,24 \cdot L_t = 0,24 \cdot 1167 = 280 \text{ мм}; \quad (12)$$

- довжина кінцевої циліндричної частини (хвостовика)

$$L_6 = L_5 = 280 \text{ мм}. \quad (13)$$

Розрахунок діаметрів основних частин випускної системи, за методикою [10]:

- початковий діаметр двоступінчастого дифузора

$$D_1 = K_1 D_b = 1,33 \cdot 50 = 66,5 \text{ мм}; \quad (14)$$

- середній діаметр двоступінчастого дифузора

$$D_2 = D_1 \left(\frac{D_3}{D_1} \right)^{\left(\frac{L_2}{L_2 + L_3} \right)^{1,33}}, \quad (15)$$

$$D_2 = 66,5 \left(\frac{100,5}{66,5} \right)^{\left(\frac{478,5}{478,5 + 164,3} \right)^{1,33}} = 87 \text{ мм};$$

- діаметр центральної циліндричної частини

$$D_3 = K_2 D_b = 2,01 \cdot 50 = 100,5 \text{ мм}; \quad (16)$$

- кінцевий діаметр конфузора

$$D_4 = K_0 D_b = 0,73 \cdot 50 = 36,5 \text{ мм}. \quad (17)$$

Після проведення розрахунку резонансної випускної системи проведено деякі уточнення, у зв'язку з тим, що на конкретному двигуні деякі розміри змінити неможливо. Початковий діаметр дифузора D_1 , до якого буде приєднано фланець кріплення резонатора до циліндра двигуна, прийнято 52 мм. Довжину випускного патрубку L_1 прийнято 88 мм. Дані розміри виміряно на діючому двигуні.

Проведено перерахунок довжини L_2 з урахуванням того, що модернізована довжина резонатора не повинна змінюватись:

$$L_2 \text{ перераховане} = L_2 + L_1 - L_2 \text{ дійсне}, \quad (18)$$

$$L_2 \text{ перераховане} = 478,5 + 116,7 - 88 = 507,2 \text{ мм}.$$

З урахуванням даних розмірів і поправок побудовано схему резонатора (рис. 2).

Виконано порівняльну характеристику конструктивних особливостей випускної системи

базового і модернізованого двигунів. Базова система випуску (рис. 3а) має конічну та циліндричну частину, але відсутній дифузор після циліндричної частини. Відсутність даної частини не дає змоги відбуватися резонансному наддуву, внаслідок чого недопалена частина робочої суміші викидається безповоротно в атмосферу. Тому використання даної випускної системи є небажаним.

Розроблена авторами роботи система випуску (рисунок 3в), на відміну від системи випуску, запропованої заводом-виробником (рис. 3б), має двоступінчастий конфузор, за рахунок якого перехідний режим є більш плавним. Також зменшились розміри випускної системи без втрати її основних характеристик, що є важливими при встановленні на мотоцикл.

Побудовано тривимірні моделі базової та модернізованих систем випуску, проведено їх аналіз в середовищі SolidWorks Flow Simulation. Для цього було задано параметри руху робочої суміші та отримана модель руху робочої суміші на режимі

резонансу (рис. 4). За результатом дослідження встановлено, що 15...20% робочої суміші, яка залишає випускне вікно, повернулося назад до циліндру двигуна. Ця, повернута, частина суміші забезпечує суттєве зростання потужності двигуна, при незмінній годинній витраті палива.

За допомогою випробувального навантажувального стенду власної розробки визначено ефективні показники двигуна ІЖ Планета Спорт 350 з трьома варіантами системи випуску двигуна:

- система базової конструкції, без резонатора;
- система з резонатором, запропонована заводом-виробником;
- система з резонатором, запропонована авторами роботи.

На рис. 5 наведено швидкісні характеристики ефективної потужності, залежної від частоти обертання двигуна. Встановлено, що потужність двигуна на режимі резонансу зростає на 3% при незмінній витраті палива.

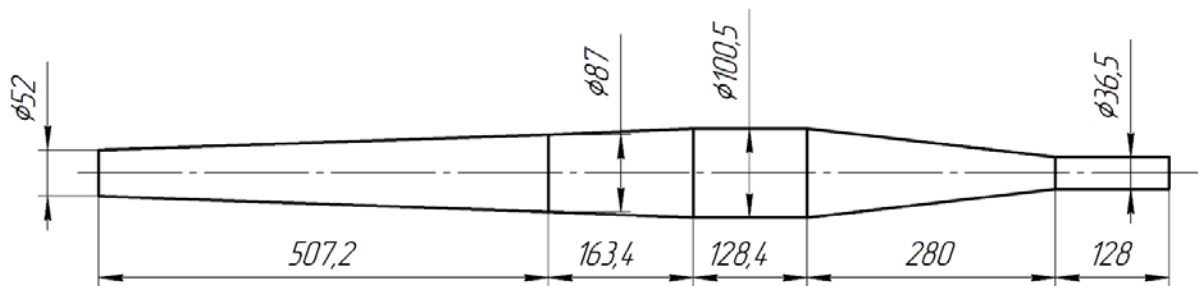


Рисунок 2. Ескіз спроектованого резонатора з основними розмірами

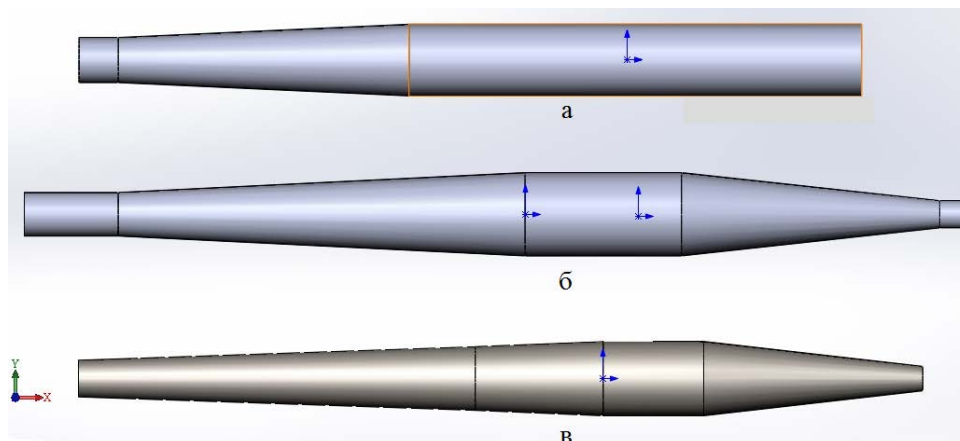


Рисунок 3. Випускні системи двигуна ІЖ Планета Спорт 350 (варіанти):

- а – базова випускна система; б – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником;
в – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи

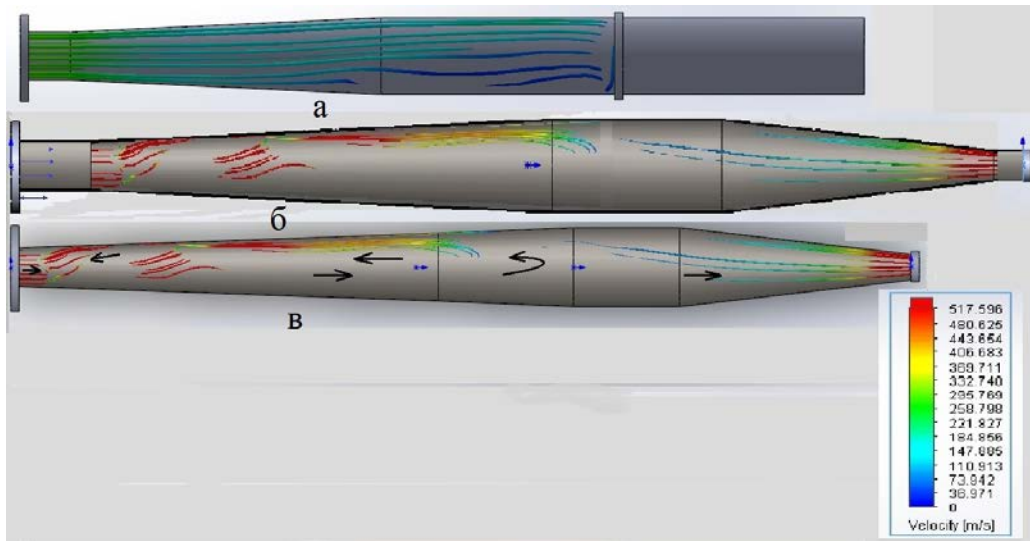


Рисунок 4. Схема руху відпрацьованих газів у випускних системах:

a – базова випускна система; *б* – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником; *в* – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи

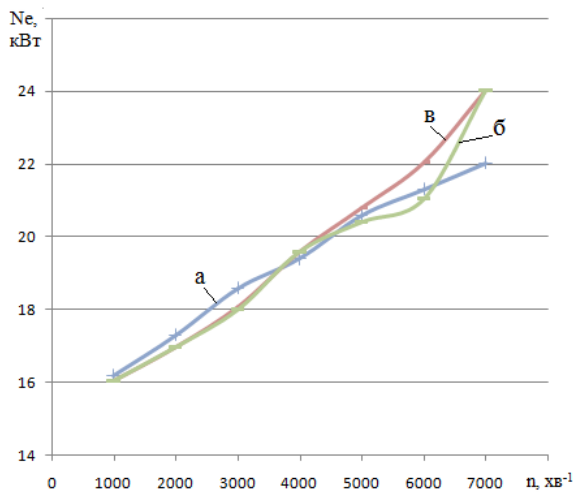


Рисунок 5. Залежність зміни потужності двигуна ДЖ Планета Спорт 350 від кількості обертів колінчастого валу:

a – базова випускна система; *б* – модернізована випускна система резонансного наддуву, запропонована заводом-виробником; *в* – модернізована система резонансного наддуву, запропонована авторами роботи

Висновки

1. За допомогою програми САПР SolidWorks отримано модель руху робочої суміші в резонаторі системи випуску у режимі резонансу. Дану модель можна вважати близькою до реального процесу в резонаторі. Доведено, що в розрахованому резонаторі дійсно відбувається повернення 15...20 % робочої суміші назад до циліндру.

2. Встановлено, що двигун з модернізованою системою випуску за рахунок реалізації резонансного наддуву має максимальну ефективну потужність 24,4 кВт – на 3 % більшу, у порівнянні з базовим двигуном.

Список літератури

1. Корогодський В.А. Наукові основи перспективних робочих процесів двигунів з іскровим запалюванням при внутрішньому сумішоутворенні : дис. ... д-ра техн. наук : 05.05.03 / Корогодський Володимир Анатолійович. – Харків, 2018. – 499 с.
2. Дмитриев П. 2-х тактныe двигатели с системой впрыска масла [Електронний ресурс] / П. Дмитриев. – Сайт «kater.ua». – 2013. – Режим доступу: http://kater.ua/usefull/articles/2kh_takny_e_dvigateli_s_si_stemoy_vpryska_masla/
3. Singh A.K. Current Status of Direct Fuel Injection in Two Stroke Petrol Engine - A Review / A.K. Singh, A. Lanjewar, A. Rehman // IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering. – Vol. 12, Issue 2 Ver. II. 2015, P. 2320–2334. doi: 10.9790/1684-12228693.
4. Слинко Г.І. Аналіз напрямків покращення економічності та екологічності 2-тактних двигунів внутрішнього згорання / Г.І. Слинко, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинко // Інноваційні аспекти розвитку автомобільного транспорту України : Міжнарод. наук.-практ. конф., 16-18 травня 2023 р. : Тези доповідей. – Кам'янське : ДДТУ, 2023. – С. 123–125.
5. Слинко Г.І. Дослідження впливу резонансного наддуву бензинового двотактного двигуна на його ефективні і екологічні характеристики / Г.І. Слинко, В.П. Лук'яненко // Тиждень науки – 2015 : зб. тез доп. наук.-практ. конф. викладачів, науковців, молодих учених, аспірантів, студентів ЗНТУ. В 5 т. – Т. 1. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2015. – С. 210.
6. Двигатели внутреннего сгорания: Теория поршневых и комбинированных двигателей. Учебник для втузов / Д.Н. Вырубов, Н.А. Иващенко, В.И. Ивин и др.; Под. ред. А.С. Орлина, М.Г. Круглова. – 4-е изд., перераб. и доп. – М. : Машиностроение, 1983. – 372 с.

7. Корогодский В.А. Оценка показателей газообмена при 3D-моделировании рабочего процесса двухтактного бензинового двигателя / В.А. Корогодский, Е.П. Воропаев // Автомобильный транспорт. – 2017. – № 40. – С. 101–113.
8. Sufei Wang. Simulation Research on the Effect of 2-Stroke Engine Exhaust Resonance on Aspiration / Sufei Wang, Fujun Zhang // Journal of Beijing Institute of Technology. – 2020. – 29(3). – P. 410–416. doi: 10.15918/j.jbit1004-0579.19108
9. Blair G.P. Design and Simulation of Two Stroke Engines / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 1996 – 647 p.
10. Двухтактные карбюраторные двигатели внутреннего сгорания / В.М. Кондрашов, Ю.С. Григорьев, В.В. Тупов и др. – М. : Машиностроение, 1990. – 272 с.
11. Орлин А.С. Двухтактные двигатели внутреннего сгорания / А.С. Орлин, М.Г. Круглов. – М. : Машгиз, 1960. – 556 с.
12. Березин С.Р. Теория и расчет газодинамических процессов в быстроходном 2-х тактом турбопоршневом двигателе : Автореферат дис. ... д-ра техн. наук : 05.04.02 / Березин Сергей Романович. – М., 1994. – 30 с.
13. Григорьев Ю.С. Мотоцикл без секретов. – М. : Машиностроение, 1973. – 113 с.
14. Blair G.P. The Basic Design of the Two Stroke Engine / Queens University Belfast, Society of Automotive Engineers. 1990 – 104 P.
15. Слинько Г.І. Тепловий і динамічний розрахунок ДВЗ : навчальний посібник з курсового проектування / Г.І. Слинько, Р.Ф. Сухонос, В.В. Слинько. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2024. – 130 с.
16. ИЖ Планета Спорт 350: инструкция по эксплуатации. – Ижевск, 1979. – 96 с.

Одержано 26.12.2024

RESEARCH ON THE INFLUENCE OF RESONANT CHARGING OF A TWO-STROKE GASOLINE ENGINE ON ITS POWER CURVE

- Georgy Slynko Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Roman Sukhonos M. Sc., Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: romevs@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Vira Slinko Senior lecturer of the Department of Automobiles, Heat Engines and Hybrid Power Plants, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vslinko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4553-8387
- Vitaly Lukyanenko M. Sc., Independent Researcher, Germany

Purpose. Investigate the efficiency of resonant charging of a two-stroke gasoline engine; to improve the energy characteristics of an existing internal combustion engine by installing an improved resonant exhaust system.

Research methods. The results of calculating the resonator of the exhaust system of a two-stroke gasoline engine using the combined Blair and Grigoriev method are presented. The modeling of exhaust gas flows was performed in the SolidWorks Flow Simulation. The Engine Calculation computer program was used to calculate the engine cycle. The object of the research is a two-stroke single-cylinder gasoline engine of the IZH Planeta Sport 350 motorcycle.

Results. The current issue of increasing the power of a 2-stroke gasoline internal combustion engine by implementing the phenomenon of resonant charging in the exhaust system has been resolved. The thermodynamic cycle of the IZH Planeta Sport 350 engine has been calculated with the determination of its main cycle parameters, exhaust gas pressure and temperature. The resonator has been calculated, which will provide maximum improvement in engine performance at nominal operating mode; 3D models of the three versions of exhaust system have been built: basic design (without resonator), with a resonator of the manufacturer, and with a resonator of the authors of the study's own design. The movement of exhaust gases in resonators of different models has been simulated in the SolidWorks Flow Simulation environment. Bench tests of the engine have been performed on a load bench, and speed characteristics have been built when working with different exhaust systems.

Scientific novelty. A model of the movement of the working mixture in the resonator of the exhaust system in the resonance mode was obtained. It was proved that in the calculated resonator, 15...20 % of the working mixture is actually returned back to the cylinder. For the first time, it was established that the IZH Planeta Sport 350 engine with a modernized exhaust system due to the implementation of resonant charging has a maximum effective power of 24.4 kW - 3% more than the basic engine.

Practical value. The method for calculating the influence of the effects of resonant charging of a gasoline 2-stroke engine on the effective performance of the engine can be used when designing new and modernizing existing internal combustion engines for various purposes.

Key words: 2-stroke internal combustion engine, exhaust gases, effective power, resonant charging, resonator, exhaust system, power curve.

References

1. Korohodskiy, V. A. (2018). *Naukovi osnovi perspektivnih robochih procesiv dviguniv z iskrovim zapalyuvannyam pri vnutrishnomu sumishoutvorenni* [Scientific foundations of promising working processes of spark-ignition engines with internal mixture formation] : dissertation... d-ra tehn. nauk : 05.05.03, Kharkiv, 499 [in Ukrainian].
2. Dmitriev, P. (2013). 2-h taktnye dvigateli s sistemoy vpryska masla [2-stroke engines with an oil injection system]. *kater.ua*. – Retrieved from http://kater.ua/usefull/articles/2kh_taktnye_dvigateli_s_sistemoy_vpryska_masla/ [in Russian]
3. Singh, A.K., Lanjewar, A., Rehman, A. (2015) Current Status of Direct Fuel Injection in Two Stroke Petrol Engine - A Review // *IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering*, Vol. 12, Issue 2 Ver. II, 2320–2334. doi: 10.9790/1684-12228693 [in English].
4. Slyn'ko, G.I., Suhonos, R.F., Slinko, V.V. (2023). Analiz napryamkiv pokrashennya ekonomichnosti ta ekologichnosti 2-taktnih dviguniv vnutrishnogo zgorannya [Analysis of directions for improving the economics and environmental friendliness of 2-stroke internal combustion engines]. Proceedings from International Scientific and Practical Conference *Innovacijni aspekti rozvitku avtomobilnogo transportu Ukrayini – Innovative aspects of the development of automobile transport in Ukraine*, 123–125. Kam'ianske: DDTU [in Ukrainian].
5. Slyn'ko, G.I., Lukyanenko, V.P. (2015). Doslidzhennya vplivu rezonansnogo nadduvu benzinovogo dvotaktnogo dviguna na jogo effektivni i ekologichni charakteristik [Investigation of the resonant supercharging of a two-stroke gasoline engine on its efficient and environmental characteristics]. Scientific and Practical Conference *Tizhden nauki-2015 – Week of Science-2015*, (p. 210). Vol. 1. – Zaporizhzhya : ZNTU [in Ukrainian].
6. Vyubov D.N., Ivashenko N.A., Ivin V.I. (1983). *Dvigateli vnutrennego sgoraniya: Teoriya porshnevih i kombinirovanyh dvigatelej. Uchebnik dlya vtuzov* [Internal combustion engines: Theory of piston and combined engines. Textbook] / Ed. A.S. Orlin, M.G. Kruglov. – 4th edition. – Moscow : Mashinostroenie, 372 [in Russian].
7. Korohodskiy, V.A., Voropaev, E.P. (2017). Ocenka pokazatelej gazoobmena pri 3D-modelirovanii rabocheho processa dvouhtaktnogo benzinovogo dvigatelya [Evaluation of gas exchange indicators in 3D modeling of the working process of a two-stroke gasoline engine] // *Avtomobilnyj transport – Automobile transport*, 40, 101–113 [in Russian].
8. Sufei Wang, Fujun Zhang (2020). Simulation Research on the Effect of 2-Stroke Engine Exhaust Resonance on Aspiration // *Journal of Beijing Institute of Technology*, 29(3), 410–416. doi: 10.15918/j.jbit1004-0579.19108 [in English].
9. Blair, G.P. (1996). *Design and Simulation of Two Stroke Engines* / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 647 [in English].
10. Kondrashov, V.M., Grigorev, Yu.S., Tupov, V.V. (1990). *Dvouhtaktnye karbyuratornye dvigateli vnutrennego sgoraniya* [Two-stroke carburetor internal combustion engines]. – Moscow : Mashinostroenie, 272 [in Russian].
11. Orlin, A.S. Kruglov, M.G. (1960). *Dvukhtaktnye dvigateli vnutrenneho sgoraniya* [Two-stroke internal combustion engines]. – Moscow: Mashgiz, 556 [in Russian].
12. Berezin, S.R. (1994). *Teoriya i raschet gazodinamicheskikh processov v bystrohodnom 2-h taktom turboporshnevom dvigatele* [Theory and calculation of gas-dynamic processes in a high-speed 2-stroke turbopiston engine]. Abstract of thesis ... d-ra tehn. nauk: 05.04.02. – Moscow, 30 [in Russian].
13. Grigorev, Yu.S. (1973). *Motocikl bez sekretov* [Motorcycle without secrets]. – Moscow : Mashinostroenie, 113 [in Russian].
14. Blair, G.P. (1990). *The Basic Design of the Two Stroke Engine* / Society of Automotive Engineers, Queens University Belfast, 104 [in English].
15. Slyn'ko, G.I., Sukhonos, R.F., Slinko, V.V. (2024). *Teplovij i dinamichnij rozrahunok DVZ : navchal'nij posibnik z kursovogo proektuvannja* [Thermal and dynamic calculation of internal combustion engine: manual for course project]. – Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic» [in Ukrainian].
16. *IZH Planeta Sport 350: instrukciya po ekspluatacii* [IZH Planeta Sport 350: Manual]. – Izhevsk, 1979, 96 [in Russian].

МЕХАНІЗАЦІЯ, АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА РОБОТИЗАЦІЯ

MECHANIZATION, AUTOMATION AND ROBOTICS

UDC 621.73.043 : 621.979.15

- Vasyl Obdul Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of Metal Forming, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: obdul@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0001-6490-8884
- Anton Matiukhin Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head of the Department of Metal Forming, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: matiukhin85@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-2261-0577
- Anna Kawalek Dr. of Technical Science, Professor, Czestochowa University of Technology, Czestochowa, Poland, *e-mail: anna.kawalek@pcz.pl*, ORCID: 0000-0003-0274-0582
- Anton Riabenko Candidate of Technical Science, Associate Professor, Department of System Analysis and Computational Mathematics, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: rjabenkoae@gmail.com*, ORCID: 0000-0001-7738-7918
- Oleksandr Yepishkin Assistant, Department of Metal Forming, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: yepishkin@zp.edu.ua*, ORCID: 0000-0003-1447-9473
- Viktoria Fedoseeva Student, Department of Metal Forming, National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: joxi.victoria@gmail.com*

ENERGY-EFFICIENT DESIGN OF SCREW PRESSES

Purpose. To improve the energy efficiency of screw presses by developing structures for the rational use of the flywheel kinetic energy, reducing losses on the return stroke and increasing the impact efficiency. This will reduce energy costs and improve productivity in forging, stamping and other technological operations.

Research methods. Increasing the energy efficiency of screw presses is achieved by developing and implementing design solutions aimed at reducing the energy accumulated during the reverse stroke, as well as ensuring its efficient use during the forward stroke. The main emphasis is placed on optimising the press mechanisms to minimise energy losses, which will significantly increase the overall efficiency of the equipment.

Results. As part of the study, a new design of the slider was proposed, which includes a kinematic disconnection of the nut. This reduces the energy usually accumulated by the flywheel during the reverse stroke and ensures more efficient use of energy during the forward stroke, which in turn reduces energy consumption and increases the efficiency of the press.

Scientific novelty. For the first time, designs have been developed that provide kinematic disconnection of the slider nut during the reverse stroke. These designs allow to reduce the accumulated energy and ensure its more rational use during the forward stroke. In addition, the design of the flywheel has been improved to optimise its moment of inertia depending on different press operating modes, which makes it possible to significantly improve the performance of press equipment under variable operating conditions.

Practical value. The results of the work make it possible to increase the energy efficiency of screw presses, which can be implemented in forging and stamping industries, especially in precision stamping technologies. The application of the developed structures increases the energy efficiency of screw presses, which reduces energy costs and ensures long-term and stable operation of the equipment.

Key words: press, screw, slider, nut, key, flywheel, drive, hydraulic circuit, frame.

Introduction

In modern production, presses are widely used to perform a variety of technological operations. The efficiency of their operation largely depends on their design features, in particular, on the use of flywheel kinetic energy. The accumulation of this energy on the return stroke remains one of the key issues affecting the energy efficiency and

productivity of the equipment. To address this problem, innovative design solutions are being offered to optimise the operation of presses and reduce energy losses.

Analysis of research and publications

Researchers pay considerable attention to improving press designs to increase their energy efficiency. One of the

main areas of research is the introduction of mechanisms for the accumulation and rational use of flywheel kinetic energy. Various designs have been proposed to reduce the amount of energy accumulated during the return stroke, including the installation of a nut in the slider with the possibility of kinematic disconnection or the use of a flywheel consisting of two parts [1–3]. Such innovative solutions have the potential to significantly improve the performance of press equipment, but require further research.

Purpose of the work

The aim of the study is to develop constructive solutions to optimise the operation of presses by rationally using the flywheel's kinetic energy. This involves the introduction of mechanisms that reduce energy losses on the return stroke and increase the efficiency of striking by accumulating energy on the forward stroke.

Research results

In recent years, screw presses have taken their rightful place in the list of forging and stamping equipment, especially among the equipment used in precision stamping technology, such as gas turbine engine blades, gears and other parts [4–6]. This led to the development of screw press designs and their individual components. This was especially true for the designs of drives for both the forward and reverse strokes of the press, especially the forward stroke drives for accumulating impact energy [7–9]. The most developed were direct-acting electric drives or those using a gear transmission with a ratio of $i = 4 : 5$, a main motor with a synchronous speed $n_{сумх} = 500 : 600$ and a unit power of 250 kW.

The motors operate in reverse mode on the down stroke and up stroke, operating in transient mode. And, as you know, theoretically, the transient mode efficiency is 0.5, and in the presence of slippage in the motor itself, it is even lower [10].

The developer of such presses is Weingarten. Along with these types of drives, hydraulic motors for driving the flywheel (Hasenklever) were developed simultaneously [11]. These types of drives are used for the manufacture of presses with a force of up to a nominal force $Pn = 12,500$ tf and a cold stroke force of up to 25,000 tf. The angular speed of the flywheel does not exceed 200 rpm, and the stroke frequency is ≈ 4.5 x/min (PZS presses). For presses with hydraulic motors, the number of slider strokes is 12 x/min for HSPRZ presses with a maximum force of 6300 tf and 6 x/min for HSPRZ presses with a maximum force of 25,000 tf [12].

The design of these presses uses the main drive in reverse mode to reverse the stroke, so it operates twice per cycle in transient mode with a theoretical efficiency of 0.5. At the same time, the maximum current exceeds $I \geq 1000A$ [13].

All screw press designs currently in operation have a significant drawback: an increase in the reverse stroke speed increases the energy accumulated by the flywheel, which must either be damped by the brake or the main drive operating time on the reverse stroke reduced [14].

The following design solutions are proposed to increase efficiency [15]. Use of pneumohydraulic drives (Fig. 1, 2). They are mounted in the upper crossbar of the press. The design of these accumulators allows for efficient operation of the reverse stroke drives. The principle of operation is clear from the hydraulic diagram of this reverse stroke energy storage device.

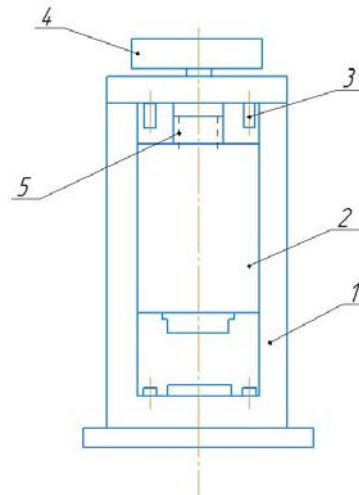


Figure 1. Screw press with energy storage: 1 – bed; 2 – slider; 3 – energy storage shield; 4 – handwheel; 5 – screw spindle

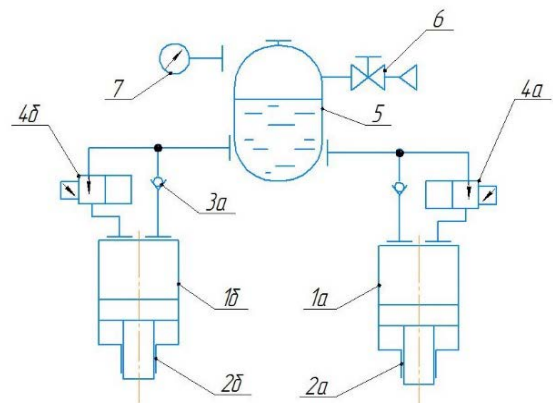


Figure 2. Hydraulic diagram of the reverse stroke energy storage: 1 – energy storage device; 2 – energy storage device shield; 3 – check valve; 4 – spool valve; 5 – pneumohydraulic accumulator; 6 – charging valve; 7 – pressure gauge

To reduce the level of accumulated energy, we propose the design of a slider with a nut, which makes it possible to exclude the flywheel from the reverse stroke as the main accumulator of kinetic energy (Fig. 3). The slider 1 has a rotatable nut 2, which is in kinematic contact with the screw 3. The slider 1 has rotary keys 4 and a system of levers 5, which are triggered when the slider 1 rises and take the slider 1 and nut 2 out of kinematic contact. During the upward movement, the handwheel and screw 3 stand still, only the nut 2 rotates, the moment of inertia of which is much lower than the moment of inertia of the handwheel. The design has a slider of a complicated construction.

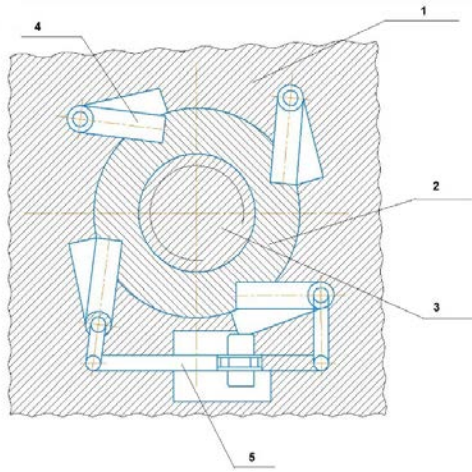


Figure 3. Slider construction: 1 – slider; 2 – nut; 3 – screw spindle; 4 – swivel key; 5 – lever system

According to the design, the flywheel consists of the following parts: outer flywheel 1, inner flywheel 2, key 3, return stroke 4, brake 5, slider 6, and screw 7. The principle of this design is clear from Fig. 4.

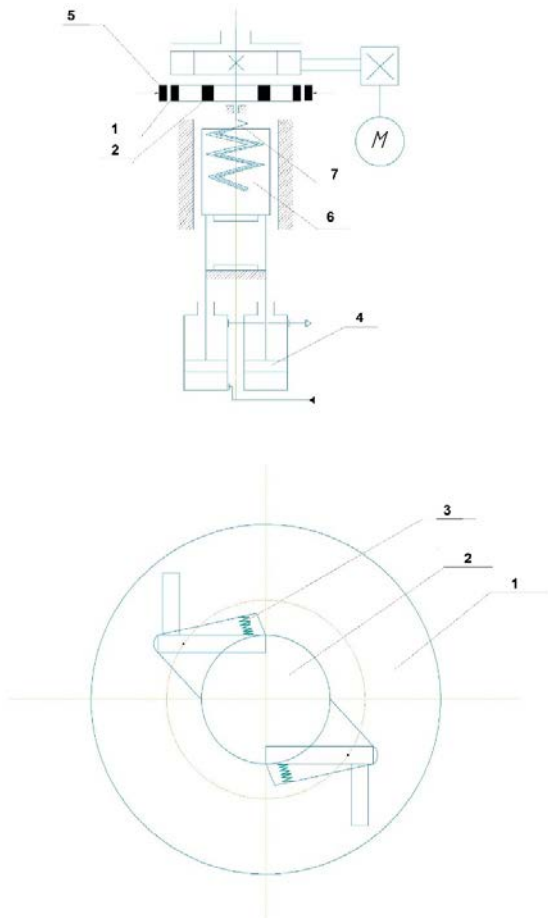


Figure 4. Slider construction: 1 – outer handwheel; 2 – inner handwheel; 3 – keyway; 4 – drive; 5 – brake; 6 – slider; 7 – screw

Conclusions

The problem of increasing the speed of screw presses can be solved by design means: the use of energy storage devices for reverse stroke, or a slight complication of the slider or driven flywheel. A preliminary analysis shows sufficient efficiency of the structures under consideration

References

1. Bocharov, Y. A. (1976). *Screw presses*. Moscow: Mashinostroenie, 247.
2. Polovina, N. N., Obdul, V. D., Polovina, Y. N. (1976). Certificate No. 517509 USSR., Bulletin No. 22.
3. Obdul, V. D., Matiukhin, A Yu., Shirokobokov, V. V., Obdul, D. V., Matiukhina, T. G., Vysotskaya N. I. (2023). Ukraine. Patent No. 127676 23, Bulletin No. 47.
4. Kešner, A., Chotěborský, R., Linda, M. (2017). The effect of microstructure on abrasive wear of steel. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 237, 012040. doi: 10.1088/1757-899X/237/1/012040
5. Pajak, M. (2010). Machine elements. To innovative production presses via roller screw planetary drives. *Konstruktion*, 1–2, 24–25.
6. Pennington, J. N. (2003). High-energy process cuts long products. *Modern Metals*, 59(5), 21–25.
7. Zheng, K., He, Z., Qu, H., Chen, F., Han, Y., Zheng, J.-H., Li, N. (2023). A novel quench-form and indie creep age process for hot forming of 2219 thin aluminum sheets with high precision and efficiency. *Journal of Materials Processing Technology*, 315, article ID 117931. doi: 10.1016/j.jmatprotec.2023.117931
8. Askarov, E., Zhankeldi, A., Absadykov, B., Smailova, G. (2018). Design features of a cam-screw press with a large effort. *News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences*, 5(431), 192–200. doi: 10.32014/2018.2518-170X.49
9. Landgrebe, D., Rautenstrauch, A., Kunke, A., Polster, S., Kriechenbauer, S., Mauermann, R. (2016). The effect of cushion-ram pulsation on hot stamping. *AIP Conference Proceedings*, 1769, article ID 070014. doi: 10.1063/1.4963414
10. Kriechenbauer, S., Mauermann, R., Muller, P. (2014). Deep drawing with superimposed low-frequency vibrations on servo-screw presses. *Procedia Engineering*, 81, 905–913. doi: 10.1016/j.proeng.2014.10.108
11. Endou, J., Murata, C. (2015). New forming technologies using screw type servo press. *Excellent Inventions in Metal Forming*, 60, 127–133.
12. Mabrouki, T., Boudeau, N., Maier, C. (2018). On energy consumption and optimization in hot metal forming processes. *International Journal of Mechanical Sciences*, 136, 134–145. doi: 10.1016/j.ijmecsci.2018.01.003
13. Schroder, C., Smirnov, E., Bogdanov, N. (2019). Analysis of energy efficiency of presses with servo drives. *Manufacturing Review*, 6, article ID 35. doi: 10.1051/mfreview/2019032
14. Kim, J. H., Lee, S. W., Kim, K. H. (2014). Development of energy-saving servo press technology. *Journal*

of *Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing*, 8(3), article ID 112–119. doi: 10.1299/jamdsm.2014jamdsm0006

15. Oh, J. Y., Park, S. H. (2020). Energy optimization strategies for high-speed mechanical presses. *Journal of Manufacturing Processes*, 50, 670–680. doi: 10.1016/j.jmapro.2020.01.008

Received 16.12.2024

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ КОНСТРУКЦІЇ ГВИНТОВИХ ПРЕСІВ

- Василь Обдул канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри обробки металів тиском Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: obdul@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-6490-8884
- Антон Матюхін канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри обробки металів тиском Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: matiukhin85@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2261-0577
- Анна Ковалек доктор технічних наук, професор PCz, Ченстоховський політехнічний університет, Ченстохова, Польща, e-mail: anna.kawalek@pcz.pl, ORCID: 0000-0003-0274-0582
- Антон Рябенко канд. фіз.-мат. наук, доцент, доцент кафедри системного аналізу та обчислювальної математики Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: rjabenkoae@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7738-7918
- Олександр Єпішкін асистент кафедри обробка металів тиском Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: yepishkin@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1447-9473
- Вікторія Федосєєва студентка, кафедра обробки металів тиском Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: joxi.victoria@gmail.com

Мета роботи. Підвищення енергоефективності гвинтових пресів через розробку конструкцій для раціонального використання кінетичної енергії маховика, зменшення втрат на зворотному ході та підвищення ефективності удару. Це дозволить знизити енергетичні витрати та поліпшити продуктивність при виконанні ковки, штампування та інших технологічних операцій.

Методи дослідження. Підвищення енергоефективності гвинтових пресів досягається шляхом розробки та впровадження конструктивних рішень, які спрямовані на зменшення енергії, накопичуваної під час зворотного ходу, а також на забезпечення її ефективного використання під час прямого ходу. Основний акцент зроблено на оптимізацію механізмів преса для мінімізації енергетичних втрат, що дозволить значно підвищити загальну ефективність обладнання.

Отримані результати. У рамках дослідження було запропоновано нову конструкцію повзуна, що містить кінематичне відключення гайки. Це дозволяє зменшити енергію, яку зазвичай накопичує маховик під час зворотного ходу, і забезпечує більш ефективне використання енергії на прямому ході, що в свою чергу знижує витрати електроенергії і підвищує ефективність роботи преса.

Наукова новизна. Уперше розроблено конструкції, що забезпечують кінематичне відключення гайки повзуна в процесі зворотного ходу. Ці конструкції дозволяють зменшити накопичену енергію і забезпечити більш раціональне її використання на прямому ході. Крім того, було вдосконалено конструкцію маховика, що дозволяє оптимізувати його момент інерції залежно від різних режимів роботи преса, що дає можливість значно покращити роботу пресового обладнання в умовах змінних робочих умов.

Практична цінність. Результати роботи дозволяють підвищити енергоефективність гвинтових пресів, що може бути впроваджено в ковальсько-штампувальних виробництвах, особливо у технологіях точного штампування. Застосування розроблених конструкцій підвищує енергоефективність гвинтових пресів, що дозволяє зменшити витрати на енергію та забезпечити довготривалу та стабільну роботу обладнання.

Ключові слова: прес, гвинт, повзун, гайка, шпонка, маховик, накопичувач, гідросхема, станина.

Список літератури

1. Бочаров Ю. А. Винтовые прессы / Ю. А. Бочаров. – М. : Машиностроение, 1976. – 247 с.
2. А. с. № 517509 СРСР. Винтовой пресс / Н. Н. Половина, В. Д. Обдул, Ю. Н. Половина. – опубл. 15.06.1976, Бюл. № 22.
3. Пат. 127676 Україна, МПК В30В 1/18 (2006.01). Винтовой пресс / В. Д. Обдул, А. Ю. Матюхін, В. В. Широкобоков, Д. В. Обдул, Т. Г. Матюхіна, Н. І. Висоцька ; заявл. 28.06.2022 ; опубл. 22.10.2023; Бюл. № 47.
4. Kešner A., The effect of microstructure on abrasive wear of steel / A. Kešner, R. Chotěborský, M. Linda // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. — 2017. — Vol. 237. — P. 012040. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/237/1/012040>.
5. Pajak M. Machine elements. To innovative production presses via roller screw planetary drives / M. Pajak // Konstruktion. – 2010. – No. 1–2. – P. 24–25.
6. Pennington J. N. High-energy process cuts long products / J. N. Pennington // Modern Metals. – 2003. – Vol. 59(5). – P. 21–25.
7. A novel quench-form and in-die creep age process for hot forming of 2219 thin aluminum sheets with high precision and efficiency / K. Zheng, Z. He, H. Qu et al. // Journal of Materials Processing Technology. – 2023. – Vol. 315. – article ID 117931. <http://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2023.117931>.
8. Design features of a cam-screw press with a large effort / E. Askarov, A. Zhankeldi, B. Absadykov, G. Smailova // News of the National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of Geology and Technical Sciences. – 2018. – Vol. 5(431). – P. 192–200. <http://doi.org/10.32014/2018.2518-170X.49>.
9. The effect of cushion-ram pulsation on hot stamping / D. Landgrebe, A. Rautenstrauch, A. Kunke, S. Polster, S. Kriechenbauer, R. Mauermann // AIP Conference Proceedings. – 2016. – Vol. 1769. – article ID 070014. <http://doi.org/10.1063/1.4963414>.
10. Kriechenbauer S. Deep drawing with superimposed low-frequency vibrations on servo-screw presses / S. Kriechenbauer, R. Mauermann, P. Muller // Procedia Engineering. – 2014. – Vol. 81. – P. 905–913. <http://doi.org/10.1016/j.proeng.2014.10.108>.
11. Endou J. New forming technologies using screw type servo press / J. Endou, C. Murata // Excellent Inventions in Metal Forming. – 2015. – Vol. 60. – P. 127–133.
12. Mabrouki T. On energy consumption and optimization in hot metal forming processes / T. Mabrouki, N. Boudeau, C. Maier // International Journal of Mechanical Sciences. – 2018. – Vol. 136. – P. 134–145. <http://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2018.01.003>.
13. Schroder C. Analysis of energy efficiency of presses with servo drives / C. Schroder, E. Smirnov, N. Bogdanov // Manufacturing Review. – 2019. – Vol. 6. – article ID 35. <http://doi.org/10.1051/mfreview/2019032>.
14. Kim J. H. Development of energy-saving servo press technology / J. H. Kim, S. W. Lee, K. H. Kim // Journal of Advanced Mechanical Design, Systems, and Manufacturing. – 2014. – Vol. 8(3). – article ID 112–119. <http://doi.org/10.1299/jamdsm.2014jamdsm0006>.
15. Oh J. Energy optimization strategies for high-speed mechanical presses / J. Y. Oh, S. H. Park // Journal of Manufacturing Processes. – 2020. – Vol. 50. – P. 670–680. <http://doi.org/10.1016/j.jmapro.2020.01.008>.

Наукове видання

**Нові матеріали і технології
в металургії та машинобудуванні № 4/2024**

Науковий журнал

Головний редактор:

д-р техн. наук, професор Сергій Беліков

Заступники гол. редактора:

д-р техн. наук, професор Вадим Ольшанецький

д-р техн. наук, професор Валерій Наумик

Оригінал-макет підготовлено у редакційно-видавничому відділі НУ «Запорізька політехніка»

Комп'ютерний дизайн та верстання:

Наталія Савчук

Реєстрація суб'єкта у сфері друкованих медіа:
Рішення Національної ради України з питань телебачення і радіомовлення
№ 3040 від 07.11.2024 року
Ідентифікатор медіа: R30-05583

Підписано до друку 20.01.2025. Формат 60×84/8
Папір офс. ризогр. Ум. др. арк. 8,6
Тираж 300 прим. Зам. № 29

69063, м. Запоріжжя, НУ «Запорізька політехніка», друкарня, вул. Жуковського, 64

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
ДК № 6952 від 22.10.2019