

Національний університет «Запорізька політехніка»

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

**НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ  
В МЕТАЛЛУРГИИ И МАШИНОСТРОЕНИИ**

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

НАУКОВИЙ ЖУРНАЛ

ВИХОДИТЬ ЧОТИРИ РАЗИ НА РІК

**№ 1'2024**

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 С. Б. Беліков (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

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

**Редакційно-видавнича рада:** С. Б. Беліков, В. Ю. Ольшанецький, В. В. Наумик, А. Ю. Матюхін, Н. О. Савчук, К. С. Бондарчук, Н. І. Висоцька

### Члени редколегії:

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

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

д-р техн. наук Ю. М. Внук (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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

д-р техн. наук В. А. Шаломеев (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

д-р техн. наук І. П. Волчок (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

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

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

д-р техн. наук О. Я. Качан (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

Українад-р фіз.-мат. наук С. В. Лоскутов (НУ «Запорізька політехніка»), Україна

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

д-р фіз.-мат. наук В. І. 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 № 7 від 5 березня 2024 року.

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

**Комп'ютерний дизайн та верстання:** Н. О. Савчук

**Адреса редакції:** 69063, Запоріжжя, вул. Жуковського, 64, тел. (061) 769-82-96, редакційно-видавничий відділ  
e-mail: [rvv@zntu.edu.ua](mailto:rvv@zntu.edu.ua)

© Національний університет «Запорізька політехніка», 2024

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:** S. Byelikov, V. Ol'shanetskii, V. Naumyk, A. Matiukhin, N. Savchuk, K. Bondarchuk, N. Vysotska

### Members of the editorial board:

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 Doctor of Physics and Mathematics Sciences, Corresponding Technology Department of Mechanics and MachineDesign), Poland  
Dr. Sc. Nataliia Kalinina (DNU), Ukraine  
Dr. Sc. Sergey Gomenyuk (ZNU), Ukraine  
Dr. Sc. Sergey 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. Ivan Volchok (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 7, March 19, 2024.

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

**Computer design and layout:** N. Savchuk

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

© National University "Zaporizhzhia Polytechnic", 2024

## ЗМІСТ

### СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

<b>Бурова Д. В.</b> СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЯДУ КОНСТРУКЦІЙНИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМООБРОБКИ З ВИТРИМКОЮ У МІЖКРИТИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР (МКІТ)..	6
--	---

### КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ

<b>Давидюк А. В.</b> ЗМІНА СРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ МОДИФІКУВАННІ ПОРОШКОВИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ .....	13
<b>Вініченко В. С., Плєскач В. М., Єршов А. В., Волков Г. П., Іванченко Є. Ю.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ НА ЇХ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ .....	18
<b>Підковинська У. В., Савченко В. О.</b> ВПЛИВ НАПОВНЮВАЧІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ .....	24

### ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

<b>Комісаров О. О., Пухальська Г. В., Дядя С. І.</b> ПОСТ-ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК ПІСЛЯ 3D ДРУКУ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ .....	31
<b>Шевченко В. Г., Баженов Є. В., Попов С. М., Шалева Н. В.</b> ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКРИТТЯ ІЛЬМЕНІТОВОГО КОНЦЕНТРАТУ ЗА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФТОРИДУ АМОНІЮ .....	41

### МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

<b>Джус А. В., Нарівський О. Е., Сніжної Г. В., Беліков С. Б., Субботін С. О., Пуліна Т. В.</b> ЗАКОНОМІРНОСТІ І МЕХАНІЗМИ ПІТІНГУВАННЯ СПЛАВУ 06ХН28МДТ (АНАЛОГ СТАЛЬ AISI 904L) В МОДЕЛЬНИХ ОБОРОТНИХ ВОДАХ ПІДПРИЄМСТВ .....	47
<b>Слинько Г. І., Беженов С. О., Бокарьов В. І., Слинько В. В., Шемет І. В.</b> ПРО ВПЛИВ ФОРМИ КАМЕР ЗГОРАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ .....	59
<b>Комочкін М. С., Циганов В. В., Сахнюк Н. В., Лазарева О. О., Кривих Ю. І.</b> ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД .....	69
<b>Євсєєва Н. О., Сухонос Р. Ф., Крестьянінов С. П.</b> МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОГРІВУ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДВЗ ІЗ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВОДЯНОГО НАСОСА .....	76
<b>Слинько Г. І., Рябошапка Н. Є., Сухонос Р. Ф., Євсєєва Н. О., Солдатченков О. Г.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОПУСКІВ ЗАПАЛЮВАННЯ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ОБЕРТАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА .....	82

### НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

<b>Ольшанецький В. Ю., Кононенко Ю. І., Кононенко А. В., Скребцов А. А.</b> ПРО ВЗАЄМОДІЮ ЧАСТИНОК ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ МІЖ СОБОЮ ТА З РОБОЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ .....	89
<b>Нестеров О. В., Рубан В. Т., Повзло В. М.</b> ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИБУХОПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНОЇ ЗАХИСНОЇ АТМОСФЕРИ ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ЦЕМЕНТАЦІЇ .....	92

# CONTENTS

## STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

<b>Burova D.</b> STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A SERIES OF STRUCTURAL STEEL AFTER HEAT TREATMENT WITH ENDURANCE IN THE INTERCRITICAL TEMPERATURE INTERVAL .....	6
---	---

## STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

<b>Davidyuk A.</b> CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS WHEN MODIFIED WITH POWDER COMPOSITIONS .....	13
<b>Vinichenko V., Pleskach V., Yershov A., Volkov G., Ivanchenko E.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF FIBER COMPOSITES ON THEIR PERFORMANCE PROPERTIES .....	18
<b>Pidkovynska U., Savchenko V.</b> INFLUENCE OF FILLERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYMER MATRIX ...	24

## TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

<b>Komisarov O., Pukhalska H., Dyadya S.</b> POST-PROCESSING OF DETAILS BY MILLING ON A CNC MACHINE AFTER 3D PRINTING BY THE SOLUTION METHOD.....	31
<b>Shevchenko V., Bazhenov E., Popov S., Shaleva N.</b> LABORATORY STUDIES OF THE PROCESS OF OPENING ILMENITE CONCENTRATE USING ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGY USING AMMONIUM FLUORIDE .....	41

## MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

<b>Dzhus A., Narivskiy O., Snizhnoi G., Byelikov S., Subbotin S., Pulina T.</b> PATTERNS AND MECHANISMS OF PITTING OF 06XH28MДТ ALLOY (ANALOGUE OF AISI 904L STEEL) IN MODEL RECYCLED WATER OF ENTERPRISES .....	47
<b>Slyn'ko G., Bezhenov S., Bokarov V., Slyn'ko V., Shemet I.</b> ON THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE ON ITS EFFICIENT INDICATORS .....	59
<b>Komochkin M., Tsyganov V., Sakhniuk N., Lazarieva O., Kryvykh Y.</b> PHYSICAL MODELING OF WEARING PROCESSES OF THE AIRFOIL SHROUD PLATFORMS OF GAS TURBINE ENGINE .....	69
<b>Yevsyeyeva N., Sukhonos R., Krestjaninov S.</b> MATHEMATICAL MODELING OF HEATING PROCESS THE COOLING SYSTEM OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING WATER PUMP ELECTRIC DRIVE .....	76
<b>Slyn'ko G., Ryaboshapka N., Sukhonos R., Yevsyeyeva N., Soldatchenkov O.</b> STUDY OF THE INFLUENCE OF MISFIRES ON THE UNEVEN ROTATION OF THE CRANKSHAFT OF A GASOLINE ENGINE .....	82

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

<b>Ol'shanetskii V., Kononenko J., Kononenko A., Skrebtsov A.</b> ABOUT PARTICLE INTERACTION OF ARBITRARY FORM BETWEEN THEMSELVES AND THE WORKING SURFACE .....	89
<b>Nesterov O., Ruban V., Povzlo V.</b> INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF AN EXPLOSION AND FIRE-PROOF PROTECTIVE ATMOSPHERE DURING CEMENTING .....	92

## СТРУКТУРОУТВОРЕННЯ. ОПІР РУЙНУВАННЮ ТА ФІЗИКО-МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

### STRUCTURE FORMATION. RESISTANCE TO DESTRUCTION AND PHYSICAL-MECHANICAL PROPERTIES

УДК 621.316.13

Бурова Д. В.

канд. техн. наук, доцент кафедри матеріалознавства і перспективних технологій  
ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», м. Дніпро, Україна,  
e-mail: burovadasha1990@gmail.com, ORCID:0009-0000-3460-8602

### СТРУКТУРА ТА МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ РЯДУ КОНСТРУКЦІЙ- НИХ СТАЛЕЙ ПІСЛЯ ТЕРМООБРОБКИ З ВИТРИМКОЮ У МІЖКРИ- ТИЧНОМУ ІНТЕРВАЛІ ТЕМПЕРАТУР (МКІТ)

**Мета роботи.** Показати ефективність різних способів термообробки досліджених сталей з нагрівом в МКІТ, в результаті яких підвищуються їх механічні властивості, що обумовлене здобуттям багатофазної структури, однією зі складових якої у ряді випадків є метастабільний аустеніт.

**Методи дослідження.** Досліджено сталі 14Г2, 20ГЛ, 20ГФЛ 45Г. Проводилися різноманітні види термічної обробки з нагрівом у міжкритичний інтервал температур. В сталях, які досліджували, була отримана багатофазна дисперсна за хімічним складом структура. Використовувались дюрOMETричний, металографічний і рентгенівський методи дослідження. Визначали механічні властивості при розтягненні і ударна в'язкість. Ці властивості порівнювались з отриманими у досліджених сталях після типової термообробки.

**Отримані результати.** Показано, що в досліджених сталях при здійсненні різних способів термообробки немає необхідності при нагріванні отримувати однофазну однорідну за хімічним складом аустенітну структуру. Створення в досліджених сталях багатофазної дисперсної мікронеоднорідної структури способами термообробки, що включають регламентовані нагрівання і витримку в МКІТ, дозволяє отримати після нормалізації, гарту і високого або низького відпускання, а також ізотермічного гарту хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей, рівень яких перевищує одержуваний після звичайного процесу.

**Наукова новизна.** Розглядається альтернативна точка зору, згідно з якою для підвищення механічних і службових властивостей сталей необхідне отримання в них багатофазних дисперсних мікронеоднорідних структур, що складаються з мартенситу, бейніту, фериту, карбідів, карбонітридів і метастабільного залишкового аустеніту, а також їх різноманітних поєднань. Для отримання таких структур доцільно при проведенні термообробки доевтектоїдних сталей використовувати нагрівання і витримку в МКІТ, в яких утворюється аустеніт, поряд з ним присутні ферит і карбіди. При цьому аустеніт має хімічну мікронеоднорідність, тому що на його межі з карбідом концентрація вуглецю істотно вища, ніж на межі з феритом.

**Практична цінність.** Підвищення механічних властивостей сталей дозволяє збільшити експлуатаційну стійкість деталей машин, що є важливою задачею матеріалознавства. Одним із напрямків її вирішення є отримання в сталях багатофазної структури, однією зі складових якої є метастабільний аустеніт, в якому відбувається при навантаженні динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) та ефект самогартування при навантаженні (СГН). Способи термообробки з нагріванням у МКІТ легко реалізуються в умовах виробництва та дозволяють забезпечити енергозбереження. Режими їх проведення слід вибирати з урахуванням отримання необхідних властивостей, вихідної структури, її дефектності та перерізу виробів.

**Ключові слова:** МКІТ, нормалізація, гарт, відпускання, багатофазна структура, механічні властивості.

#### Вступ

Широко поширеним у навчальній, довідковій літературі та заводській практиці є уявлення про те, що в таких способах термообробки, як нормалізація та гартування доевтектоїдних сталей нагрівання слід проводити в однофазну аустенітну область з невеликим перевищенням точки  $A_{c3}$ , забезпечуючи розчинення карбідів в аустеніті та вирівнювання його. В результаті після термообробки отримують дрібнозернисту структуру, а у разі гартування – однорідний за хімічним

складом мартенсит або бейніт. При цьому в структурі відсутні ферит та карбіди. У роботі розглядається альтернативна точка зору, згідно з якою для підвищення механічних і службових властивостей сталей необхідне отримання в них багатофазних дисперсних мікронеоднорідних структур, що складаються з мартенситу, бейніту, фериту, карбідів, карбонітридів і метастабільного залишкового аустеніту, а також їх різноманітних поєднань [1–3]. Можуть бути структури, які включають в повному обсязі складові, або лише деякі з них. Для отримання таких структур доцільно при

проведенні термообробки доєвтектоїдних сталей використовувати нагрівання і витримку в МКІТ, в яких утворюється аустеніт, поряд з ним присутні ферит і карбіди. При цьому аустеніт має хімічну мікронеоднорідність, тому що на його кордоні з карбідом концентрація вуглецю істотно вища, ніж на кордоні з феритом. Це дозволяє отримати після термообробки багатозону дисперсну мікронеоднорідну структуру. Широке промислове застосування знайшов лише гарт із МКІТ низьковуглецевих сталей, що використовуються для глибокої витяжки. Він забезпечує отримання двофазної структури, що складається з фериту та 25–30 % низьковуглецевого мартенситу [4]. У роботі [5] показана доцільність нормалізації з нагріванням у МКІТ спеціально розроблених для цього будівельних сталей 09Г2СЮЧ та 09ХГ2СЮЧ. Відомі дослідження з ізотермічного гарту з МКІТ стали 37ГС [6], що зазвичай піддається поліпшенню. У роботах [7–9] запропоновано при проведенні термообробок сталей з нагріванням у МКІТ застосовувати комбінований нагрів: спочатку в МКІТ з регламентованою витримкою, а потім короткочасно в аустенітну область. Це дозволяє, якщо потрібно, виключити після гартування утворення в структурі фериту, що знижує властивості міцності, і зберегти мікронеоднорідність хімічного складу, отриману попереднім нагріванням в МКІТ. Ефективність зазначених термообробок з нагріванням в МКІТ показана на порівняно невеликій кількості сталей.

### Мета роботи

Відповідної інформації для досліджених сталей 14Г2, 20ГЛ, 20ГФЛ 45Г у літературі немає. Метою роботи було отримати позитивні результати, які підтвердили б правильність альтернативної точки зору про недоцільність у ряді випадків, наприклад при загартуванні досліджених доєвтектоїдних сталей, обов'язково домагатися нагріванням та витримкою отримання однорідного за хімічним складом аустеніту. У свою чергу це дозволило б за рахунок нагріву в МКІТ і, відповідно, зниження температури нагріву реалізувати ресурсозбереження.

### Матеріал і методика досліджень

У даній роботі ставилося завдання в сталях, що широко застосовуються: 14Г2, 20ГЛ, 20ГФЛ 45Г (табл.1), використовувати способи термообробки, що застосовують на виробництві (нормалізація, гартування та відпускання), реалізувавши нагрівання та витримку в МКІТ, отримати в них багатозону дисперсну за хімічним складом структуру та за рахунок цього підвищити їх механічні властивості.

**Таблиця 1** – Хімічний склад та критичні точки досліджених сталей

Сталь	Хімічний склад, мас. %						Критичні точки		
	C	Mn	Si	V	S	P	Ac <sub>1</sub>	Ac <sub>3</sub>	Mn
14Г2	0,13	1,60	0,32	-	0,020	0,018	709	825	410
20ГЛ	0,19	1,38	0,45	-	0,019	0,020	720	860	420
20ГФЛ	0,21	1,55	0,51	0,12	0,025	0,025	735	875	435
45Г	0,46	0,87	0,32	-	0,027	0,021	720	770	

Особливістю досліджень було те, що при проведенні термообробки в ряді випадків після нагрівання в МКІТ [10] або перед ним [11] проводилася аустенітизація. Крім того, був реалізований спосіб ізотермічного гарту, що полягає в охолодженні до необхідної температури утворення нижнього бейніту (після нагрівання в МКІТ або аустенітну область) у воді, що більш екологічно, а не в розплаві солей, як це зазвичай прийнято. Витримка після цього проводилася у печі [12]. У роботі застосовувалися металографічний, рентгенівський методи дослідження та визначалися механічні властивості досліджених сталей.

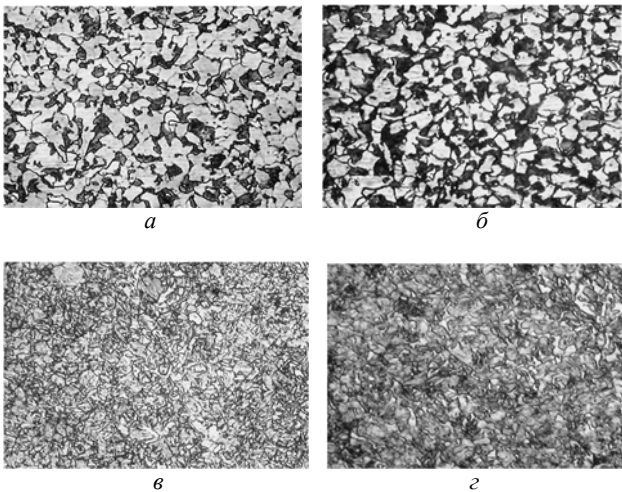
### Результати досліджень

У табл. 2 наведені дані, що показують, що нормалізація з нагріванням в МКІТ за оптимальними режимами дозволяє отримати більш високий рівень механічних властивостей, ніж аналогічна термообробка типового режиму з нагріванням в аустенітну область. Для сталі 20ГЛ додатково проведено нормалізацію з нагріванням у МКІТ з попередньою, а також подальшою аустенітизацією. Їхня роль полягає в отриманні дрібнозернистого аустеніту. При вибраній температурі і витримці МКІТ збільшується кількість аустеніту в структурі і знижується частка фериту. Відбувається перерозподіл вуглецю та марганцю між  $\alpha$  і  $\gamma$ - фазами та збагачення ними останньої. Внаслідок цього підвищується її стійкість до розпаду при охолодженні. Сформована після нормалізації з МКІТ структура являє собою ферит і дисперсну феритокарбідну суміш. Її більше, ніж при аналогічній термообробці за типовим режимом, що передбачає нагрівання в аустенітну область (рис. 1а, б). Це і зумовлює підвищення властивостей міцності. Велика пластичність є наслідком очищення фериту від вуглецю, можливо, і азоту, що є у сталі [13]. У фундаментальній роботі [14] докладно досліджена в доєвтектоїдних сталях кінетика утворення аустеніту, збільшення в ньому вмісту вуглецю порівняно з вихідним та фазовий склад при різних витримках у МКІТ. Так у сталі 20 після витримки 60–120 хв в МКІТ кількість аустеніту більш ніж у 2 рази перевищує рівноважну. Зміст у ньому вуглецю також значно вище вихідного.

Відповідно, після охолодження з МКІТ на повітрі в структурі має бути більше феритокарбідної суміші, ніж після нормалізації за типовим режимом. Отримані у роботі результати підтверджують це.

Вивчався також вплив на механічні властивості поліпшення з нагріванням під гартування в МКІТ, оскільки аналогічна термообробка з аустенітизацією при температурах Ac<sub>3</sub>+(30–50) °С широко застосовується для досліджених сталей. Отримані дані показують, що гартування з МКІТ і високе відпускання дозволяють отримати підвищений рівень механічних властивостей порівняно з ними після поліпшення за типовим режимом (табл. 3). Зростання властивостей міцності можна пояснити збільшенням кількості карбідів, що виділилися при високому відпусканні в результаті розпаду мартенситу з підвищеним вмістом вуглецю,

що утворився зі збагаченого ним аустеніту, що виник після витримки в МКІТ. Це підтверджують дані роботи [15], згідно з якою мартенсит, що виник у результаті загартування сталей 40ГС і 40Г2С з МКІТ, мав на 10–20 % більшу твердість, ніж після звичайного гартування. Певну роль можуть грати також карбіди, які не розчинилися при нагріванні під гартування. Більш висока пластичність сталей після поліпшення, що включає на першому етапі нагрівання та витримку в МКІТ, обумовлена дрібнозернистістю структури, присутністю в ній рівномірно розподілених невеликих за розмірами ділянок фериту (рис. 1а), очищеного від вуглецю та азоту, формуванням розвиненої субструктури в  $\alpha$ -твердому розчині, коагуляцією карбідів. Вплив на механічні властивості аустенітизації, проведеної перед витримкою МКІТ і після неї, вивчено на сталі 45Г, яка піддавалася поліпшенню (табл. 3). Попередня аустенітизація з охолодженням на повітрі до 500–550 °С, наступне нагрівання МКІТ і витримка 60 хв дозволяють отримати дрібне зерно в сталі (10 бал). Короткочасна аустенітизація після витримки в МКІТ і подальше охолодження у воді виключають утворення фериту, але зберігають хімічну неоднорідність мартенситу, що утворився. Комбінований нагрів підвищує властивості міцності, зберігає достатню пластичність і ударну в'язкість. Ці дані узгоджуються з результатами, отриманими для маловуглецевих складнолегованих високоміцних сталей мартенситного класу в роботі [16].



**Рисунок 1.** Мікроструктура сталі 20ГЛ після різних термообробок  $\times 500$ :

а – нормалізація за типовим режимом; б – нормалізація з нагріванням МКІТ: 760 °С, 60 хв; в – гартування з нагріванням МКІТ: 760 °С, 60 хв, відпускання 630 °С, 60 хв, г – ізотермічне гартування з нагріванням МКІТ: 760 °С, 60 хв, охолодження у воді до 470 °С, витримка 40 хв

**Таблиця 2 –** Механічні властивості досліджених сталей після нормалізації за типовим режимом та з нагріванням у МКІТ

Сталь	Режим термообробки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
14Г2	860 °С, 20 хв, пов.	432	617	20	48	0,66
	760 °С, 60 хв, пов.	468	669	25	59	0,84
20ГЛ	890 °С, 20 хв, пов.	408	562	22	38	1,20
	760 °С, 60 хв, пов.	420	586	30	50	1,67
	890 °С, 20 хв, 760 °С, 60 хв, пов.	452	605	34	67	1,73
	760 °С, 60 хв, 890 °С, 5 хв, пов.	435	596	35	70	1,85
20ГЛ	930 °С, 20 хв, пов.	413	575	24	54	1,38
	780 °С, 60 хв, пов.	546	632	26	68	1,67
45Г	850 °С, 20 хв, пов.	640	730	23	67	1,40
	760 °С, 60 хв, пов.	650	750	25	70	1,55

Примітка: пов. – охолодження на повітрі.

Загартування з МКІТ і низьке відпускання дозволяють у досліджених сталях отримати більш високі властивості міцності, ніж після нормалізації та поліпшення, виконаними з нагріванням на ту ж температуру. При цьому на достатньому рівні зберігається пластичність та ударна в'язкість (табл. 4). Режимом нагріву в МКІТ та відпусканням механічні властивості можна коригувати у потрібному напрямку. При поясненні впливу хімічної мікронеоднорідності структури, яку отримали після загартування з МКІТ і низького відпускання, на механічні властивості слід врахувати утворення кристалів мартенситу з широким спектром вмісту вуглецю. Важливу роль грає метастабільний залишковий аустеніт, незважаючи на те, що його кількість не перевищує 10 % [1–3]. Він, розташовуючись за межами рейок відпущеного мартенситу, підвищує опір руйнуванню. Крім того, перетворення залишкового аустеніту на мартенсит деформації збільшує пластичність і ударну в'язкість [1–3]. Певну роль у підвищенні пластичності грає ферит, що зберігся у структурі. Гартування з МКІТ і низьке відпускання вимагають менше енерговитрат, ніж покращення за типовим режимом. При необхідності виключити ферит із структури поверхневого шару, наприклад, для підвищення його зносостійкості, може бути застосовано гартування ТВЧ з нагріванням в аустенітну область [17]. Отримані в роботі дані показують також можливість забезпечення хорошого поєднання механічних властивостей у досліджених сталях ізотермічним гартуванням з нагріванням МКІТ (табл. 5).



У сталі 14Г2, в якій після ізотермічного гартування з МКІТ отримана найбільш висока пластичність, структура являла собою ~ 20 % фериту, ~20 % залишкового аустеніту, решта – нижній бейніт. Згідно з даними рентгенівського аналізу, при випробуваннях механічних властивостей залишковий аустеніт перетворюється на мартенсит деформації. У зоні рівномірного подовження зразків при розтягуванні кількість залишкового аустеніту зменшується з ~20 % до ~10 %. Динамічне деформаційне мартенситне перетворення (ДДМП) є не лише механізмом зміцнення, а й підвищення пластичності [1–3]. Збільшує пластичність ферит, рівномірно розподілений у структурі у вигляді малих за розмірами ділянок (рис. 1з). Кількісним співвідношенням структурних складових, розвитком ДДМП, а, отже, механічними властивостями можна керувати зміною температурно-тимчасових режимів, МКІТ, а також в бейнітній області. Нагрівання в МКІТ досліджених сталей доцільно проводити при температурах  $A_{c1} + (30–60 \text{ } ^\circ\text{C})$ . Вищий нагрів в області МКІТ збільшує кількість аустеніту, але ступінь його збагачення вуглецем знижується. В результаті після гартування, у тому числі ізотермічного, в структурі зменшується кількість фериту і залишкового аустеніту, що надають сталям підвищену пластичність, і збільшується частка мартенситу або бейніту при ізотермічному гартуванні, що підвищують властивості міцності. Витримку МКІТ для отримання в зразках досліджених сталей найбільш хорошого поєднання механічних властивостей доцільно здійснювати протягом 60 хв. Температура ізотерми для зразків сталей 14Г2, 20ГЛ та 20ГФЛ повинна становити 450–500  $^\circ\text{C}$ , 45Г–400  $^\circ\text{C}$ . Більш низькі температури ізотерми створюють у бейніті більш високий ступінь його пересичення вуглецем, що підвищує властивості міцності і знижує пластичність і ударну в'язкість. При більш високих температурах утворюється верхній бейніт, який охрупчує сталь. При малих витримках після ізотермічного гарту у досліджених сталях утворюється найбільша кількість залишкового аустеніту, а поряд з нижнім бейнітом може бути присутнім у структурі мартенсит. Крім того, залишковий аустеніт при випробуваннях механічних властивостей інтенсивно перетворюється на мартенсит деформації. Ці фактори збільшують властивості міцності, але знижують пластичність і ударну в'язкість.

При витримках 40–60 хв кількість залишкового аустеніту та ступінь його стабільності оптимізуються, а в бейніті – формується розвинена субструктура, що забезпечує високий рівень пластичності та ударної в'язкості за достатньої для багатьох випадків міцності. Однак слід наголосити, що при виборі режиму термообробки з нагріванням у МКІТ необхідно враховувати хімічний склад сталі, її вихідну структуру та дефектність, що є наслідком деформації, а також переріз виробу [14].

Способи термообробки з нагріванням у МКІТ є ресурсозберігаючими, оскільки забезпечують більш високий рівень механічних властивостей при меншій, у ряді випадків, витраті енергоносіїв.

**Таблиця 3** – Механічні властивості досліджених сталей після поліпшення за типовим режимом та гарту з МКІТ та високого відпускання

Сталь	Режим термообробки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
14Г2	870 $^\circ\text{C}$ , 20 хв, в., від., 650 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	557	618	18	48	0,72
	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 650 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	575	631	21	53	0,98
20ГЛ	890 $^\circ\text{C}$ , 20 хв, в., від., 630 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	563	661	21	56	1,18
	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 630 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	575	678	28	68	1,66
20ГФЛ	930 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 670 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	535	617	20	51	1,23
	890 $^\circ\text{C}$ , 20 хв, 760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, пов.	546	632	25	63	1,62
45Г	850 $^\circ\text{C}$ , 20 хв, в., від., 550 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в.	640	750	16	55	0,91
	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 550 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в.	670	840	19	61	1,3
	850 $^\circ\text{C}$ , 20 хв, 760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 550 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в.	690	895	15	57	1,2
	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, 890 $^\circ\text{C}$ , 5 хв в., від., 550 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в.	710	910	13	55	0,98

Примітка: в. – охолодження у воді, пов. – охолодження на повітрі, від. – відпускання.

**Таблиця 4** – Механічні властивості досліджених сталей після гарту з МКІТ та низького відпускання

Сталь	Режим термообробки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_b$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	КСУ, МДж/м <sup>2</sup>
14Г2	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 250 $^\circ\text{C}$ , 60 хв	950	1070	12	38	0,58
20ГЛ	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 300 $^\circ\text{C}$ , 60 хв	1050	1280	12	47	0,74
20ГФЛ	780 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 300 $^\circ\text{C}$ , 60 хв	1090	1250	15	51	0,78
45Г	760 $^\circ\text{C}$ , 60 хв, в., від., 250 $^\circ\text{C}$ , 60 хв	1340	1590	12	49	0,58

Примітка: в. – охолодження у воді, від. – відпускання.

Вони можуть бути легко реалізовані без будь-яких капітальних витрат на дійсному термічному обладнанні і дати значний економічний ефект. Це робить необхідним для доєвтектійних сталей різного хімічного складу проведення системних досліджень щодо визначення оптимальних режимів різних способів термообробки з нагріванням у МКІТ та широке впровадження їх у виробництво.

**Таблиця 5** – Механічні властивості досліджених сталей після ізотермічного гартування

Сталь	Режим термообробки	$\sigma_{0,2}$ , МПа	$\sigma_{в}$ , МПа	$\delta$ , %	$\psi$ , %	KCU, МДж/м <sup>2</sup>
14Г2	760 °С, 60 хв, в., до 450 °С, і.в. 60 хв, пов.	825	938	32	62	0,91
20ГЛ	760 °С, 60 хв, в., до 470 °С, і.в. 40 хв, пов.	691	775	18	56	1,12
	890 °С, 20 хв, 760 °С, 60 хв, в. до 470 °С, і.в. 40 хв, пов.	814	992	24	56	1,78
20ГФЛ	780 °С, 60 хв, в. до 500 °С, і.в. 40 пов	760	825	17	54	1,2
45Г	760 °С, 60 хв, в., до 400 °С, і.в. 40 хв, пов.	810	920	24	56	1,4

Примітка: і.в. – ізотермічна витримка, в. – вода, пов. – повітря.

### Висновки

1. Показано, що в досліджених сталях при здійсненні різних способів термообробки немає необхідності при нагріванні отримувати однофазну однорідну за хімічним складом аустенітну структуру. Створення в досліджених сталях багатофазної дисперсної мікронеоднорідної структури способами термообробки, що включають регламентовані нагрівання і витримку в МКІТ, дозволяє отримати після нормалізації, гарту і високого або низького відпускання, а також ізотермічного гарту хороше поєднання міцнісних і пластичних властивостей, рівень яких перевищує одержуваний після звичайного.

2. Великий вплив на властивості після гарту з МКІТ і низького відпускання, а також ізотермічного гарту робить залишковий аустеніт, що перетворюється при деформації на мартенсит. Структурою, зокрема кількістю та стабільністю залишкового аустеніту, необхідно керувати, оптимізуючи їх за рахунок температурно-часових режимів термообробки.

3. При необхідності підвищити властивості міцності і зберегти достатню пластичність і ударну в'язкість у ряді випадків доцільно при проведенні відповідної термообробки перед витримкою в МКІТ здійснювати аустенітизацію з подальшим охолодженням на повітрі до 500–550 °С. У разі аустенітизації після витримки МКІТ витримка повинна бути короткочасною, що зберігає отриману в МКІТ хімічну мікронеоднорідність, а охолодження після нагрівання в аустенітну об-

ласть слід проводити відповідно даним способом термообробки.

4. Способи термообробки з нагріванням у МКІТ легко реалізуються в умовах виробництва та дозволяють забезпечити енергозбереження. Режими їх проведення слід вибирати з урахуванням отримання необхідних властивостей, вихідної структури, її дефектності та перерізу виробів.

### Список літератури

1. Малинов Л. С. Разработка экономнолегированных высокопрочных сталей и способов упрочнения с использованием принципа регулирования мартенситных превращений. Дис. ... доктора техн. наук : 05.16.01 / Малинов Леонід Соломонович. – Екатеринбург, 1992. – 381 с.

2. Малинов Л. С. Экономнолегированные сплавы с мартенситными превращениями и упрочняющие технологии / Малинов Л. С., Малинов В. Л. – Харьков : ННЦХФТИ, 2007. – 352 с.

3. Малинов Л. С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Малинов Л. С., Малинов В. Л. – Мариуполь : Изд-во «Рената», 2009. – 568 с.

4. Голованенко С. Л. Двухфазные низколегированные стали / Голованенко С.Л., Фонштейн Н.М. – М. : Металлургия, 1986. – 480 с.

5. Єгорова С. В. Возможности и перспективы использования межкритической нормализации для упрочнения низколегированных сталей и сварных конструкций / Єгорова С. В., Стеренбоген Ю. А., Юрчишин А. В. // Автоматическая сварка. – 1983. – № 12. – С. 7–13.

6. Петрунєнков А. А. Структура низколегированных сталей с ПНП-эффектом после термической обработки и деформации / Петрунєнков А. А., Яровой В. В., Букреев Б. А. // Изв. вузов. Черн. металлургия. – 1991. – С. 73–74.

7. Малинов Л. С. Повышение уровня свойств закаленных низкоотпущенных сталей за счет их предварительного нагрева и выдержки в межкритическом или подкритическом интервалах температур / Малинов Л. С. // Металл и литье Украины. – 2003. – № 6. – С. 41–44.

8. Малинов Л. С. Повышение свойств сталей и высокопрочного чугуна получением в них многофазных структур, включающих бейнит и метастабильный аустенит / Малинов Л. С. // Металл и литье Украины. – 2004. – № 7. – С. 24–28.

9. Малинов Л. С. Повышение свойств низколегированных сталей путем термообработки после нагрева в межкритическом интервале температур / Малинов Л. С. // Металлургічна і горнорудна промисловість. – 2011. – № 1. – С. 63–66.

10. Пат. UA 79717 Україна, С21Д 1/18. Спосіб термообробки / Л. С. Малинов ; заявл. 24.07.2006 ; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.

11. Пат. UA 95409 Україна, С21Д 1/06, С21Д 1/18С21Д 1/78, Спосіб термообробки /Л. С. Малинов, Малинова Д. В. ; заявл. 24.07.2006 ; опубл. 15.03.2007, Бюл. № 3.

12. Декл. пат. на корисну модель UA 6414 Україна, С21Д1/00. Спосіб термообробки /Л.С. Малинов ; заявл. 28.07.2004; опубл. 16.05.2005, Бюл. №5.

13. Смирнов М. А. Основы термической обработки стали / Смирнов М. А., Счастливец В. М., Журавлев Л. Г. – М. : ООО «Наука и технология», 2002. – 519 с.

14. Дьяченко С. С. Образование аустенита в железоуглеродистых сплавах / Дьяченко С. С. – М. : Металлургия, 1982. –128 с.

15. Бернштейн М. Л. Механические свойства сталей 40ГС и 40Г2С с мартенситно-ферритной структурой после термической и химико-термической обработки / Бернштейн М. Л., Бернштейн Л. М., Гладышев С. А. // Изв. вузов. Чер. Металлургия. – 1988. – № 9. – С. 108–111.

16. Ткаченко И. Ф. Повышение комплекса механических свойств проката высокопрочных сталей за счет новых режимов термической обработки / Ткаченко И. Ф. // Вісник Приазовського державного технічного університету. – 2000. – № 10. – С. 100–105.

17. Пат. UA 87940 Україна, С21Д 1/06, С21Д 1/18, С21Д 1/78, Спосіб термообробки сталі /Л. С. Малинов; заявл. 02.06.2008 ; опубл. 25.08.2009, Бюл. № 16.

Одержано 08.02.2024

## STRUCTURE AND MECHANICAL PROPERTIES OF A SERIES OF STRUCTURAL STEEL AFTER HEAT TREATMENT WITH ENDURANCE IN THE INTERCRITICAL TEMPERATURE INTERVAL

Burova D.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Material Science and Perspective Technologies, Priazov State Technical University, Dnipro, Ukraine, e-mail: burovadasha1990@gmail.com, ORCID: 0009-0000-3460-8602

**Purpose.** To show the effectiveness of various methods of heat treatment of the studied steels with heating in ITI, as a result of which their mechanical properties are increased, which is due to the acquisition of a multiphase structure, one of the components of which in some cases is metastable austenite.

**Research methods.** Steels 14Г2, 20ГЛ, 20ГФЛ 45Г were investigated. Various types of heat treatment were carried out with heating in the intercritical temperature interval. In the studied steels, a multiphase structure dispersed in chemical composition was obtained. Durometric, metallographic and X-ray research methods were used. Mechanical properties under tension and impact toughness were determined. These properties were compared with those obtained from the studied steels after typical heat treatment.

**Obtained results.** It is shown that in the investigated steels, when performing various methods of heat treatment, there is no need to obtain a single-phase austenite structure, which is homogeneous in terms of its chemical composition, during heating. The creation of a multiphase dispersed micro-inhomogeneous structure in the studied steels by heat treatment methods, which include regulated heating and holding in ITI, allows to obtain after normalization, hardening and high or low tempering, as well as isothermal tempering, a good combination of strength and plastic properties, the level of which exceeds that obtained after the usual process.

**Scientific novelty.** The paper considers an alternative point of view, according to which to improve the mechanical and service properties of steels, it is necessary to obtain multiphase dispersed micro-inhomogeneous structures in them, consisting of martensite, bainite, ferrite, carbides, carbonitrides and metastable residual austenite, as well as their various combinations. In order to obtain such structures, it is advisable to use heating and holding in ITI during the heat treatment of pre-eutectoid steels, in which austenite is formed, along with ferrite and carbides. At the same time, austenite has chemical micro-heterogeneity, because the carbon concentration at its boundary with carbide is significantly higher than at the boundary with ferrite. This makes it possible to obtain a multiphase dispersed micro-inhomogeneous structure after heat treatment.

**Practical value.** Increasing the mechanical properties of steels makes it possible to increase the operational stability of machine parts, which is an important task of materials science. One of the directions of its solution is to obtain a multiphase structure in steels, one of the components of which is metastable austenite, in which the dynamic deformation martensitic transformation (DSMT) and the effect of self-hardening under load (SHL) occur under load. Methods of heat treatment with heating at ITI are easily implemented in production conditions and allow for energy savings. Modes of their implementation should be chosen taking into account obtaining the necessary properties, the initial structure, its defects and the cross-section of the products.

**Key words:** ITI, normalization, quenching, tempering, multiphase structure, mechanical properties.

### References

1. Malinov L. S. (1992). Razrabotka ekonomnolegirovannyh vysokoprochnyh stalej i sposobov uprochneniya s ispolzovaniem principa regulirovaniya martensitnyh prevrashenij [Development of economically alloyed high-strength steels and methods of hardening using the principle of regulating martensitic transformations]. Yekaterinburg, 381.
2. Malinov L. S., Malinov V. L. (2007). Economy-alloyed alloys with martensitic transformations and hardening technologies. – Kharkiv : NNCHFTI, 352.
3. Malinov L. S., Malinov V.L. (2009) Resource-saving economy-alloy alloys and hardening technologies that provide the effect of self-hardening. “Renata” publishing house, 568.
4. Golovanenko S. L., Fonstein N. M. (1986). Two-phase low-alloy steels. Metallurgy, 480.
5. Yehorova S. V., Sterenbogen Yu. A., Yurchyshyn A. V. (1983). Possibilities and prospects of using intercritical normalization for hardening of low-alloy steels and welded structures. Automatic welding, 12, 7–13.
6. Petrunenkov A. A., Yarovoi V. V., Bukreev B. A. (1991). The structure of low-alloy steels with the PNP effect after heat treatment and deformation Izv. universities Chern. Metallurgy, 73–74.
7. Malinov L. S. (2003). Increasing the level of properties of hardened low-tempered steels due to their preliminary heating and holding in intercritical or subcritical temperature intervals, Metal and Casting of Ukraine, 6, 41–44.
8. Malinov L. S. (2004). Improving the properties of steels and high-strength cast iron by obtaining multiphase structures in them, including bainite and metastable austenite, Metal and Casting of Ukraine, 7, 24–28.
9. Malinov L. S., Malinova D. V. (2011). Improving the properties of low-alloy steels by heat treatment after heating in the intercritical temperature interval //Metallurgical and mining industry, 1, 63–66.
10. Malinov L. S. (2006). Heat treatment method, Patent of Ukraine for useful model UA 79717, C21D 1/18. Application 24.07.2006. Publ. 15.03.2007, Bull, 3.
11. Malinov L. S., Malinova D. V. (2006) Heat treatment method, Patent of Ukraine for useful model UA 95409, C21D 1/06, C21D 1/18C21D 1/78, Application 24.07.2006. Publ. 15.03.2007, Bull, 3.
12. Malinov L. S. (2005). Heat treatment method, Patent of Ukraine for useful model UA 6414, C21D1/00. Application 28.07.2004. Publ. 16.05.2005, Bull, 5.
13. Smirnov M. A., Schastlyvtsev V. M., Zhuravlev L. G. (2002) Basics of thermal treatment of steel, LLC “Nauka and Technology”, 519.
14. Dyachenko S. S. (1982). Formation of austenite in iron-carbon alloys, Metallurgy, 128.
15. Bernstein M. L., Bernstein L. M., Gladyshev S. A. (1988). Mechanical properties of 40GS and 40G2S steels with a martensitic-ferritic structure after thermal and chemical-thermal treatment Universities Black Metallurgy, 9, 108–111.
16. Tkachenko I. F. (2000). Increasing the complex of mechanical properties of rolled high-strength steels due to new regimes of heat treatment, Bulletin of the Pryazovsky State Technical University, 10, 100–105.
17. Malinov L.S. (2009) Heat treatment method, Patent of Ukraine for useful model UA 87940, C21D 1/06, C21D 1/18, C21D 1/78, Application 02.06.2008. Publ. 25.08.2009, Bull, 16.

## КОНСТРУКЦІЙНІ І ФУНКЦІОНАЛЬНІ МАТЕРІАЛИ STRUCTURAL AND FUNCTIONAL MATERIALS

УДК 629.76:669.018

Давидюк А. В.

аспірантка кафедри ракетно-космічних та інноваційних технологій Дніпровського національного університету імені Олеся Гончара, м. Дніпро, Україна,  
e-mail: anzhela8848@gmail.com, ORCID: 0009-0004-3688-3455

### ЗМІНА СТРУКТУРИ ТА ВЛАСТИВОСТЕЙ АЛЮМІНІЄВИХ СПЛАВІВ ПРИ МОДИФІКУВАННІ ПОРОШКОВИМИ КОМПОЗИЦІЯМИ

**Мета роботи.** Встановити вплив модифікування порошковими композиціями на структуру та механічні властивості ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів.

**Методи дослідження.** Металографічний аналіз, стеріометрична металографія, випробування міцносних та пластичних властивостей, ливарних сплавів АЛ4, АЛ4С системи Al-Si та деформованих сплавів 1545 системи Al-Mg-Sc, 2219 системи Al-Cu-Mn у вихідному та модифікованому стані.

**Отримані результати.** Проведені плавки сплавів АЛ4, АЛ4С, 1545, 2219 у вихідному стані та з обробкою розплавів комплексним нанодисперсним модифікатором силіциду магнію  $Mg_2Si$  і карбиду кремнію  $SiC$  з розміром часток від 50...100 нм. Визначено оптимальний вміст  $Mg_2Si+SiC$  (0,10 %) для підвищення  $\sigma_{0,2}$  алюмінієвих сплавів. Досягнуто подріблення зеренної структури литих сплавів у 1,6 рази. Встановлено залежності розміру частинок та кількості модифікатора на механічні властивості сплавів. У промислових експериментах встановлено найбільш ефективний розмір часток  $Mg_2Si+SiC$  для підвищення  $\sigma_{0,2}$  сплаву АЛ4, АЛ4С з 115 до 135 МПа у литому стані. Підвищення міцносних властивостей модифікованих сплавів складає 18 % в порівнянні з вихідним станом.

**Наукова новизна.** Отримано подальший розвиток, уявлення про вплив модифікування розплавів на параметри структури та властивостей алюмінієвих сплавів. Запропоновано використання нанодисперсного комплексного модифікатора  $Mg_2Si+SiC$  з розміром часток 50...100 нм. Підтверджено, що використання комплексних нанодисперсних модифікаторів дозволяє активно впливати на структуру та механічні властивості алюмінієвих сплавів.

**Практична цінність.** Експериментально доведено, що раціональна кількість введеного комплексного модифікатора складає 0,10 % від маси розплави. Досягнуто значне подрібнення зеренної структури та підвищення міцносних властивостей ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів в результаті модифікування.

**Ключові слова:** алюмінієві сплави, модифікування, структура, механічні властивості, порошкові нанодисперсні композиції.

#### Вступ

Створення порошкових матеріалів безпосередньо пов'язано з розробкою і застосуванням нанотехнологій. На установках плазмохімічного синтезу можна отримувати широкий спектр нанодисперсних сполук, а саме: карбіди, нітриди, карбонітриди, силіциди різних елементів (Si, Al, Ti, V, Mo, W та ін.), а також нанодисперсні порошки чистих металів [1–3].

У вітчизняній ракетно-космічній техніці широко застосовують нержавіючі сталі, ливарні і деформовані алюмінієві та магнієві сплави, ливарні нікелеві сплави. Для деталей ракетно-космічної техніки (РКТ) можуть бути корисні перспективні напрямки з обробки наномодифікаторами сплавів різних систем легування [4–6].

#### Аналіз досліджень та публікацій

Коротко оцінити та узагальнити роботи попередніх та останніх публікацій, в яких розпочато

вирішення даної проблеми. Відобразити основні етапи розвитку наукової думки з розв'язуваної проблеми, виділити невирішені раніше частини загальної проблеми та визначити місце статті у вирішенні проблеми, обґрунтувати вибір напряму досліджень. Даний розділ уточнює, конкретизує, доповнює та розширює матеріал введення, служить його обґрунтуванням та поясненням.

Шляхом критичного аналізу та узагальненого порівняння з відомими рішеннями проблеми коротко обґрунтувати актуальність (ступінь важливості в даний момент і в даній ситуації) та доцільність роботи.

#### Мета роботи

Встановити вплив модифікування порошковими композиціями на зеренну структуру та механічні властивості промислових ливарних та деформованих алюмінієвих сплавів.

### Матеріал і методика досліджень

Матеріалом дослідження є алюмінієві сплави системою Al-Si, Al-Mg-Sc, Al-Cu-Mn, АЛ4, АЛ4С, 1545, 2219. Запропоновано модифікування алюмінієвих сплавів дисперсним порошком  $Mg_2Si+SiC$  розміром часток до 100 нм. Дисперсний  $Mg_2Si+SiC$  отримано методом плазмохімічного синтезу. Проведені дослідно-промислові плавки алюмінієвих сплавів. Досліджено структуру та механічні властивості сплавів у литому та деформованому стані.

З урахуванням принципу про кристалографічну і розмірну відповідність ізоморфності кристалічних решіток алюмінію і тугоплавких сполук [7, 8] встановили, що модифікаторами алюмінієвих сплавів можуть бути карбіди кремнію, ніобію і танталу, а також карбіди і нітриди титану, цирконію, гафнію і ванадію. Як ефективний модифікатор ливарних алюмінієвих сплавів запропоновано нанодисперсний порошок карбіду кремнію  $SiC$  розміром часток до 100 нм [5], який отримано методом високотемпературного плазмохімічного синтезу [4].

Карбід кремнію існує у двох алотропічних модифікаціях:  $\beta-SiC$  і  $\alpha-SiC$ . Кристали  $\beta-SiC$  мають кубічну будову з алмазоподібною решіткою сфалериту з параметром  $a = 0,4360$  нм [9]. Кристали  $\alpha-SiC$  у широких межах проявляють політипізм. В основі їх будови існує гексагональна і ромбоєдрична решітки. Хімічний склад тонкодисперсного  $\beta-SiC$ , мас. %: 68,5 Si; 30,5 C; 1,0 N. Перехід  $\beta-SiC \rightarrow \alpha-SiC$  відбувається при 2100 °C і супроводжується зміною об'єму на 0,06 %.

В якості модифікатора обрано порошкову суміш нанодисперсних частинок  $Mg_2Si$  і  $SiC$ , згідно відповідності основним критеріям модифікування [2,6]: подібності кристалічних ґраток, нерозчинність тугоплавких сполук в алюмінієвому розплаві, значна різниця температур плавлення. Нанодисперсні частинки карбіду кремнію та силіциду магнію розмірами до 100 нм є ефективними геттерами, матеріалами з розвинутою вільною поверхнею [9, 10].

Високі фізико-механічні характеристики  $\beta-SiC$  пояснюються міжатомним зв'язком. Атоми в карбіді кремнію пов'язані між собою ковалентним зв'язком, який є найбільш сильним у природі і обумовлює в кристалах високу температуру плавлення, твердість і хімічну тривкість. Кристал  $Mg_2Si+SiC$  складається з атомів двох видів, що мають різну спорідненість до електрону, причому атом кожного сорту оточений чотирма атомами іншого сорту. Тому поряд з ковалентним зв'язком тут є деяка частка гетерополярного зв'язку [8].

Дія нерозчинних додатків, ізоморфних до алюмінію, аналогічність впливу розчинних елементів дотримується лише тоді, коли кількість нерозчинного додатку перевищує кількість кристалів, що утворилися довільно за тих самих умов [11, 13]. Таким чином, зі збільшенням кількості нерозчинного додатку, зокрема частинок карбіду кремнію, розмір зерна спочатку зменшується, а потім буде постійним.

Механізм впливу порошкових частинок карбіду кремнію на формування структури доєвтектичних алюмінієвих сплавів під час кристалізації полягає в тому, що основна їх маса виштовхується фронтом кристалізації в рідку фазу та бере участь у подрібненні структурних складових сплаву [12, 14, 15]. Частинки карбіду кремнію сприяють також дисперсному зміцненню сплаву, так як дисперсні фази є додатковими бар'єрами для переміщення дислокацій, а отже, підвищують характеристики міцності ливарних алюмінієвих сплавів.

### Результати досліджень та їх обговорення

Проведені дослідно-промислові плавки ливарних АЛ4, АЛ4С та деформованих 1545, 2219 сплавів. Плавку проводили на стаціонарній електропечі опору для плавки алюмінію САТ-0,16, яка призначена для плавлення та підтримання температури розплавленого алюмінію та його сплавів перед заливкою в форми. Після розплавлення шихтових матеріалів вводили навіску комплексного модифікатора у вигляді порошкової суміші наночастинок  $Mg_2Si$  і  $SiC$ . Після витримки розплаву з модифікатором розливали в кокиль та металеві форми для дослідних зразків.

Мікроструктуру дослідних сплавів вивчали на оптичних мікроскопах МІМ-8М та Neophot-2, у вихідному та модифікованому станах. Мікроструктура сплаву АЛ4 наведено на рис. 1.

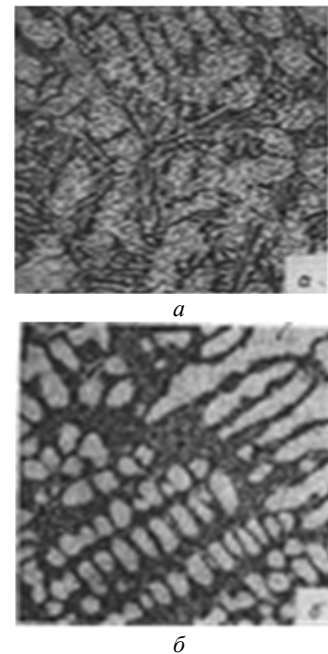


Рисунок 1. Мікроструктура сплаву АЛ4,  $\times 200$ :  
а – у вихідному стані; б – у модифікованому стані

В модифікованих зразках сплаву АЛ4 досягнуто значне подрібнення зеренної структури до 150 мкм, у немодифікованому сплаві середній розмір зерна становить 240 мкм. Подрібнення структури модифікованих зразків сприяло підвищенню міцносних властивостей ливарного сплаву.

На механічні властивості алюмінієвих сплавів суттєво впливають розміри частинок зміцнювальної фази. Промислові експерименти з застосуванням дисперсних частинок порошкової суміші силіциду магнію та карбиду кремнію  $Mg_2Si$  і  $SiC$  у широкому діапазоні розмірів від 50 до 100 нм виявили, що зі зменшенням розмірів частинок порошків до 100 нм межа міцності сплаву АЛ4, АЛ4С зростає з 115 до 135 МПа.

Для визначення оптимальної кількості модифікатора карбиду кремнію виконали промислові плавки та випробування зразків, що пройшли термічну обробку за режимом Т6 (гартування і штучне старіння).

Для комп'ютерної обробки даних складу сплавів і вмісту модифікаторів використали програму Microsoft Excel. Аналіз результатів засвідчив, що модифікування частинками карбиду кремнію в кількості 0,1 мас. % при достатньому рівні пластичності ( $\delta$ ) сплаву АЛ4, АЛ4С (рис. 2) за одночасного збільшення межі міцності ( $\sigma_B$ ) і межі плинності ( $\sigma_{0,2}$ ).

Подальше збільшення кількості модифікатора  $Mg_2Si+SiC$  від 0,10 до 0,25% в сплаві АЛ4, АЛ4С суттєво не впливає на механічні властивості, а за вмісту більше 0,25%  $Mg_2Si+SiC$  незначно знижується параметр  $\sigma_B$  (рис. 3).

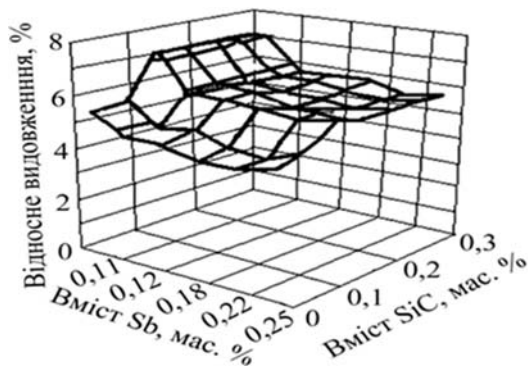


Рисунок 2. Зміна відносного видовження модифікованого сплаву АЛ4С залежно від вмісту  $SiC$

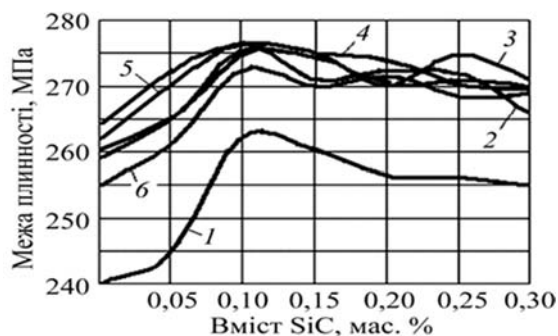


Рисунок 3. Залежність межі плинності модифікованого сплаву АЛ4С від вмісту  $SiC$  за різного вмісту  $Sb$ :  
1 – 0%; 2 – 0,11; 3 – 0,12; 4 – 0,18; 5 – 0,22; 6 – 0,25 %

Незначне зниження межі плинності сплаву АЛ4, АЛ4С спостерігали під час введення більше 0,1 мас. % модифікатора  $SiC$ .

Таким чином, механічні характеристики ливарного алюмінієвого сплаву АЛ4, АЛ4С значно підвищуються з введенням у розплав 0,1 мас. % нанодисперсних частинок карбиду кремнію. Якість ливарних алюмінієвих сплавів під час модифікування залежить від багатьох чинників: природи дисперсної фази, температури розплаву, режимів його перемішування під час введення частинок. Під час вивчення впливу температури на ступінь засвоєння тугоплавких частинок  $Mg_2Si+SiC$  встановлено, що за певної для даного розплаву температури спостерігається максимум засвоєння частинок. Характерною особливістю результатів досліджень, виконаних з різними тугоплавкими композиціями в алюмінієвих сплавах, є досягнення максимуму засвоєння частинок за нижнього значення температури розплавів.

### Висновки

1. Проведено промислові плавки сплавів ливарних АЛ4, АЛ4С та деформованих 1545, 2219 у вихідному стані та з обробкою розплавів порошковими композиціями.
2. Запропоновано склад комплексного порошкового модифікатора на основі  $Mg_2Si$  та  $SiC$  з розміром часток від 50...100 нм, отриманих плазмохімічним синтезом.
3. Досягнуто значне подрібнення зеренної структури модифікованих сплавів у 1,6 рази. Підвищення механічних властивостей при збереженні рівня пластичності.
4. Встановлено залежності розміру часток та кількості модифікатора на механічні властивості алюмінієвих сплавів.
5. Досягнуто підвищення міцносних властивостей модифікованих сплавів на 18 %, при збереженні рівня пластичності.

### Список літератури

1. Большаков В. І. Наноматеріали і нанотехнології / Большаков В. І., Куцова В. З., Котова Т. В. – Дніпропетровськ : ПДАБА, 2016. – 220 с.
2. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монографія / Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В. та ін. – Львів : Простір, 2017. – 304 с.
3. Мільман Ю. В. Вплив скандію на структуру механічні властивості і опір корозії сплавів алюмінію. Прогресивні матеріали та технології. Том 1. / Мільман Ю. В. – К. : Академперіодика, 2003. – С. 335–381.
4. Мільман Ю. В. Скандієвий ефект підвищення міцності алюмінієвих сплавів / Мільман Ю. В., Лоцко Д. В., Сірко А. І. // Збірник наукових праць 3-го міжнародного семінару. Сучасні проблеми міцності. – К. : Наукова думка, 1999. – С. 277–283.
5. Кузін О. А. Металознавство та термічна обробка металів : підручник / Кузін О. А., Яцюк Р. А. – Львів : Афіша, 2002. – 304 с.

6. Аллюміній та сплави на його основі / В. З. Куцова, Н. Е. Погребна, Т. С. Хохлова та ін. – Дніпропетровськ : Пороги, 2004. – 136 с.
7. Костін В. А. Модифіковані структури зварних з'єднань високоміцних низьколегованих сталей наночастинками тугоплавких металів / Костін В. А., Григоренко Г. М., Жуков В. В. // Будівництво, матеріалознавство, машинобудування. – 2016. – Вип. 89. – С. 93–98.
8. Milman Yu. V. Influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Advanced materials and technologies* / Milman Yu. V. – Kyiv : Academic Periodicals, 2003. – Vol. 1. – P. 125–134.
9. Young- Domd K. The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys / Young- Domd K., Zin-Hyoung L. // *Mater. Sci. and Eng.* – 2003. – № 12. – P. 372–376.
10. Special features of the phase composition and structure of aluminium alloys modified by refractory nanocompositions / Kalinina N., D. Glushkova, A. Voronkov et al. // *Functional materials*, 27. – 2020. – № 3. – P. 508–512.
11. Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys / Lu Y., Wang J., Li X. et al. // *Materials Science and Engineering.* – 2018. – No 723. – P. 204–211.
12. Структура, властивості та використання конструкційних наноматеріалів : монографія / Калініна Н. Є., Никифорчин Г. М., Калінін О. В. – Львів : Проспект-М, 2017. – 304 с.
13. Калінін О. В. Особливості впливу модифікування на структуру та властивості ливарних алюмінієвих сплавів / Калінін О. В., Щурко З. В. // *Системне проектування та аналіз характеристик аерокосмічної техніки.* – Дніпро : Видавництво «Ліра», 2017. – С. 16–21.
14. Перспективи поліпшення властивостей вторинних ливарних сплавів системи Al-Si з використанням процесу модифікування / Доценко Ю. В., Селівьоров В. Ю., Насонов Д. М., Насонов М. М. // *Матеріали Міжнародної науково-технічної конференції «Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні».* ІТММ, 2021. – С. 28–32. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
15. Куцова В. З. Вплив мікролегування на структуру сплаву АК7і / Куцова В. З. // *Будівництво, матеріалознавство машинобудування : сб. наук. пр. – Вип. 36. – Дніпропетровськ : ПГАСА, 2006. – С. 201–209.*

Одержано 16.02.2024

## CHANGES IN THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF ALUMINIUM ALLOYS WHEN MODIFIED WITH POWDER COMPOSITIONS

Davidyuk A.

Postgraduate student of the Department of Rocket, Space and Innovative Technologies of Oles Honchar Dnipro National University, Dnipro, Ukraine, e-mail: [anzhela8848@gmail.com](mailto:anzhela8848@gmail.com), ORCID : 0009-0004-3688-3455

**Purpose.** To determine the effect of modification with powder compositions on the structure and mechanical properties of cast and deformed aluminium alloys.

**Research methods.** Metallographic analysis, stereometric metallography, testing of strength and plastic properties of cast alloys AL4, AL4C of the Al-Si system and deformed alloys 1545 of the Al-Mg-Sc system, 2219 of the Al-Cu-Mn system in their original and modified state.

**Results.** Meltings of AL4, AL4C, 1545, 2219 alloys were carried out in the initial state and with melt treatment with a complex nano-disperse modifier of magnesium silicide  $Mg_2Si$  and silicon carbide  $SiC$  with a particle size of 50...100 nm. The optimal content of  $Mg_2Si+SiC$  (0.10%) for increasing  $\sigma_{0.2}$  of aluminium alloys was determined. A 1.6-fold reduction in the grain structure of cast alloys was achieved. The dependence of the particle size and the amount of the modifier on the mechanical properties of the alloys was established. In industrial experiments, the most effective particle size of  $Mg_2Si+SiC$  was established for increasing  $\sigma_{0.2}$  of AL4, AL4C alloy from 115 to 260 MPa in the as-cast state. The increase in the strength properties of the modified alloys is 44 % compared to the original state.

**Scientific novelty.** Further development, insight into the influence of melt modification on the parameters of the structure and properties of aluminium alloys was obtained. The use of nanodispersed complex modifier  $Mg_2Si+SiC$  with a particle size of 50...100 nm is proposed. It has been confirmed that the use of complex nanodisperse modifiers allows you to actively influence the structure and mechanical properties of aluminium alloys.

**Practical value.** It has been experimentally proven that the rational amount of the introduced complex modifier is 0.10% of the mass of the melt. A significant grinding of the grain structure and an increase in the strength properties of cast and deformed aluminium alloys were achieved as a result of the modification.

**Key words:** aluminium alloys, modification, structure, mechanical properties, powder nanodisperse compositions.



### References

1. Bolshakov V. I., Kutsova V. Z., Kotova T. V. (2016). *Nanomaterials and nanotechnologies*, 2016, 220.
2. Kalinin N. E., Nikyforchyn H. M., Kalinin O. V. et al. (2017). *Structure, properties and use of structural nanomaterials* : Monograph, Lviv: Prostir, 304.
3. Milman Yu.V. (2003). The influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Progressive materials and technologies*, 1, Kyiv : Aka-demperiodika, 2003, 335–381.
4. Milman Y. V., Lotsko D. V., Sirko A. I. (1999). The scandium effect of increasing the strength of aluminum alloys (text)/ *Collection of scientific papers of the 3rd international seminar. Modern problems of strength*. Kyiv: Naukova dumka, 277–283.
5. Kuzin O. A., Yatsyuk R. A. (2002). *Metallurgy and heat treatment of metals* : Textbook. Lviv: Afisha, 304.
6. V. Z. Kutsova, N. E. Pogrebna, T. S. Khokhlova et al. (2004). *Aluminium and alloys based on it*. Dnipropetrovsk: Porogy, 136.
7. Kostin V. A., Grigorenko H. M., Zhukov V. V. (2016). Modified structures of welded joints of high-strength low-alloy steels with nanoparticles of refractory metals. *Construction, materials science, new construction machines*, 89, 93–98.
8. Milman, Yu.V. (2003). Influence of scandium on the structure, mechanical properties and corrosion resistance of aluminum alloys. *Advanced materials and technologies*. Kyiv: Academic Periodicals, 125–134.
9. Young- Domd K., Zin-Hyoung L. (2003). The effect of grain refining and oxide inclusion on the fluidity of AL-4,5Cu-0,6Mn and A356 alloys. *Mater. Sci. and Eng.*, 12372–376.
10. Kalinina, N., D. Glushkova, A. Voronkov, A. Sanin, A. Kalinin, T. Nosova, O. Bondarenko (2020). Special features of the phase composition and structure of aluminium alloys modified by refractory nanocompositions *Functional materials*, 27, 3, 2020, 508–512.
11. Lu Y., Wang J., Li X., Li W., Li, R., Zhou D. (2018). Effects of pre-deformation on the microstructures and corrosion behavior of 2219 aluminum alloys. *Materials Science and Engineering*, 723, 204–211.
12. N. E. Kalinina, H. M. Nikyforchyn, O. V. Kalinin, V. I. Marukha, V. I. Kyrylov (2017). *Structure, properties and use of structural nanomaterials*. Lviv : Prostir-M, 304.
13. Kalinin O. V., Shchurko Z. V. (2017). Peculiarities of the influence of modification on the structure and properties of cast aluminum alloys. *System design and analysis of aerospace engineering characteristics*. Dnipro : “Lira” Publishing House, 16–21.
14. Yu. V. Dotsenko, V. Yu. Selivyorstov, D. M. Nasonov, and M. M. Nasonov (2021). Prospects for improving the properties of secondary foundry alloys of the Al-Si system using the modification process. *Materials of the International Scientific and Technical Conference “Information Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering”*. ITMM, 28–32. DOI: <https://doi.org/10.34185/1991-7848.itmm.2021.01.022>
15. Kutsova V. Z. (2006). The influence of microalloying on the structure of the AK7i alloy. *Construction, materials science of new construction machines* : Sat. of science, 36. Dnipropetrovsk : PGASA, 201–209.

УДК 669.275.017

- Вініченко В. С. 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
- Плескач В. М. канд. техн. наук, доцент кафедри «Композиційні матеріали, хімія та технології» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-6182-4332
- Єршов А. В. 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
- Волков Г. П. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри «Деталі машин і ПТМ» Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: gpvolkov@ukr.net*, ORCID: 0009-0006-9810-5805
- Іванченко Є. Ю. аспірант кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: metodist26.08@meta.ua*, ORCID: 0009-0008-2290-4023

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ СТРУКТУРИ ВОЛОКНИСТИХ КОМПОЗИТІВ НА ЇХ МЕХАНІЧНІ ВЛАСТИВОСТІ

**Мета роботи.** Полягає у встановленні впливу неперервних волокон і достатньо пластичної матриці з жароміцного сплаву у структурі композиту, призначеного для роботи при підвищених температурах, та надання рекомендацій щодо оптимального виду структури для досягнення оптимальної міцності даного композиту при температурах 20...1300 °С.

**Методи дослідження.** Проведений теоретичний аналіз можливого руйнування виробів при використанні неперервних волокон, а також аналіз зразків композиту на основі жароміцної матриці, армованої дротом з вольфраморенієвого сплаву. Дослідження проводилося із застосуванням металографічного методу. Міцність композиту визначали проведенням випробувань на розтяг із застосуванням установки ІМАШ-20-75.

**Отримані результати.** Встановлені закономірності впливу структури на міцність волокнистих композитів, на основі яких можливо досконаліше проаналізувати процеси, які відбуваються як при руйнуванні композиту, так і при його формуванні і, при необхідності, скорегувати їх, таким чином, щоб забезпечити максимально можливу міцність матеріалу в цілому.

**Наукова новизна.** Встановлено закономірність впливу загальної структури композиту і шару матриці, що оточує волокна, на міцність композиту жароміцний сплав – вольфраморенієві волокна, яка дозволяє кількісно аналізувати вплив структурних і технологічних факторів процесу формування на міцність вказаного матеріалу.

**Практична цінність.** Робота може бути корисною конструкторам при виборі складу композиту, орієнтуючись на очікуваний механізм руйнування, а також технологам для продуктивнішого використання виробничого обладнання та зменшення витрат матеріалів на виробництво продукції.

**Ключові слова:** композит, матриця, жароміцний сплав, вольфраморенієвий сплав, неперервні волокна, формування композитного матеріалу, структура, міцність, випробування на розтяг.

### Вступ

Створення високотемпературних матеріалів багато в чому визначає можливості підвищення коефіцієнта корисної дії теплових двигунів. На сьогодні економічність цих двигунів в основному залежить від максимальної робочої температури конструкційних матеріалів. У зв'язку з цим створення матеріалів, здатних працювати при підвищенні робочих температурах, є одним з перспективних напрямків матеріалознавства [1, 2]. Свідченням вказаного можуть бути дослідження, що проводяться для створення матеріалів, здатних витримувати температури експлуатації порядку 1800 °С. Для вирішення даної проблеми досліджують можливість застосування сплавів на основі

рідкісних металів, зокрема, іридію і родію [3, 4]. На теперішній час, використання подібних сплавів може задовольнити технічні запити конструкторів теплових двигунів, проте ціна такого рішення може бути не завжди виправдана.

Підвищення робочих температур традиційних жароміцних сплавів, часто, вимагає збільшення вмісту в їх складі тугоплавких легувальних елементів, що призводить до погіршення інших важливих характеристик (жаростійкості, пластичності). На сьогодні вже очевидно, що можливості підвищення експлуатаційних характеристик жароміцних нікелевих сплавів шляхом комплексного легування та оптимізації технології термічного оброблення вичерпані у минулому столітті.

Уникнути зазначених недоліків, і у той же час, підвищити робочу температуру матеріалів такого призначення стає можливим при зміцненні їх у найнавантажених напрямках неперервними волокнами зі сплавів тугоплавких металів, зокрема, сплавів на основі вольфраму. Так, наприклад, у стінках деталей типу оболонки, навантажених внутрішнім тиском, у поздовжньому перерізі виникають напруження розтягу, які вдвічі перевищують напруження розтягу, що виникають у поперечному кільцевому перерізі оболонки [5, 6]. Такі деталі доцільно виготовляти з анізотропних матеріалів, до яких, зокрема, належать волокнисті композиційні матеріали. На сьогодні від них вимагається здатність витримувати термічні та радіаційні навантаження [7, 8]. При чому вказані вимоги, зокрема, до матеріалів ядерних та термоядерних реакторів безперервно підвищуються [9].

Це обумовлює актуальність даної роботи, яка присвячена дослідженню залежності між структурою і властивостями композиту з матрицею із жароміцного сплаву армованого волокнами з вольфраморенієвого сплаву.

#### Аналіз досліджень та публікацій. Теоретичний аналіз руйнування і забезпечення міцності волокнистих композитів

Волокнисті композиційні матеріали досить часто використовуються завдяки своїм високим механічним властивостям. Як правило, при цьому використовуються достатньо пластичні полімерні матриці, а як наповнювачі - міцні, але крихкі волокна (наприклад, скляні, вуглецеві, металеві). При навантаженні розтягу першою пластично деформується матриця, і навантаження поступово сприймається наповнювачем - волокнами. Волокна, розтягуючись, зменшуються у поперечнику і починають розтягувати матрицю у поперечному напрямку. Цим самим пластична матриця здійснює додатковий внесок в опір розтягу [10]. Проте вже при достатньо низькому рівні розтягувальних напружень зв'язок між матрицею і наповнювачем починає руйнуватися, але монолітність композиту внаслідок цього в цілому ще не порушується. На цьому етапі у забезпеченні достатньої міцності композиту ще беруть участь волокна.

Роль матриці в армованому КМ зводиться до ролі «диспетчера», який розподіляє навантаження між волокнами. Поступово навантаження переходить на волокна. Чим більше вміст наповнювача у КМ, тим вище його міцність, але тим слабше виявляються його пластичні властивості.

При руйнуванні волокон або ушкодженні межі розділу між ним і матрицею відбувається перерозподіл напружень таким чином, що ушкодження локалізуються у відносно малому об'ємі пластичної матриці. Завдяки цьому поки що ефективна міцність КМ практично не знижується.

Зі збільшенням навантажень у композиті відбувається накопичення розсіяних мікропошкоджень. У певний момент вони можуть призвести до руйнування

деяких волокон, які мають більшу кількість дефектів. У матриці на окремих ділянках поступово накопичується критична щільність мікротріщин, яка може призвести до утворення або певної кількості множинних мікротріщин одночасно, або стійкої макротріщини при збереженні цілісності композиту. Фінальне руйнування відбувається в момент, коли розміри однієї або декількох макротріщин досягнуть певної критичної величини [11–16].

Композит, що складається з пластичної матриці та міцних, але крихких односпрямованих неперервних волокон, має чітко виражену анізотропію властивостей, а його міцність визначається не лише міцністю самих волокон, а також їх діаметром і об'ємним вмістом волокон у композиті. Збільшення діаметра волокон у складі КМ призводить до зниження їх міцності, але різною мірою, залежно від природи волокон. Вважається, що при збільшенні діаметра волокон їх міцність різко падає, а при діаметрі  $d$  понад 15 мкм асимптотично наближується до певної мінімальної величини (рис. 1).

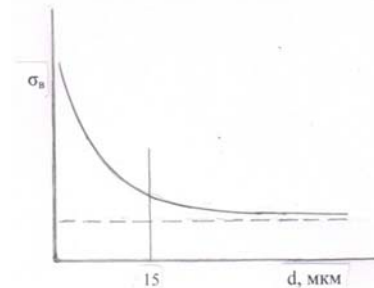


Рисунок 1. Залежність міцності волокон від діаметра

Міцність волокон у композиті залежить від співвідношення їх довжини  $l$  та діаметра  $d$ . Чим більше співвідношення  $l/d$ , мкм, тим міцніший матеріал. При аналізі його впливу на міцність композиту використовується поняття *критичної довжини* волокон  $l_{кр}$  [4, 7, 9, 10]:

$$l_{кр} = \sigma_v d / 2\tau_{зч}, \quad (1)$$

де  $\sigma_v$  – границя міцності волокна, МПа;  $\tau_{зч}$  – границя міцності зсуву на межі матриця-волокно, МПа.

Поняття критичної довжини волокон стосується й неперервних волокон, оскільки їх кінцеві частини довжиною  $l_{кр}/2$  працюють неефективно. Особливо цей ефект проявляється тоді, коли волокна починають руйнуватися, і кількість неефективних ділянок збільшується.

Отже, ефективність армування композиційних матеріалів неперервними волокнами проявляється при мінімальному діаметрі (10...15 мкм і менше), якнайбільшій їх довжині, відсутності поверхневих дефектів, а також при обґрунтованій об'ємній концентрації волокон.

### Мета роботи

Метою даної роботи було описати теоретично і експериментально закономірності впливу волокон і матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами, на міцність композиційного матеріалу системи жароміцний сплав – вольфраморенієві волокна.

### Матеріал і методика досліджень

В даній роботі об'єктом дослідження слугували зразки композиту. Для формування композиту використовували сплави промислового виробництва. Як матрицю використовували жароміцний сплав ХН65ВБ у вигляді фольги товщиною 0,4 мм. Його хімічний склад наведено в таблиці 1.

Дроги з вольфрамових сплавів, що випускаються промисловістю, з вмістом ренію, близьким до його граничної розчинності у вольфрамі (27 % мас.), як правило, не схильні до розшарування і не знижують міцність композиту в напрямках, що не співпадають з напрямком армування. Тому як матеріал волокон було застосовано дріт діаметром 0,3 мм із сплаву ВР273ВП, хімічний склад якого наведено в таблиці 2.

Формування композитів здійснювали з використанням контактного зварювання [17].

Випробування на розтяг здійснювали у вакуумі з застосуванням установки ІМАШ-20-75. При цьому в кожному експерименті проводили по 7 паралельних дослідів з метою оцінювання випадкової похибки. У всіх експериментах вона становила для границі міцності  $\Delta\sigma_b = \pm 1,5$  МПа і для відносного подовження  $\delta_5 = \pm 0,6\%$  при довірчій ймовірності  $P = 0,95$ .

Дослідження мікроструктури зразків проводили за допомогою оптичного мікроскопа МІМ-8.

Травлення шліфів композиційних матеріалів здійснювали поетапно. Для травлення шару матриці застосовували реактив, що містить 10 г  $\text{CuSO}_4$ , 50 мл  $\text{HCl}$  (конц.) та 50 мл спирту. Структуру вольфрамових волокон виявляли травленням у водному розчині, що містить 10 г  $\text{KOH}$ , 10 г  $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$  та 80 г  $\text{H}_2\text{O}$ .

### Експерименти

З метою порівняння міцності з'єднання матриці з волокнами з міцністю самої матриці проводили випробування зразків даного композиту, які були армовані волокнами розташованими перпендикулярно до їх осі на розтяг. Така схема армування була застосована тому, що вона дозволяє порівнювати міцність матриці і міцність з'єднання волокон з матрицею. При цьому якщо руйнування зразка відбувалося шляхом відшарування матриці від волокна – вважали, що міцність з'єднання цих компонентів нижча ніж міцність матричного сплаву. А якщо руйнування відбувалось безпосередньо по матриці, то вважали, що міцність з'єднання волокон з матрицею вища ніж міцність матричного сплаву. Це цілком можливо у випадку, якщо в процесі формування відбувається деяке розчинення волокон в матриці і внаслідок чого шар матриці, що контактує з волокнами, зміцнюється за механізмом твердорозчинного зміцнення.

Певну структуру і висоту шару матриці, що безпосередньо контактує з волокнами, в кожному досліді отримували шляхом регулювання амплітуди імпульсу зварювання. Для встановлення максимально можливої амплітуди зварювального імпульсу (при формуванні зразка композиту шостого досліді) спочатку підвищували його амплітуду до з'явлення виплесків на поверхні формуемого композиту, а потім дану амплітуду зменшували до моменту, коли виплески гарантовано не виникали. При формуванні зразків композиту починаючи з п'ятого досліді і до першого поступово зменшували амплітуду зварювального імпульсу. Таким чином отримали зразки композитів для кожного досліді характерний вид мікроструктури яких представлено на рисунку 2.

Результати випробування даних зразків композиту на розтяг наведено в таблиці 3. Для порівняння міцності композиту і матриці в таблиці 4 наведено міцність листів товщиною 0,4 мм сплаву марки ХН65ВБ, який використовували як матрицю.

**Таблиця 1** – Хімічний склад сплаву, що використовувався як матриця композиту

Марка сплава	Масова частка елементів, %								
	C	Si	Cr	Ni	Mn	W	Fe	La	Na
ХН65ВБ	0,05	0,21	24,7	осн.	0,56	3,3	0,34	0,1	0,02

**Таблиця 2** – Хімічний склад сплаву, що використовувався як волокна композиту

Марка сплаву	Масова частка елементів, %						
	W	Re	O <sub>2</sub>	N <sub>2</sub>	C	H <sub>2</sub>	Fe,Al,Mg,Ca,Cu,Zn,P,S,As в сумі
ВР273ВП	72,71	27,24	0,002	0,001	0,003	0,0001	не більше 0,022

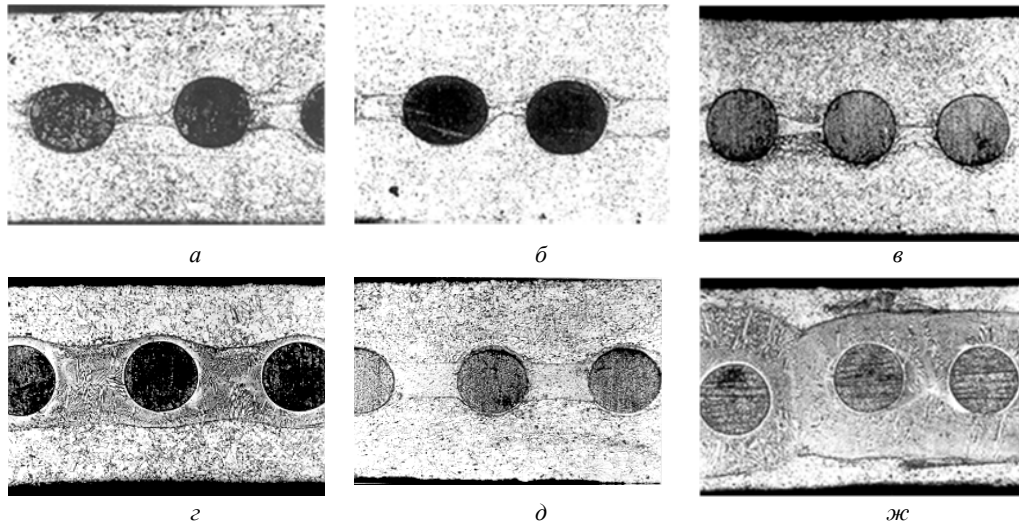


Рисунок 2. Мікроструктура зразків композиту в першому (а), другому (б), третьому (в), четвертому (г), п'ятому (д), шостому (ж) досліді,  $\times 100$

Таблиця 3 – Залежність міцності композиту від виду характерної структури шару матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами

№ досліду	Температура випробування 20 °С		Температура випробування 1300 °С	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_5$ , %
1	360	1,0	11,2	1,1
2	388	1,2	15,2	1,1
3	394	1,3	17,4	1,4
4	402	1,6	23,1	2,1
5	450	2,8	35,6	6,5
6	406	2,2	31,5	4,6

Слід також зазначити, що руйнування зразків дослідів з першого по четвертий відбувалося по границі волокон і матриці, зразків п'ятого і шостого дослідів – по шару матриці, який розплавлявся в процесі формування.

Таблиця 4 – Короткочасна міцність матричного сплаву

Марка сплаву	Температура випробування 20 °С		Температура випробування 1300 °С	
	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_{10}$ , %	$\sigma_b$ , МПа	$\delta_{10}$ , %
ХН65ВБ	456	3,8	37,6	7,5

### Обговорення

Аналіз результатів експериментів, представлених в таблицях 3 і 4, свідчить про те, що підвищення амплітуди зварювального імпульсу від мінімального значення до значення, що відповідає умовам проведення процесу формування зразка композиту п'ятого досліді, приводить до поступового підвищення короткочасної міцності і подовження даного матеріалу як при звичайних температурах (20° С), так і при підвищених (1300° С). При подальшому підвищенні амплітуди зварювального імпульсу спостерігається деяке зниження значень міцності і подовження.

На наш погляд, це можна пояснити тим, що при поступовому підвищенні амплітуди зварювального імпульсу від мінімального в першому досліді до значення, що відповідає умовам п'ятого досліді, відбувається поступове збільшення висоти шару навколо волокон, що розплавляється в процесі формування, а це сприяє покращенню змивання окислів, які неодмінно присутні на поверхнях компонентів даного матеріалу. Змивання окисної плівки приводить до безпосереднього контакту атомів волокон і матриці, що в свою чергу, викликає деяке розчинення компонентів і відповідно, підвищення міцності їх з'єднання.

Зниження механічних властивостей композиту, що відповідає умовам формування шостого досліді, за нашою гіпотезою, обумовлено тим, що в його матриці міститься значна частка (біля 80 %) складової, яка має литу структуру, а вона характеризується нижчими властивостями порівняно з матеріалом з пластично деформованою структурою.

Слід також відмітити, що зразки композиту, що мають максимальні значення механічних властивостей (п'ятий дослід), децю поступаються матеріалу матриці, що на наш погляд цілком закономірно, оскільки структура матричного сплаву на відміну від структури композиту зовсім не містить литої структури.

Таким чином, можна вважати встановленим, що оптимальною структурою композиту даної системи є структура, яка складається з волокон, шару матриці, що розплавлялась при формуванні і повністю оточує волокна, та решту матриці, яка має первісну структуру матричного сплаву.

### Висновки

1. На підставі аналізу механізму руйнування волокнистих композиційних матеріалів описані умови оптимального компанування композиту з метою забезпечення максимальної міцності.

2. Описано закономірності впливу структури шару матриці, що безпосередньо контактує з армувальними волокнами, на міцність композиційного матеріалу з матрицею зі сплаву марки ХН65ВБ і армувальними волокнами зі сплаву марки ВР273ВП.

3. Встановлено, що для забезпечення максимально можливої міцності даного композиту його структура повинна містити шар матриці, який при формуванні має розплавлятися і повністю оточувати волокна, у той же час решта матриці повинна зберігати первісну структуру матричного сплаву.

#### Список літератури

1. Hightemperature composites based on the Nb-Si system reinforced with niobium silicides / Kablov E. N., Svetlov I.L., Neiman A.V. et al. // *Inorganic Materials: Applied Research*. – 2017. – Vol. 8. – No. 4. – P. 609–617.

2. Каблов Е. Н. Инновационные разработки ФГУП «ВИАМ» ГНЦ РФ по реализации «Стратегических направлений развития материалов и технологий их переработки на период до 2030 года» / Kablov E. N., Svetlov I. L., Neiman A. V. // *Авиационные материалы и технологии*. – 2015. – №1 (34). С. 3–33. DOI: 10.18577/2071-9140-2015-0-1-3-33.

3. Ir-base refractory superalloys for ultra-high temperatures / Yamabe-Mitarai, Ro Y., Maruko T., Harada H. // *Met. and Mater. Trans. A*. – 1998. – Vol. 29, № 2. – P. 537–549.

4. Handley J.R. Properties of binary rhodium alloys. // *Platinum Metals Rev.* – 1989. – Vol. 33. – №2. – P. 64–72.

5. Писаренко Г. С. Опір матеріалів: підручник / Писаренко Г. С., Квітка О. Л., Уманський Е. С. ; за ред. Г. С. Писаренка. – К. : Вища шк., 2004. – 655 с.

6. Корнілов О. Опір матеріалів / Корнілов О. : підручник. – К. : Логос, 2002. – 562 с.

7. A. Kelly. *Concise Encyclopedia of Composite*

*Materials* / A. Kelly. – NY, Pergamon Press, 2005. – 286 p.

8. Котречко С. А. Предельная прочность / С. А. Котречко, Ю. Я. Мешков // *Кристаллы, металлы, конструкции*. – К. : Наукова думка, 2008. – 342 с.

9. Воєводін В. М. Еволюція структурно-фазового стану та радіаційна стійкість конструкційних матеріалів / В. М. Воєводін, І. М. Неклюдов. – К. : Наукова думка, 2006. – 376 с.

10. Franklin V. A. Chistopher. Interlaminar fracture toughness estimation of aerospace composites by weighted residual approach / Franklin V. A. // *Проблеми прочности*. – 2015, № 6 (438). – С. 14–22.

11. Андреева А. В. Основы физико-химии и технологии композитов: учеб. пособие для вузов / Андреева А. В. – М. : ИПРЖР, 2001. – 192 с.

12. Копань В. С. Композиційні матеріали / Копань В. С. – К. : унів. вид. «Пульсар», 2004. – 198 с.

13. Композиционные материалы: справочник / В. В. Васильев и др.; под общ. ред. В. В. Васильева, Ю. М.Тарнопольского. – М. : Машиностроение, 1990. 512 с.

14. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів / Суберляк О. В., Баштанник П. І. – Львів : вид. НУ «Львівська політехніка», 2006. – 270 с.

15. Полімерні композиційні матеріали в ракетно-космічній техніці : підручник / Є. О. Джур, Кучма Л. Д., Манько Т. А. та ін. – К. : Вища освіта, 2003. – 399 с.

16. Дзюба В. С. Методика прогнозування прочности композиционных материалов с учётом повреждаемости / Дзюба В. С., Кубак Д. О. // *Проблеми прочности*. – 2015. – № 2 (434). – С. 174–180.

17. А.с. 1519023 СССР, МКИЗ В 23к 11/00. Способ изготовления многослойных обечаек из композиционного материал / Коваль А. Д., Лавренко А. С. Натапов Б. С. и др. ; опубл. 28.08.89 ; Бюл. № 40. – 3 с.

Одержано 23.02.2024

## STUDY OF THE INFLUENCE OF THE STRUCTURE OF FIBER COMPOSITES ON THEIR PERFORMANCE PROPERTIES

- Vinichenko V. Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Physical Materials Science, National University “Zaporizhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: valeryi\_v@ukr.net*, ORCID: 0009-0001-7631-9822
- Pleskach V. Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technologies”, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: vmpayzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-6182-4332
- Yershov A. Dr. Tech. of Sciences, professor, professor of the Department of Physics, Zaporizhzhia Polytechnic National University, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: eav.nuzp@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Volkov G. Candidate of technical sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Machine parts and lifting-transport mechanisms, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: gpvolkov@ukr.net*, ORCID: 0009-0006-9810-5805
- Ivanchenko E. Postgraduate student of the Department of Physical Materials Science of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: metodist26.08@meta.ua*, ORCID: <https://orcid.org/0009-0008-2290-4023>

**Purpose.** It consists in establishing the influence of continuous fibers and a sufficiently plastic matrix of heat-resistant alloy in the structure of a composite intended for work at elevated temperatures, and providing recommendations on the optimal type of structure to achieve optimal strength of this composite at temperatures of 20...1300 °C.

**Research methods.** Theoretical analysis of the possible destruction of products when using continuous fibers was carried out, as well as an analysis of composite samples based on a heat-resistant matrix reinforced with a wire made of tungsten-rhenium alloy. The research was conducted using the metallographic method. The strength of the composite was determined by carrying out tensile tests using the IMASH-20-75 device.

**Results.** The regularities of the influence of the structure on the strength of fibrous composites have been established, on their basis it is possible more thoroughly analyze the processes that occur both during the destruction of the composite and during its formation and, if necessary, to adjust them in such a way as to ensure the maximum possible strength of the material as a whole.

**Scientific novelty.** The regularity of the effect of the general structure of the composite and the matrix surrounding the fibers on the strength of the heat-resistant alloy – tungsten-rhenium fiber composite is established, which allows quantitative analysis of the influence of structural and technological factors of the forming process on the strength of the specified material.

**Practical value.** The work can be useful to designers when choosing the composition of the composite, focusing on the expected mechanism of destruction, as well as to technologists for more productive use of production equipment and reducing the consumption of materials for the production of products.

**Key words:** composite, matrix, heat-resistant alloy, tungsten-rhenium alloy, fibers, formation of composite material, structure, strength, tensile test.

### References

1. Kablov E. N., Svetlov I.L., Neiman A. V., Min P.G., Karachevsev F. N., Karpov M. I. (2017). High-temperature composites based on the Nb-Si system reinforced with niobium silicides. *Inorganic Materials: Applied Research*, 8, 4, 609–617. [in English].
2. Solntsev Yu. P., Belikov S. B., Volchok I. P., Sheyko S. P. (2010). Spetsialni konstruktsiyni materialy. [Special construction materials] Zaporizhzhya, “VALPIS-POLIGRAF”, 536. [in Ukrainian].
3. Yamabe-Mitarai, Ro Y., Maruko T., Harada H. (1998). Ir-base refractory superalloys for ultra-high temperatures. *Met. and Mater.*, 29, 2, 537–549. [in English].
4. Handley J. R. (1989). Properties of binary rhodium alloys. *Platinum Metals Rev.*, 33, 2, 64–72. [in English].
5. Pisarenko G. S., Kvitka O. L., Umanskiy E. S. (2004). Opir materialiv [Strength of Materials]. Kyiv, Vyscha shk., 655. [in Ukrainian].
6. Kornilov O. (2002). Opir materialiv. [Strength of Materials]. Kyiv, Logos, 562. [in Ukrainian].
7. A. Kelly. (2005). *Concise Encyclopedia of Composite Materials*. NY, Pergamon Press, 286. [in English].
8. Korotechko S. A., Meshkov Yu. Ya. (2008). Predelnaya prochnost. Kristally, metally, konstruktsii. [Ultimate strength. Crystals, metals, structures]. Kyiv, Naukova dumka, 342. [in Russian].
9. Voyevodin V. M., Nekludov I. V. (2006). Evolutsiya strukturno-fasovogo stanu ta radiatsiynna stiykist konstruktsiynykh materialiv. [Evolution of the structural phase state and radiation resistance of structural materials]. Kyiv, Naukova dumka, 376. [in Ukrainian].
10. Franklin V. A., Chistopher T. (2015). Interlaminar fracture toughness estimation of aerospace composites by weighted residual approach. *Problemy prochnosti*, 6 (438), 14-22. [in English].
11. Boguslayev V. O., Kachan O. Ya., Kalinina N. Ye. and others. (2009). Aviatsiyno-kosmichni materialy ta tekhnologii. [Aviation and space materials and technologies] Zaporizhzhya, vyd. VAT “Motor Sich”, 383. [in Ukrainian].
12. Kopan V. S. (2004). Komposytsiini materialy [Composite materials]. Kyiv, univ. vyd. “Pulsary”, 198. [in Ukrainian].
13. Kompositsionnye materialy: spravochnik / V.V. Vasilyev and others (1990). [Composite materials]. Moskva, Mashinostroyeniye, 519. [in Russian].
14. Suberlak O.V., Bashtannik P.I. (2006). Tekhnologiya pererobki polimernykh ta komposytsiynykh materialiv [Technology of processing polymer and composite materials]. Lviv, vyd. NU “Lvivska politekhnika”, 270. [in Ukrainian].
15. Polimerni komposytsiini materialy v raketno-kosmichnii tekhnitsi / Ye.O. Dzhur and others (2003). [Polymer composite materials in rocket and space technology] Kyiv, Vyscha osvita, 399. [in Ukrainian].
16. Dsyuba V. S., Kubak D. O. (2015). Metodika prognosirovaniya prochnosti kompositsionnykh materialov s uchyotom povrezhdayemosti. [Methodology for predicting the strength of composite materials taking into account damageability]. *Problemy prochnosti*, (434), 174–180. [in Russian].
17. Koval A.D., Lavrenko A.S., Natapov B. et al. Sposob isgotovleniya mnogosloynnykh obechayek is kompositsionnogo materiala. [The method of manufacturing multi-layer shells from composite material]. Certificate of authorship. 1519023 USSR, MKIS V 23k 11/00. Published 28.08.89. *Bull.* 40, 3. [in Russian].

УДК 678.01:539.2

Підковинська У. В. аспірантка кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: uliana.pidkovynska@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2953-1863

Савченко В. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: savchen2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4305-0097

## ВПЛИВ НАПОВНЮВАЧІВ НА СТРУКТУРУ ТА ВЛАСТИВОСТІ ПОЛІМЕРНОЇ МАТРИЦІ

**Мета роботи.** Підвищення механічних властивостей полімерної матриці шляхом додавання в неї дрібнодисперсних наповнювачів оксиду алюмінію та тальку, які можуть бути модифікаторами.

**Методи дослідження.** Було проведено дослідження зразків з полімеру на розтяг за ДСТУ EN ISO 527-5:2018. Випробування проводили на розривній машині УРМ-5 з максимальним зусиллям 50 кН. Металографічний аналіз проводили на мікроскопі KEYENCE VHX при збільшеннях 50 та 500. Мікроструктуру полімерної матриці визначали шліфах без травлення.

**Отримані результати.** Показано що введення дрібнодисперсних частинок оксиду алюмінію збільшило показник міцності з 4,69 МПа до 13,07 МПа, порівняно зі зразком без наповнювачів. Також було досліджено, що введення дрібнодисперсних частинок тальку в кількості 0,75 % мас. призвело до збільшення показників міцності з 4,69 МПа до 12,74 МПа, в порівнянні зі зразком без наповнювачів.

**Наукова новизна.** Отримано полімерну матрицю з підвищеними механічними властивостями за допомогою додавання наповнювачів, як модифікаторів. Знайдено оптимальний варіант концентрації добавок оксиду алюмінію та тальку. Порівнюючи результати з попередніми дослідженнями, де використовувались оксид алюмінію та тальк у різних концентраціях з різними типами полімерних матриць, можна визначити, що досліджені концентрації модифікаторів з епоксидною смолою ЕД-20 привели до отримання полімерного композита з більшими механічними характеристиками. Отримані результати свідчать про значний потенціал оксиду алюмінію та тальку як ефективних модифікаторів для покращення міцності та інших важливих властивостей композитних матеріалів.

**Практична цінність.** Отримані результати вказують на великий потенціал використання оксиду алюмінію та тальку в якості модифікаторів для полімерних матриць з метою покращення їхніх механічних характеристик. У практичному плані, використання цих наповнювачів може мати значний вплив на розробку нових композитних матеріалів з покращеними властивостями, що може знайти застосування у виробництві композитної арматури. Враховуючи підвищену міцність та стійкість отриманих матеріалів, ці композити можуть бути ефективно використані для створення легших та міцніших конструкцій у будівництві та інших сферах. Також, їхнє використання може призвести до зменшення витрат на ремонт та обслуговування завдяки підвищеній довговічності та стійкості до механічних навантажень. Таким чином, впровадження отриманих результатів може мати вагомий вплив на практику виготовлення композитних матеріалів та забезпечити створення продуктів з покращеними характеристиками для різноманітних застосувань.

**Ключові слова:** композит, полімерна матриця, наповнювачі, модифікування, композитна арматура, епоксидна смола.

### Вступ

У сучасному матеріалознавстві великою перспективою визначається аспект дослідження полімерних композитів. Ці матеріали належать до найрізноманітніших та численних груп матеріалів і визначають собою ключову роль в галузях будівництва, авіації та машинобудування. Також останнім часом великим попитом користується композитна (склопластикові) арматура, яка відноситься до сучасних будівельних матеріалів, використання яких призводить до зменшення економічних витрат на будівництво об'єктів та зменшення ваги об'єктів. Завдяки цим особливостям склопластикової арматури сучасні будівельні компанії все більш

ефективно її використовують в якості армуючого матеріалу як у вигляді арматури так і у вигляді армуючих сіток. Одна з головних переваг полімерної арматури є висока питома міцність, що призводить до зменшення поперечних перетинів арматури при розрахунках міцності конструкції. Також, важливим фактором є те, що композитна полімерна арматура має досить високі показники пружності, що призводить до зменшення витрат на транспортування, так як вона легко згортається в бухти. Але вона також має ряд недоліків, а саме не стійка до впливу високих температур, має низькі модуль пружності та пластичність. Модуль пружності композитної арматури менший за модуль пружності



сталевій арматурі в 4 рази. Тому підвищення механічних властивостей полімерної композитної арматури є досить актуальною матеріалознавчою проблемою. Також дуже важливою задачею є вивчення впливу різноманітних модифікувальних компонентів на вихідні властивості полімеру [1, 2].

### Аналіз досліджень та публікацій

Номенклатура полімерних матеріалів, які виробляються промисловістю України є не достатньо широкою, а потреби будівництва, машино- та авіабудування в цих матеріалах зростають постійно [3]. Тому основним завданням на сьогоднішній день є покращення властивостей полімерних матеріалів за рахунок додавання в них добавок або модифікування. Одним із методів, які досить широко використовуються для змінення властивостей полімерів є модифікування. Модифікування полімерів можна поділити на два основних типи – хімічне та структуроване. Хімічне модифікування полімерів, за рахунок взаємодії макромолекул полімеру з низько- або високомолекулярними речовинами – модифікаторами, призводить до направлено змінення механічних або експлуатаційних властивостей полімеру. В якості модифікаторів зазвичай використовують вже синтезовані макромолекули різноманітних речовин [2].

До реакцій хімічного модифікування полімерів можна віднести [4]:

1) реакції, в результаті яких не відбувається зміна ступеня полімеризації макромолекул полімеру, тобто реакції які відповідають за перетворення та процеси всередині молекул;

2) реакції, в результаті яких відбувається збільшення ступеня полімеризації;

3) реакції, в результаті яких відбувається зменшення ступеня полімеризації.

Структурна (фізична) модифікація полімерів представляє собою процес, який призводить до спрямованої зміни фізико-механічних властивостей полімерів за рахунок модифікування їх надмолекулярної структури, які відбувається під впливом фізичних факторів. При такому виді модифікування полімерів не відбувається змінення хімічної будови макромолекул [2, 5].

У дослідженні [6] наведено аналіз впливу оксиду алюмінію на механічні характеристики епоксидної матриці. Зазначено, що введення оксиду алюмінію у концентрації до 60 % призвело до подвійного зростання модуля пружності при розтягуванні. Тим не менше, це вплинуло на зниження границі міцності композиту при розтягуванні з 20,9 МПа до 14,8 МПа, а також зменшило відносне видовження з 62,5 % до 49,5 %.

У цьому контексті, важливо враховувати компроміс між збільшенням модуля пружності та зниженням межі міцності, оскільки ці параметри взаємодіють у складний спосіб. Зменшення границі міцності може бути результатом високої концентрації оксиду алюмінію, що впливає на загальну витривалість композиту. Дослідження такого роду відкриває нові можливості

для оптимізації складу композитних матеріалів та вдосконалення їхніх механічних характеристик.

У дослідженні [7] зафіксовано значуще підвищення модуля пружності при розтягуванні до 1,5 разу при введенні до 15 % оксиду алюмінію у склад епоксидної матриці. Однак це вплинуло на зменшення границі міцності на 10 МПа та відносного видовження на 8 %. Автори вважають, що такі зміни механічних характеристик можуть бути пов'язані як із агломерацією наповнювача, так із слабкою взаємодією між його поверхнею та матричним матеріалом. Це відкриває можливість для подальших досліджень та оптимізації складу композитів для досягнення кращих механічних характеристик.

Результати дослідження [8] підкреслюють, що розмір частинок тальку відзначається впливом на реологічні та на фізико-механічні властивості композитів. Зменшення діаметра частинок тальку призводить до підвищення показників міцності, теплостійкості та стійкості до ударних навантажень полімерів. Отже можна висунути припущення, що отримані результати свідчать про наявність ефективного механічного зв'язку між тальком і полімером. Додавання тальку в полімер розширює можливості застосування полімерного матеріалу, і оптимальним розміром часточок тальку можна вважати на рівні 5 мікрон при концентрації 10...20 мас.%. Високі значення фізико-механічних властивостей полімерних композитів можна пояснити високим рівнем міжфазної адгезії між компонентами, що може сприяти розвитку перспективних напрямів їх використання.

У роботі [9] вивчено вплив тальку на структуру та властивості поліетилену високого тиску. За результатами рентгеноструктурного аналізу виявлено, що введення тальку в полімерну матрицю супроводжується збільшенням частки кристалічної фази та зростанням середнього розміру кристалітів полімеру. Додаткові дослідження, проведені методами термостимульованої деполіаризації та ізотермічної релаксації потенціалу, вказують на підвищену стабільність скелетного стану полімеру. Це може бути пояснено змінами у структурі полімеру, формуванням нових електрично активних дефектів і зменшенням провідності полімеру при введенні тальку в матрицю. Такі висновки відкривають нові перспективи для розуміння взаємодії тальку з поліетиленом та можливого використання цього композиту в практичних застосуваннях.

### Мета роботи

Перегляд літературних даних розкриває, що використання епоксидних смол для полімерних матриць є вельми актуальним та поширеним напрямом в області полімерних матеріалів. Для досягнення високого рівня їх механічних та експлуатаційних характеристик особлива увага повинна бути приділена дисперсійно-зміцненим полімерним композитам, які включають частинки тальку та оксиду алюмінію.

У цьому контексті, головною метою роботи є вивчення впливу добавок дрібнодисперсних часточок тальку та оксиду алюмінію в якості модифікаторів на

властивості полімерної матриці із епоксидної смоли. Для досягнення поставленої мети необхідно:

- провести аналіз впливу вибраних концентрацій модифікаторів на характеристики полімерної матриці;
- визначити оптимальне співвідношення модифікаторів для досягнення високого рівня показників міцності полімерних матриць;
- здійснити оцінку впливу модифікації на вогнестійкість, що є ключовою характеристикою для полімерних матриць у композиційних матеріалах.

Ця робота пропонує дослідити внутрішній внесок у розуміння взаємодії модифікаторів з епоксидною смолою та сприяти оптимізації властивостей полімерних матриць для покращення їхнього використання в практиці.

### Матеріал і методика досліджень

Об'єктом нашого дослідження є процес удосконалення композитної полімерної матриці для підвищення її механічних властивостей. У цьому експерименті для створення матриці було використано епоксидну смолу ЕД-20. З метою модифікації полімерної матриці, що ґрунтується на епоксидному зв'язку, було вибрано дрібнодисперсний порошок оксиду алюмінію ( $Al_2O_3$ ) та тальку ( $4SiO_2 \cdot 3MgO \cdot H_2O$ ).

Оксид алюмінію (алюміна) є найбільш часто використовуваним керамічним матеріалом серед оксидів, і його застосування вкрай різноманітне. Висока чистота зерна гарантує мінімальні хімічні реакції (зазвичай саме домішки в зернах реагують з забрудненнями печі та знижують робочу температуру кінцевого продукту). Оксид алюмінію – це надзвичайно міцний матеріал з високою твердістю, великою стійкістю до зносу і високою міцністю при стисканні. Він дуже стійкий до термічного шоку та хімічного впливу навіть при підвищених температурах. Виробництво оксиду алюмінію полягає переробленні руди бокситів, що містить максимум 55 % алюмінію, в гарячому розчині гідроксиду натрію. При температурі приблизно 175 °C алюміній розчиняється та утворює солі алюмінату натрію. Високочистий оксид алюмінію фільтрується з сполуки, а отриманому розчину надається температурний режим для охолодження. Під час охолодження розчин стає насичений екстремально дрібнозернистими кристалами гідроксиду алюмінію ( $Al(OH)_3$ ). Ці кристали переносяться до печі для кальцинації при температурах близьких до 1260 °C, що дає порошок оксиду алюмінію. Виняткова хімічна стійкість чистого оксиду алюмінію робить його ідеальним для застосування як в окислюючих, так і в редуційних атмосферах, забезпечуючи йому ключову позицію для багатьох точок контакту в промисловій нафтохімії [10].

Тальк – це гідратований магнієвий силікат з хімічним складом ( $4SiO_2 \cdot 3MgO \cdot H_2O$ ). Це найм'якший відомий мінерал, який має твердість 1 за шкалою твердості Мооса. Тальк дуже ламелярний, гідрофобний та хімічно інертний. Він без запаху, нерозчинний у воді та у слабких кислотах і лугах, але трошки розчинний у

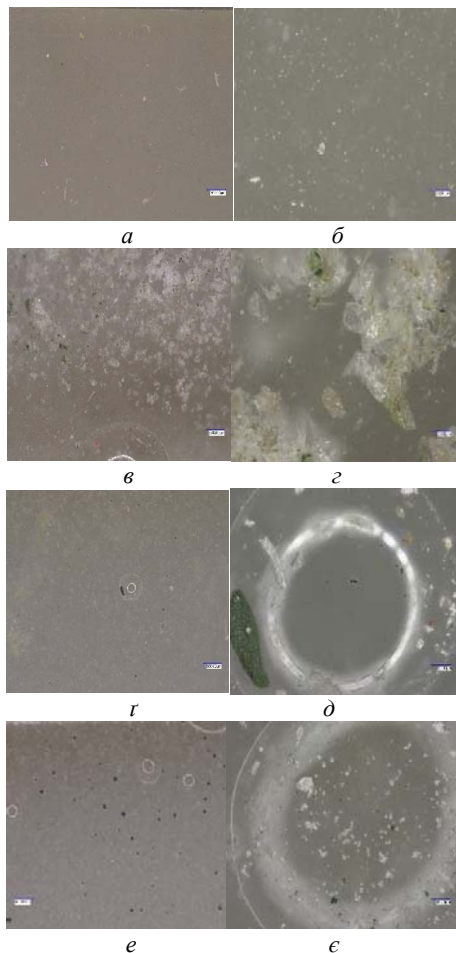
розведених мінеральних кислотах. Його колір може варіювати від білого до сірого або зеленого, насипна щільність від 0,55 до 1,75 г/см<sup>3</sup>. Частинки мають сферичну форму. Середній діаметр часточок ( $D_{50}$ ) 4,7 мкм [11].

Дослідження проводили відповідно до стандарту ДСТУ EN ISO 527-5:2018 «Пластмаси», яке включало розтягування зразків полімерно-композитних матеріалів з постійною швидкістю до моменту розриву. Міцність на розрив визначали при кімнатній температурі. Для дослідження впливу модифікації на структуру та властивості полімерної матриці виготовляли дослідні зразки, кількість яких не менше 5 на кожен номер зразка. Зразки були без накладок та маркувалися з обох боків номером партії та порядковим номером в партії на тій частині зразка за яку відбувалося захоплення. Це дозволило провести ідентифікацію зразків під час випробувань. Кожна партія матеріалу для випробувань включала по п'ять зразків для кожного режиму дослідження властивостей. Перед проведенням випробувань проводилися вимірювання розмірів робочої частини зразків. До протоколу випробувань заносилися значення площі поперечного перерізу зразка. [12]. Дрібнодисперсні часточки модифікатора вводилися безпосередньо в епоксидну смолу, після чого компоненти перемішувалися протягом 10 хвилин і лише після цього вводився отверджувач з наступним перемішуванням компонентів протягом ще 5 хвилин. Наступним етапом було витримання отриманої речовини на вібраційному столі протягом 10 хвилин. Потім полімерний матеріал знаходився у формі при кімнатній температурі до завершення процесу склування. Після цього відбувалося дослідження властивостей композитної полімерної матриці та виготовлялися мікрошліфи [8, 13].

### Результати досліджень

Дослідження міцності полімерних композицій вказало, що зі збільшенням масового вмісту частинок модифікатора зростає міцність композиції. Додавання сферичних частинок  $Al_2O_3$  у кількості 0,5 % мас. призвело до збільшення границі міцності при розриві композиції до 13,07 МПа. Результати дослідження впливу оксиду алюмінію на вогнестійкість показали, що зразок із вмістом 0,5 % мас. оксиду алюмінію витримав високу температуру, можливо, через розміри включень або скупчення часточок оксиду алюмінію, що призвело до таких змін. Дослідження мікроструктури полімерної матриці, модифікованої оксидом алюмінію, свідчить про тенденцію до зменшення пористості матеріалу із зростанням вмісту  $Al_2O_3$ , що відзначається в порівнянні із немодифікованою полімерною матрицею. Для зразків із вмістом 0,5 % оксиду алюмінію виявлено високу тенденцію до агломерації часточок модифікатора. Це явище можна пояснити наступним, що для більш якісного деагломерування часточок оксиду алюмінію, при його обмеженому об'ємному вмісті, необхідно більше часу приділяти вібраційному змішуванню або додатково вводити в розчин поверхнево активні

речовини (див. рис. 1). Дослідження ефекту модифікації полімеру тальковими частинками варіювалося в межах 0,75–2,0 % та від 12,5–20,0 % масової частки. При аналізі вмісту тальку від 0,75 % до 2,0 % зафіксовано підвищення границі міцності композиту до 12,74 МПа, але спостерігається значна крихкість в порівнянні з немодифікованим зразком.



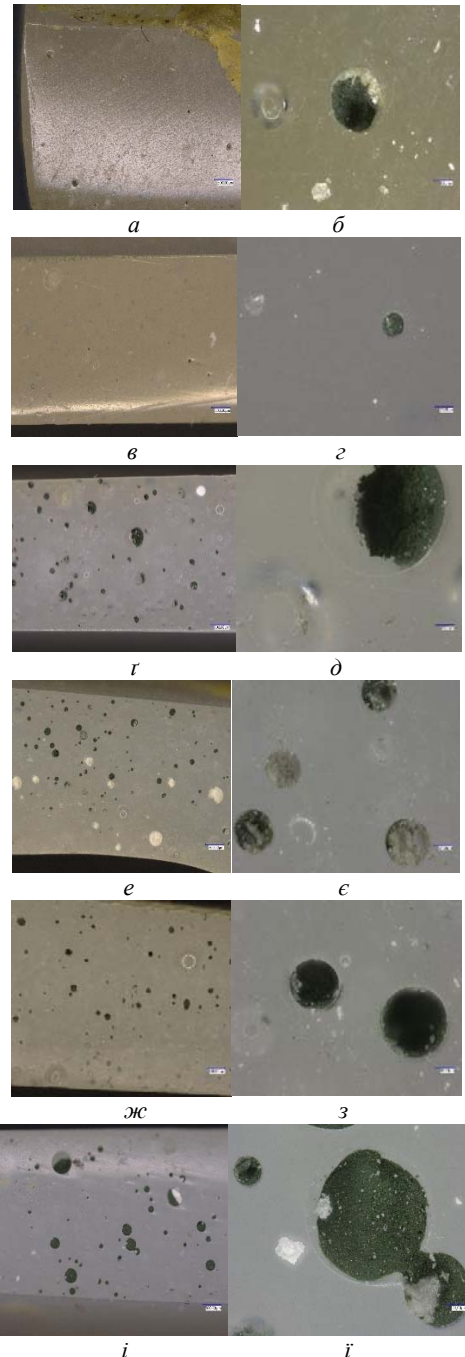
**Рисунок 1.** Мікроструктура дослідних зразків полімерної матриці з  $Al_2O_3$ :

*a* – ЕД-20 (вихідний зразок)  $\times 50$ ; *б* – ЕД-20 (вихідний зразок)  $\times 500$ ; *в* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (0,5 %)  $\times 50$ ; *г* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (0,5 %)  $\times 500$ ; *р* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (1,0 %)  $\times 50$ ; *д* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (1,0 %)  $\times 500$ ; *е* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (1,5 %)  $\times 50$ ; *є* – ЕД-20+  $Al_2O_3$  (1,5 %)  $\times 500$

Вміст тальку на рівнях 1,0 % та 1,5 % викликав активне вспінання полімерного зразка, що може пояснюватися роллю тальку як нуклеатора. При збільшенні вмісту тальку від 12,5 % до 20,0 % у складі полімерної матриці відбувається практично лінійний процес зменшення показників міцності при розтягуванні.

Це можна пояснити тим, що полімерна матриця при розтягуванні стає більш чутливою до впливу мінеральних наповнювачів, що можуть служити центрами утворення дефектів під час механічного впливу. Таким чином, міцність в таких композитах зменшується порівняно з немодифікованим зразком [14].

Аналіз мікроструктури полімерного матеріалу, підданого модифікації оксидом тальку, вказує на системний ефект при вмісті тальку вище 12 %. На цьому етапі спостерігається одночасне зменшення розміру пор, але збільшення їх кількості, що призводить до дезінтеграції структури та погіршення механічних властивостей матеріалу (рис. 2) [13, 15].



**Рисунок 2.** Мікроструктура дослідних зразків полімерної матриці з тальком:

*a* – ЕД-20+ Тальк(0,75 %)  $\times 50$ ; *б* – ЕД-20 + Тальк (0,75 %)  $\times 500$ ; *в* – ЕД-20+ Тальк(2,0 %)  $\times 50$ ; *г* – ЕД-20+ Тальк(2,0 %)  $\times 500$ ; *р* – ЕД-20+ Тальк(12,5 %)  $\times 50$ ; *д* – ЕД-20 + Тальк (12,5 %)  $\times 500$ ; *е* – ЕД-20+ Тальк (15,0 %)  $\times 50$ ; *є* – ЕД-20+ Тальк (15,0 %)  $\times 500$ ; *ж* – ЕД-20+ Тальк(17,5 %)  $\times 50$ ; *з* – ЕД-20 + Тальк (17,5 %)  $\times 500$ ; *і* – ЕД-20+ Тальк (20,0 %)  $\times 50$ ; *ї* – ЕД-20+ Тальк (20,0 %)  $\times 500$

## Висновки

Дослідження виявило, що додавання лише 0,5 % мас. оксиду алюмінію до полімерної матриці призвело до значущого збільшення границі міцності до 13,07 МПа, порівняно із не модифікованим зразком, у якого цей показник складав 4,69 МПа. У той же час введення тальку у концентрації 1,0 % та 1,5% викликало термічну реакцію та вспінання композиту, що підкреслює важливість точного дозування компонентів при модифікації.

Дослідження мікроструктури модифікованої оксидом алюмінію полімерної матриці виявило важливі залежності між вмістом модифікатора та властивостями матеріалу. Зменшення пористості при збільшенні вмісту  $Al_2O_3$  свідчить про ефективність модифікації. Особливу увагу слід приділити процесам агломерації при невеликих концентраціях модифікатора, що може впливати на однорідність матеріалу. Зростання міцності при розриві та підвищення вогнестійкості при додаванні оксиду алюмінію свідчать про позитивний внесок модифікатора у полімерні композити. Загальною тенденцією досліджень є те, що введення тальку у полімерну матрицю суттєво впливає на її механічні та вогнетривкі властивості. У деяких межах концентрації тальку спостерігається підвищення межі міцності композиту, але разом із цим збільшується крихкість, особливо при високих вмістах тальку.

Ці результати вказують на потужний вплив модифікації на механічні властивості полімерів, зокрема на їхню границю міцності, роблячи їх конкурентоспроможними в ряді застосувань. Такий підхід може знайти своє застосування в промислових галузях, де вимоги до міцності матеріалів високі, таких як авіаційний та автомобільний сектори. Отже, результати цього дослідження стверджують високий потенціал для подальших досліджень та реалізації виробництва покращених композитів.

## Список літератури

1. Сурмай М. І. Міцність та деформативність дощатоклеєних балок армованих склопластиковою та базальтовою арматурою : дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних науки / М. І. Сурмай – Львів : «Національний університет Львівська Політехніка», 2015. – 185 с. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://lpnu.ua/spetsrady/d-3505217/surmaymykhailo-igorovych>
2. Суберляк О. В. Технологія переробки полімерних та композиційних матеріалів / Суберляк О.В., Баштанник П.І. – Київ.:2006. -270 с.
3. Композиційні матеріали в авіабудуванні (огляд) / С. Б. Беліков, І. П. Волчок, О. А. Мітяєв та ін. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2017. – № 2. – С. 32–40.
4. Мельник Л. І. Хімія і фізика полімерів : навч. посібн. / Мельник Л. І. – К.: НТУУ «КПІ», 2016.–161 с.
5. Вплив природи наповнювача на хімічну стійкість і мікротвердість плівок наповнених епоксидних композитів / Г. Мартинюк, В. Закодонський, Н. Скорецько, О. Аксіментьєва // Фізика і хімія твердого тіла. – 2015. – Т. 16. – № 3. – С. 528–533 DOI: 10.15330/pcss.16.3.528-533
6. Noraiham Mohamad, Andanastuti Muchtar, Mariyam Jameelah, Ghazali Dahlan, Hj. Mohd, Che Husna Azhari. The Effect of Filler on Epoxidised Natural Rubber/Alumina Nanoparticles Composites. European Journal of Scientific Research. – 2008. – Vol. 24. – No.4 – P. 538–547
7. S. H. Limetal. Materials Science and Engineering / S. H. Limetal. – 2010. –A . 527. – P. 5670–5676
8. Влияние размера частиц талька на межфазные взаимодействия композиционных материалов на основе полипропилена / Тураев Э. Р., Ахмедов У. К., Джалилов А. Т., Бекназаров Х. С. // Universum : Химия и биология : электрон. научн. журн. – 2018. – № 12(54).
9. Калычнев Э.Л., Саковцева М.Б. Свойства и переработка термопластов. – Л. : Химия, 1983. – 287 с.
10. Офіційний сайт “PERFORMANCE CERAMICS & REFRACTORIES” [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/news-articles/aluminum-oxide-what-it-where-its-used>
11. Офіційний сайт “Surechemical” [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://www.surechemical.com/PersonalCare-Ingredients/TALC-POWDER.html>
12. ДСТУ EN ISO 527-5:2018 Пластмаси. Визначення властивостей під час розтягування. Частина 5. Умови випробування односпрямованих волокнистих пластмасових композитів: чинний з 2020-01-01. – К : Технічний комітет стандартизації «Каучуки, гуми та гумові вироби» (ТК 128)ю – 2020. ISO 527-5:2009, IDT.
13. Підковинська У. В. Дослідження впливу модифікування на міцність композитної полімерної матриці: магістерська робота / У. В. Підковинська. – Запоріжжя : НУ «Запорізька політехніка», 2019. – 95 с. [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/5324>
14. Застосування тальку в модифікованих пластмасах [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://ua.pvcadditives.net/info/application-of-talc-powder-in-modified-plastic-79931484.html>
15. Пружно-деформаційні властивості полілактидних композитів з дрібнодисперсними наповнювачами / Куліш Б. І., Катрук Д. С., Масюк А. С. та ін. // Актуальні проблеми хімії, матеріалознавства та екології: матеріали І Міжнародної наукової конференції (Луцьк, 12–14 травня 2021 року). Луцьк, 2021. – С. 57–58.

Одержано 27.02.2024

## INFLUENCE OF FILLERS ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF POLYMER MATRIX

- Pidkovynska U. Postgraduate student of the of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technology, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: uliana.pidkovynska@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2953-1863
- Savchenko V. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Composite Materials, Chemistry and Technology, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: savchen2017@gmail.com, ORCID: 0000-0002-4305-0097

**Purpose.** Enhancement of the mechanical properties of the polymer matrix through the incorporation of finely dispersed fillers, namely aluminum oxide and talc, as potential modifiers.

**Research methods.** Research was conducted on polymer specimens subjected to tensile testing according to DSTU EN ISO 527-5:2018. The tests were performed using a URM-5 tensile testing machine with a maximum force of 50 kN. Metallographic analysis was carried out using a KEYENCE VHX microscope at magnifications of 50 and 500. The microstructure of the polymer matrix was assessed through etching-free procedures.

**Results.** The study demonstrates that the incorporation of finely dispersed aluminum oxide particles increased the strength parameter from 4.69 MPa to 13.07 MPa, as compared to the unfilled sample. Additionally, it was observed that the introduction of finely dispersed talc particles at a concentration of 0.75 % by mass led to an enhancement in strength values from 4.69 MPa to 12.74 MPa, in comparison to the unfilled sample.

**Scientific novelty.** A polymer matrix with enhanced mechanical properties was achieved through the addition of fillers acting as modifiers. The optimal concentration of aluminum oxide and talc additives was determined. By comparing the results with previous studies involving aluminum oxide and talc at various concentrations in different types of polymer matrices, it can be concluded that the investigated concentrations of modifiers with epoxy resin ED-20 led to the production of a polymer composite with superior mechanical characteristics. The obtained results underscore the significant potential of aluminum oxide and talc as effective modifiers for improving the strength and other crucial properties of composite materials.

**Practical value.** The obtained results highlight the significant potential of utilizing aluminum oxide and talc as modifiers for polymer matrices to enhance their mechanical characteristics. From a practical standpoint, the use of these fillers can exert a substantial impact on the development of new composite materials with improved properties, finding application in composite reinforcement production. Considering the heightened strength and resilience of the resulting materials, these composites can be effectively employed to create lighter and stronger structures in construction and other industries. Additionally, their application may lead to reduced repair and maintenance costs due to increased durability and resistance to mechanical loads. Thus, the implementation of the obtained results could have a substantial influence on the practice of composite material manufacturing, ensuring the creation of products with enhanced characteristics for various applications.

**Key words:** composite, polymer matrix, fillers, modification, composite reinforcement, epoxy resin.

### References

1. Surmai, M. I. (2015). Mitsnist ta deformatyvnist doshchatokleynikh balok armovanykh skloplastykovoyu ta bazaltovoyu armaturoyu [Strength and deformability of laminated veneer lumber beams reinforced with glass fiber and basalt fiber reinforcement]. National University Lviv Polytechnic. Dissertation for the degree of Candidate of Technical Sciences.
2. Suberliak O. V., Bashtannik P. I. (2006). Tekhnologiya pererobky polimernykh ta kompozytsiynykh materialiv. [Technology of processing polymer and composite materials]. Kyiv, 270.
3. S. B. Belikov, I. P. Volchok, O. A. Mitiaiev, V. M. Pleskach, V. O. Savchenko (2017). Kompozytsiyni materialy v aviabuduvanni. [Composite materials in aviation] (overview). New Materials and Technologies in Metallurgy and Mechanical Engineering, 2, 32–40.
4. Melnyk L. I. (2016). Chemistry and Physics of Polymers: Educational manual. Kyiv: NTUU "KPI", 161.
5. H. Martiniuk, V. Zakodonskyi, N. Skoreiko, O. Aksimentieva (2015). Vplyv pryrody napovnyuvacha na khimichnu stiikist' i mikroverdist' plivok napovnenykh epoksydnykh kompozytiv. [Influence of filler nature on chemical resistance and microhardness of films filled with epoxy composites]. Physics and Chemistry of Solid State, 16, 3, 528–533. DOI: 10.15330/pcss.16.3.528–533
6. Noraiham Mohamad, Andanastuti Muchtar, Mariyam Jameelah, Ghazali Dahlan, Hj. Mohd, Che Husna Azhari (2008) "The Effect of Filler on Epoxidized Natural Rubber-Alumina Nanoparticles Composites." European Journal of Scientific Research, 24, No. 4, pp. 538-547.
7. S.H. Lim et al. (2010). Materials Science and Engineering A, 527, pp. 5670–5676.

8. Vliyaniye razmera chastits tal'ka na mezhfaz-nye vzaimodeystviya kompozitsionnykh materialov na osnove polipropilena. [Influence of talc particle size on interphase interactions of composite materials based on polypropylene]. *Universum: Chemistry and Biology*, 2018, 12(54).
9. Kalynchev E. L., Sakovtseva M. B. (1983). "Properties and Processing of Thermoplastics". Leningrad: Khimiya, 287.
10. Official website "Performance ceramics & refractories". Available at: <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/news-articles/aluminum-oxide-what-it-where-its-used>
11. Official website "Surechemical". Available at: <https://www.surechemical.com/PersonalCare-Ingredients/TALC-POWDER.html>
12. State Standard of Ukraine DSTU EN ISO 527-5:2018 "Plastics. Determination of tensile properties. Part 5. Test conditions for unidirectional fibre-reinforced plastic composites". Effective from 2020-01-01. Kyiv: Technical Committee for Standardization "Rubbers, rubber and plastic products" (TC 128) 2020. ISO 527-5:2009, IDT.
13. Pidkovinska U.V. (2019). Doslidzhennya vplyvu modifikatsiyi na mitsnist kompozytnoi polimernoyi matrytsi. [Investigation of the influence of modification on the strength of composite polymer matrix]. Master's thesis, Zaporizhzhia: Zaporizhzhia Polytechnic National University. Available at: <http://eir.zntu.edu.ua/handle/123456789/5324>
14. Zastosuvannya talku v modifikovanykh plastmasakh. [Application of talc in modified plastics]. Available at: <https://ua.pvcadditives.net/info/application-of-talc-powder-in-modified-plastic-79931484.html>
15. Kulish B.I., Katruk D.S., Masiuk A.S., Kysil Kh.V., Levitskyi V.Ye. (2021). Pruzhno-deformatsiyni vlastyvoli polilaktydnykh kompozytiv z dribnodispersnymy napovnyuvachamy. Aktualni problemy khimiyi, materialoznavstva ta ekolohiyi. [Elastic-deformation properties of polylactic acid composites with fine-dispersed fillers]. *Actual Problems of Chemistry, Materials Science and Ecology: Proceedings of the 1st International Scientific Conference (Lutsk, May 12-14, 2021)*, 57–58.

## ТЕХНОЛОГІЇ ОТРИМАННЯ ТА ОБРОБКИ КОНСТРУКЦІЙНИХ МАТЕРІАЛІВ

### TECHNOLOGIES OF OBTAINING AND PROCESSING OF CONSTRUCTION MATERIALS

УДК 62-9

- Комісаров О. О. аспірант Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: Al.komissarov@meta.ua, ORCID: 0009-0003-6285-3674
- Пухальська Г. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: puhalska66@gmail.com, ORCID: 0000-0001-8118-4179
- Дядя С. І. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри технологія машинобудування Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: djadja@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-7457-7772

### ПОСТ-ОБРОБКА ДЕТАЛЕЙ ФРЕЗЕРУВАННЯМ НА ВЕРСТАТІ З ЧПК ПІСЛЯ 3D ДРУКУ МЕТОДОМ НАПЛАВЛЕННЯ

**Мета роботи.** Провести дослідження можливості фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів після їх виготовлення 3D-друком. Моделювання методом Наплавлення – Fused Deposition Modeling (FDM), визначити оптимальні режими фрезерування, які поліпшують якість поверхні та точність розмірів.

**Методи дослідження.** Експериментальним шляхом визначено шорсткість та точність зразків з полімерних матеріалів, які були виготовлені FDM методом на 3D-принтері RepSystem V2.1 з програмою для створення G-коду PrusaSlicer та оброблені з різними режимами на фрезерному верстаті з ЧПК Profi+Wood. Точність розмірів визначалась за допомогою механічного мікрометра МК 25 ГОСТ 6507-90 з точністю 0,01 мм. Для дослідження поверхні оброблених зразків використовувався цифровий мікроскоп MikroView 500x.

**Отримані результати.** Визначені точність розмірів та шорсткість поверхні друкованих зразків з полімерних матеріалів після обробки фрезами різних конструкцій з різними режимами різання.

**Наукова новизна.** Досліджено можливості використання механічної обробки методом фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів, які використовуються для 3D-друку.

**Практична цінність.** Проведений аналіз фрез для обробки і проведено тестування можливості їх використання для деталей, надрукованих FDM методом. Рекомендовані режими фрезерування для матеріалів, які використовуються для 3D-друку, які значно поліпшують якість поверхні: для однозубої фрези числа обертів – 22000 об/хв та подача – 1800 мм/хв.; для тризубої фрези: числа обертів – 22000 об/хв та подача 2700 мм/хв. При обробці на цих режимах шорсткість знижується на 95%. Встановлено, що при пост-обробці пластиків після 3D-друку фрезеруванням можливо досягти точності розмірів до 10 квалітету. Визначені полімерні матеріали, вироби з яких після FDM друку рекомендовано остаточно обробляти фрезеруванням для виготовлення точних макетів, майстер-моделей для лиття, форм для формування деталей вакуумом і як закінчену пластикову деталь при одиничному та дрібносерійному виробництві.

**Ключові слова:** Моделювання методом Наплавлення, 3D-принтер, пост-обробка, фрезерування, пластик, шорсткість, точність.

#### Вступ

Аддитивні технології – одна з форм технологій виробництва, де тривимірний об'єкт створюється шляхом послідовного накладання одного шару матеріалу на інший (друку, спікання). Для друку використовується 3D-принтер, який забезпечує створення фізичного об'єкта на основі цифрової 3D-моделі шляхом послідовного накладання пластичного матеріалу. 3D-друк знайшов широке застосування в медицині, освіті, машинобудівній, авіаційній,

харчовій промисловості та інших сферах діяльності людини. Основними напрямками вдосконалення методів і технологій тривимірного друку є підвищення точності і швидкості виготовлення деталей, розширення номенклатури застосовуваних і використовуваних одночасно матеріалів, усунення дефектів друкованої продукції [1].

Технологія FDM (Fused Deposition Modelling) – моделювання методом пошарового наплавлення була запатентована в 1989 році Скоттом Крампом, одним із співзасновників компанії Stratasys [2]. FDM

застосовується для створення тривимірних моделей, макетів, виробів до яких не пред'являються особливі вимоги до якості поверхні і точності виготовлення. В якості витратних матеріалів доступні всілякі термопластики, композити, полікарбонати, поліаміди, полістирол, лігнін та багато інших. Моделювання методом FDM застосовується для швидкого прототипування та слугує недорогою альтернативою стандартним методам при виготовленні у дрібносерійному виробництві [3–6].

На даний час технологія 3D-друку не завжди дозволяє отримати виріб, готовий до використання. За рахунок його пошарового створення при 3D-друці (зокрема FDM методом) досить часто стає проблема додаткової обробки для поліпшення форми та якості поверхні. В більшості випадків для пост-обробки використовується ручна механічна обробка, піскоструминна обробка, хімічна обробка, які є малопродуктивними та не дозволяють точно витримати розміри.

Фрезерування деталей після 3D-друку є додатковим процесом обробки для покращення якості поверхні або досягнення певних характеристик деталей. Якість поверхні після фрезерування залежить від декількох факторів, включаючи вихідну якість FDM друку, матеріал, що використовується при цьому, параметри фрезерування та стан фрезерного верстата.

#### Аналіз досліджень та публікацій

Основна перевага процесу адитивного виробництва полягає в тому, що він може отримувати вироби складної форми, має низьку вартість і не потребує будь-яких складних інструментів для виробництва готової продукції [7]. Одним з найбільш часто використовуваних методів є FDM. При цьому основними причинами обмеженого застосування методу є низька якість зовнішньої поверхні, неможливість виготовлення деталей великого розміру, використання обмежених матеріалів [8], об'ємна похибка та відхилення форми [9]. Дослідження, спрямовані на розширення цих обмежень, можна розділити на два напрямки. За першим напрямком роботи зосереджуються на вдосконаленні технології, за другим – на додатковій обробці надрукованих деталей, що відомий як пост-обробка [10].

Дослідження з використання фрезерних верстатів з ЧПК для покращення якості поверхні деталей, друківаних FDM методом, свідчить про те, що дуже складно інтерпретувати оптимальні параметри різання цих деталей [11]. Крім цього деякі дослідження показують негативні результати через труднощі регулювання осі Z верстата з ЧПК [12].

У зв'язку з цим визначення геометрії інструментів, режимів фрезерування деталей, отриманих FDM методом, є актуальним. Це може надати безліч переваг у виробництві деталей за рахунок усунення слідів між шарами, що забезпечить якість форми та шорсткість поверхні.

#### Мета роботи

Провести дослідження можливості фрезерування зразків з різних полімерних матеріалів після їх виготовлення 3D-друком FDM методом, визначити оптимальні режими фрезерування, які поліпшують якість поверхні та точність розмірів.

#### Матеріал і методика досліджень

Для 3D-друку FDM методом використовувався 3D принтер RepSystem V2.1 з програмою для створення G-коду PrusaSlicer; шаблоном заповнення – Rectilinear; щільністю заповнення – 100 %. Особливістю даного принтера є можливість змінювати на печатних головках діаметри сопел. Для виготовлення зразків використовувалися сопла діаметром 0,8 та 1,2 мм. Висота шару матеріалу, що наплавлявся, не повинна перевищувати однієї третини від діаметра сопла. При друкуванні зразків з PC його змінювали від 0,2 мм до 0,5 мм. Для формування при друку їх структури досліджувалась щільність заповнення, коефіцієнт екструзії та висота шару матеріалу при наплавленні.

Зразки для проведення експериментів виготовляли з шести найбільш поширених матеріалів для 3D-друку: ABS, PLA, PC, CoPET, PBT, PA(Nylon).

ABS-пластик, акрилонітрілбутадієнстірол – це найпопулярніший і один з кращих витратних матеріалів для 3D-друку. ABS не токсичний, ударостійкий і еластичний. Температура плавлення становить від 220°C до 240°C. ABS - пластик має рівномірну та однорідну якість поверхні надрукованих виробів. Вироби легко обробляються в етилацетаті, ацетоні, дихлоретані, дихлорметані. Чудово підходить для 3D-друку більшості ненавантажених виробів, до яких не пред'являються високі вимоги. Температура експлуатації від -10°C до +90°C. Пластик ABS+ є ABS пластиком, але з добавками, які знижують згортання при охолодженні. Температура експлуатації від -40 °C до +80 °C [13, 14].

CoPET – більш жорсткий у порівнянні з ABS-пластиком. Для нього характерні: висока розмірна стабільність, глянцева поверхня; інертність до розчинників; висока адгезія між шарами при друці; відсутність деламінації і деформації при друці. Рекомендується для 3D-друку деталей технічного призначення – втулки, муфти, підшипники, несильно навантажені шестерні тощо. Температура експлуатації від -40°C до +60°C [13, 15].

PLA - пластик є найкращим матеріалом для початку роботи з 3D-принтером. Практично повна відсутність його усадки сприяє правильному друку моделі, а також забезпечує високу роздільну здатність друку, що дозволяє створювати моделі геометрично складніші, ніж при використанні ABS. Матеріал призначений для 3D-друку різних виробів з підвищеною деталізацією, макетів, прототипів, іграшок. Температура експлуатації від -10 °C до +60 °C [3].



PC – прозорий матеріал для 3D-друку, з характерною високою жорсткістю і одночасно високими характеристиками міцності. Стійкий до високих температур. Використовується для 3D-друку деталей різного призначення: корпусів, кріплень. Температура експлуатації до 120 °С.

PET – прозорий матеріал для 3D-друку, має високу механічну міцність і ударну стійкість. Стійкий до стирання і багаторазових деформацій при розтягуванні і згині, можливе гартування. Температура експлуатації від -60 °С до +220 °С [13, 14].

Нейлон. Для друку нейлоном потрібна вища температура, що знаходиться в діапазоні від 260°C до 280 °С та закрита камера, що підігривається. Нейлон має високу здатність вбирати воду, а також більш тривалий період застигання. Деталі з даного матеріалу виходять не такими жорсткими, як з ABS- пластика і його можна використовувати в шарнірах ковзання.

При фрезеруванні після 3D-друку використовувався фрезерний верстат з ЧПК Profi+ Wood, на якому частоту обертання шпинделя можна регулювати до 24000об/хв. Для обробки плоских зразків використовувалися твердосплавні однозубі та трьохзубі спіральні кінцеві фрези Ø 3мм та двозуба з прямими канавками (рис. 1). Для фрезерування 3D-рельєфів використовувалася двозуба фреза зі сферичним торцем.



Рисунок 1. Кінцеві фрези [16]

Програма для обробки деталі створювалась за допомогою Mecsoft Visual CAM.

Дослідження фрезерування складних поверхонь зразків з різних матеріалів виконувалось на моделі, наведеної на рис. 2.

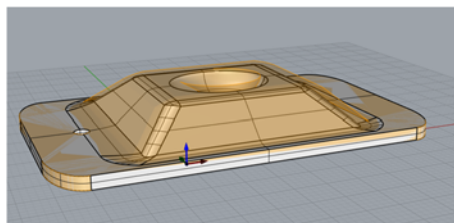


Рисунок 2. Модель зразка для дослідження фрезеруванням різних матеріалів на верстаті з ЧПК

Для дослідження точності пост-обробки фрезеруванням різними фрезами використовувалася модель, що наведена на рис. 3.

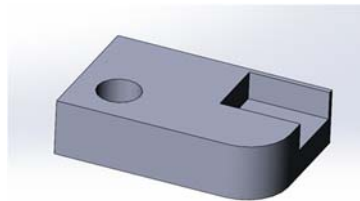


Рисунок 3. Тестова модель для перевірки точності розмірів при фрезеруванні

Шорсткість поверхні зразків (рис. 4) після друку FDM методом та фрезерування вимірювалася на профілометрі 171621 (рис. 5).

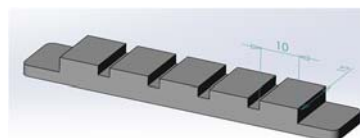


Рисунок 4. Модель зразка для дослідження впливу режимів фрезерування на шорсткість



Рисунок 5. Вимірювання шорсткості на профілометрі

Точність розмірів визначалась з точністю 0,01 мм за допомогою механічного мікрометра МК 25 ГОСТ 6507-90. Для дослідження поверхні оброблених зразків використовувався цифровий мікроскоп MikroView 500x.

### Результати досліджень та обговорення

Попереднім кроком при створенні зразків було визначення того, яка повинна бути товщина шару пластика при друку, щоб забезпечити достатню для з'єднання адгезію. Дані для досліджень наведені в табл. 1. В якості матеріалу використовувався PC пластик.

Таблиця 1 – Параметри друку з різною висотою шару, що наплавляється

№	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Щільність заповнення, %	Коефіцієнт екструзії
1	0,8	0,2	100	1,00
2	0,8	0,25	100	1,00
3	0,8	0,3	100	1,00
4	1,2	0,2	100	1,00
5	1,2	0,3	100	1,00
6	1,2	0,4	100	1,00
7	1,2	0,5	100	1,00

Для максимальної адгезії між шарами пластика при 3D друці використовувалась температура сопла 250 °С і температура столу 120 °С. Результати друку соплами діаметрами 1,2 мм та 0,8 мм з висотою шару від 0,2 до 0,5 мм показані на рис. 6 та 7.

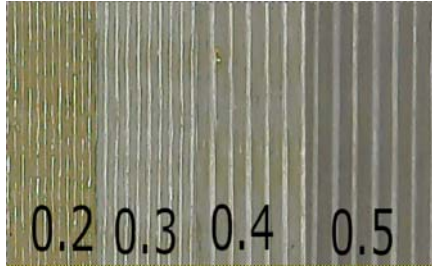


Рисунок 6. Результати друку соплом 1,2 мм

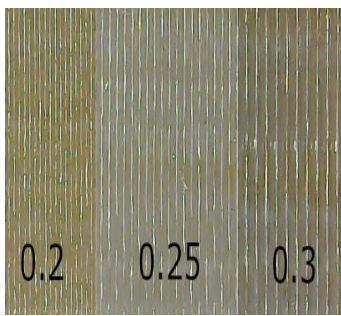


Рисунок 7. Результати друку соплом 0,8 мм

Дослідження обробки фрезою зразків показали, що зі збільшенням висоти шару адгезія погіршується. При фрезеруванні кінцевою тризубою фрезою з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачі 0,01 мм/зуб, осьовою глибиною різання 0,5 мм, радіальною глибиною 3 мм відбувалося відшарування матеріалу у вигляді сколів. Найбільший скол (рис. 8) спостерігався на зразках, які були створені при висоті шару 0,5 мм.



Рисунок 8. Скол, який виник при фрезеруванні зразка, створеного при висоті шару 0,5 мм

В протипагу цьому зразки, надруковані з шаром 0,2 мм, як при використанні сопла діаметром 1,2 мм так і при використанні сопла 0,8 мм, при фрезеруванні не сколювалися. Тому наступні дослідження з вибору щільності заповнення та коефіцієнту екструзії (табл. 2) проводилися при друкуванні зразків з висотою шару 0,2 мм.

Таблиця 2 – Параметри друку з різною щільністю заповнення та коефіцієнтом екструзії

№ зразка	Діаметр сопла, мм	Висота шару, мм	Щільність заповнення, %	Коефіцієнт екструзії
21	0,8	0,2	90	1,00
22	0,8	0,2	100	1,00
23	0,8	0,2	100	1,05
24	0,8	0,2	100	1,10
25	0,8	0,2	100	1,15
<b>26</b>	<b>0,8</b>	<b>0,2</b>	<b>100</b>	<b>1,20</b>
31	1,2	0,2	90	1,00
32	1,2	0,2	100	1,00
33	1,2	0,2	100	1,05
34	1,2	0,2	100	1,10
35	1,2	0,2	100	1,15

В процесі друку було виявлено, що при коефіцієнті екструзії 1,20 (зразок 26) на поверхню наноситься така кількість пластика (рис. 9), яка призводить до руйнування нагрівальної головки принтера. Тому друк виконувався з максимальним коефіцієнтом екструзії 1,15.



Рисунок 9. Нашарування пластика при перебільшеній екструзії

Для дослідження наявності пор в структурі зразків було виконано фрезерування верхніх шарів. Поверхні, що утворилися показані на рис. 10-19.

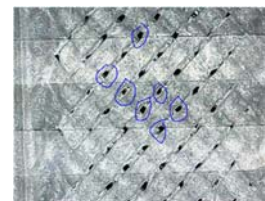


Рисунок 10. Зразок №21

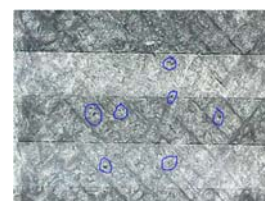


Рисунок 11. Зразок №22

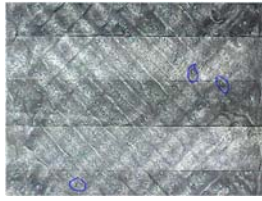


Рисунок 12. Зразок №23



Рисунок 13. Зразок №24



Рисунок 14. Зразок №25

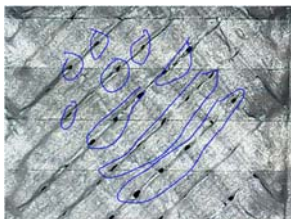


Рисунок 15. Зразок №31

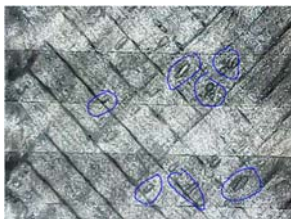


Рисунок 16. Зразок №32



Рисунок 17. Зразок №33



Рисунок 18. Зразок №34



Рисунок 19. Зразок №35

При щільності заповненні 90 % (рис. 10 та рис. 15) між нитками при друці утворюються значні порожнини, що порушують цілісність структури. Їх кількість зменшується при щільності заповнення 100%. Найбільш сприятлива структура утворюється при коефіцієнтах екструзії 1,05 та 1,10 з щільністю заповнення 100% при друці соплами діаметром 1,2 мм та 0,8 мм (рис. 12, 13, 17, 18). При коефіцієнті екструзії 1,15 при друці соплом діаметром 1,2 мм пластику видається настільки багато, що шари кладуться зі спотвореннями (рис. 19). Це додає міцності моделі, але збільшує навантаження на нагрівальну головку принтера.

Визначені параметри друку щодо товщини шару пластика, щільності заповнення та коефіцієнту екструзії використовувалися для створення зразків з різних матеріалів пластика, по яким визначалася можливість отримання остаточної форми моделі фрезеруванням. Для цього форма зразка (рис. 2) має трьохвимірний рельєф, що дає можливість виконувати фрезерування за трьома координатами та дослідити вплив властивостей матеріалу пластика на якість поверхні при різних напрямках руху інструменту.

Друк моделей виконувався при діаметрі сопла 1.2 мм, висоті шару 0,2 мм, коефіцієнті екструзії 1,10 та щільності заповнення 100 %. При 3D-друку розміри моделі були збільшені на величину припуску для фрезерування. Траєкторія руху інструменту (рис. 20) передбачає обробку половини поверхні моделі для порівняння з отриманою після друку.

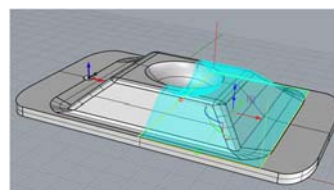


Рисунок 20. Траєкторія руху інструменту

Зразки для досліджень при фрезеруванні виготовляли з наступних пластиків ABS, CoPET, PLA, Nylon, PBT та PC.

Фрезерування проводилося двозубою фрезою зі сферичним торцем з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачею 0,01 мм/зуб, радіальною глибиною 0,7 мм, осьовою глибиною 0,3 мм.

Після обробки зразків з ABS (рис. 21) та PC-пластиків їх поверхні були гладкі та чисті, без похибок форми та незрізаних волокон.



Рисунок 21. Поверхня моделі з ABS-пластику

Після фрезерування зразків з CoPET пластику горизонтальні поверхні були гладкі та чисті. Похилі та внутрішні поверхні не гладкі та нерівні через затирання незрізаного пластику задньою поверхнею інструменту (рис. 22).



Рисунок 22. Поверхня моделі з CoPET пластику

При фрезеруванні зразків з PLA пластику відбувалося налипання стружки на різальну кромку інструменту (рис. 23), що робить процес різання неможливим.

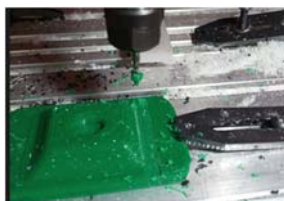


Рисунок 23. Наліплення PLA пластику на фрезу

При фрезеруванні зразків з Nylon і PBT пластику на їх поверхні залишалися волокна зі структури матеріалів, які не зрізалися (рис. 24).



Рисунок 24. Поверхня моделі з Nylon (а) та PBT пластику (б)

Результати фрезерування зразків з різних матеріалів наведені в табл. 3.

Таблиця 3 –Результати фрезерування зразків з різних пластиків

Матеріал	Можливість фрезерування	Якість поверхні (візуальна оцінка по шкалі від 1 до 5)	Примітка
ABS	так	5	Гарно обробляється
PC	так	5	Гарно обробляється
PLA	ні	-	Налипає на інструмент
CoPET	так	3	На похилих поверхнях утворюються затири задньою поверхнею фрези
PBT	так	1	Залишаються незрізані волокна пластику
Nylon	так	1	Залишаються незрізані волокна пластику

Як видно з табл. 3, найгірший результат після фрезерування було отримано для PLA-пластика. Його зовсім неможливо фрезерувати. Також не рекомендується виконувати після 3D-друку пост-обробку фрезеруванням таких пластиків, як Nylon та PBT. Фрезерування CoPET має обмеження в використанні.

Проведення досліджень по визначенню оптимальних режимів фрезерування для отримання точності розміру та якості поверхні на зразках з PC-пластику виконувалось з використанням твердосплавних кінцевих фрез (рис. 1).

Конструктивно тестова модель (рис. 3) має поверхні, точність яких неможливо отримати після 3D-друку і забезпечується фрезеруванням.

На ній є верхня плоска поверхня для торцевого фрезерування, отвір, карман з тонкою стінкою (товщина 1 мм) та зовнішня вертикальна поверхня із заокругленням та прямими кутами.

При фрезеруванні зразка прямозубою фрезою з частотою обертання шпинделя 12000 об/хв, подачею 0,02 мм/зуб, радіальною та осьовою глибиною 1 мм відбувалося налипання пластику на інструмент (рис. 25), що робить його використання неефективним

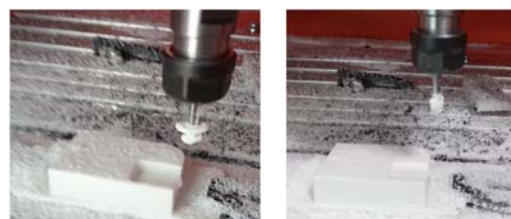


Рисунок 25. Пластик, що налип на прямозубу фрезу

При обробці спіральними фрезами з аналогічними режимами за програмою, коли врізання інструменту відбувалося прямолінійно (рис. 26а), спостерігалось підплавлення пластику. При зміні напрямку врізання на кутове (рис. 26б) цей недолік зникає.

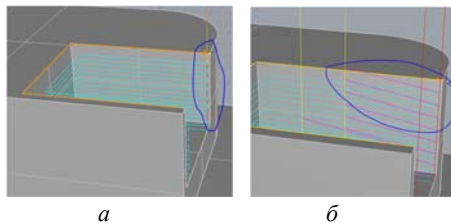


Рисунок 26. Рух інструменту при врізанні: прямолінійно (а) та під кутом (б)

При подальших дослідженнях використовувались спіральні кінцеві фрези.

Одна з проблем 3D-друку полягає в тому, що точність розміру не може бути вищою, ніж діаметр сопла. Крім того вона дуже залежить від типу поверхні та величини розміру. Так, наприклад, отвори до 3 мм при 3D-друці можуть бути менше 1 мм, а отвори більше 20 мм можуть бути з відхиленням до мінус 1 мм. Через особливість друку FDM методом отвори завжди мають відхилення в мінус від базового розміру, а лінійні розміри можуть мати відхилення як в плюс, так і в мінус.

Також друк FDM методом не може забезпечити виготовлення деталі зі стінкою, товщиною до 1 мм. Більшість програм-слайсерів роблять її товще, чим потрібно. Причина полягає у тому, що в налаштуваннях програми є параметр ширини екструзії, і він, зазвичай, ставиться трохи більше діаметра сопла, а товщина стінки повинна бути кратною цьому значенню. Для розмірів більше 5-ти діаметрів сопла, цей ефект не спричиняє великого відхилення, але розміри близькі до 1 мм друкуються дуже погано. Окрім того через недостатню адгезію між шарами матеріалу стінки утворюються не дуже міцними.

Дослідження можливостей фрезерування при забезпеченні потрібної точності моделі відбувалося на зразках (рис. 3) з пластику РС при отриманні товщини стінки 1 мм з одного боку та 18 мм з іншого. Фрезерування виконувалося трьохзубою спіральною кінцевою фрезою з частотою обертання шпинделя 22000 об/хв, подачею 0,02 мм/зуб, радіальною глибиною різання 1 мм, осьювою глибиною різання 3 мм. На п'яти зразках після фрезерування мікрометром в трьох токах вимірявся розмір 18 мм та в двох точках – розмір 1 мм. Результати вимірювання наведені в табл. 4 та 5.

За результатами проведених досліджень можна сказати, що після фрезерування відхилення від прямолінійності обробленої поверхні до 0,01 мм. Точність розміру 18 мм відповідає 10 квалітету.

Точність розміру 1 мм відповідає 13 квалітету. Але відхилення розміру в обох випадках позитивне.

Таблиця 4 – Результати вимірювання на моделі розміру 18 мм після фрезерування

Номер зразка	Номер точки заміру			Розкид значення, мм	Найбільше відхилення від номіналу, мм
	1	2	3		
1	18,06	18,05	18,05	0,01	+0,06
2	18,05	18,04	18,04	0,01	+0,05
3	18,07	18,06	18,07	0,01	+0,07
4	18,07	18,07	18,07	0	+0,07
5	18,06	18,05	18,06	0,01	+0,06

Таблиця 5 – Результати вимірювання на моделі товщини стінки 1мм після фрезерування

Номер зразка	Номер точки заміру		Розкид значення, мм	Найбільше відхилення від номіналу, мм
	1	2		
1	1,16	1,17	0,01	+0,17
2	1,16	1,16	0	+0,16
3	1,15	1,15	0	+0,15
4	1,15	1,16	0,01	+0,16
5	1,16	1,16	0	+0,16

Для визначення впливу режимів різання на шорсткість профрезерованої поверхні використовувався зразок (рис. 4), що складається з п'яти ділянок розміром 10×15 мм. Вихідна шорсткість поверхні РС- пластику після 3D-друку становить Ra 17,6 мкм. Поверхні оброблених зразків досліджувались після фрезерування за двох умов:

- постійної частоти обертання шпинделя (15000 об/хв) і змінної подачі;

- постійної подачі (1800 мм/хв та 2700 мм/хв) та змінної частоти обертання шпинделя. Глибини різання були постійними: радіальна глибина 1 мм, осьова глибина 0,3 мм. Результати вимірювання шорсткості поверхонь після фрезерування однозубою та тризубою фрезою наведені в табл. 6.

**Таблиця 6** – Результати вимірювання шорсткості оброблених поверхонь

Номер зразка	Номер ділянки на зразку	S, мм/хв	n, об/хв	Ra, мкм
Однозуба фреза				
1	1	480	15000	2,47
	2	840	15000	2,29
	3	1200	15000	2,10
	4	1800	15000	1,82
	5	2700	15000	2,03
2	1	1800	18000	1,73
	2	1800	19000	1,63
	3	1800	20000	1,47
	4	1800	22000	1,21
	5	1800	24000	1,32
Трьохзуба фреза				
3	1	480	15000	1,08
	2	840	15000	1,02
	3	1200	15000	0,98
	4	1800	15000	0,87
	5	2700	15000	0,94
4	1	2700	18000	0,86
	2	2700	19000	0,84
	3	2700	20000	0,79
	4	2700	22000	0,64
	5	2700	24000	0,75

Дані табл. 6 показують, що шорсткість поверхні після 3D-друку, обробленої однозубою фрезою, зменшується на 85–93 %. Після фрезерування надрукованої моделі трьохзубою фрезою шорсткість поверхні при фрезеруванні однозубою фрезою Ra 1,21 мкм отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 1800 мм/хв. Найменша шорсткість поверхні при фрезеруванні трьохзубою фрезою Ra 0,64 мкм отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 2700 мм/хв.

### Висновки

За результатами проведених досліджень пост-обробки фрезеруванням зразків, отриманих 3D-друком FDM методом, можна зробити такі висновки.

1. Матеріали, які використовуються для 3D-друку, мають різну оброблюваність при фрезеруванні. Так, PLA пластик має відносно невисоку температуру плавлення і при цьому високу в'язкість, що спричиняє налипання матеріалу на інструмент і унеможливає обробку. При фрезеруванні Nylon та PBT пластиків на обробленій поверхні залишаються незрізані волокна. Фрезерування горизонтальних поверхонь зразків з CoPET(PETG) пластику дає рівну гладку поверхню, але при обробці похилих поверхонь утворюється похибка форми. Тому фрезерування цього матеріалу може мати обмежений характер. Кращі результати якості поверхні були отримані після фрезерування PC та ABS пластиків. Саме для цих матеріалів найбільш доцільно виконувати пост-обробку фрезеруванням.

2. При обробці поверхонь різними фрезами, було встановлено, що інструменти з прямими лезами не рекомендовано використовувати по пластику через налипання стружки. Фрези одно - та - трьохзубі зі спіральною канавкою показали добрі результати при обробці, але рекомендується при фрезеруванні використовувати діагональне або радіальне врізання в матеріал.

3. Найменша шорсткість поверхні при фрезеруванні зразків з PC-пластику однозубою фрезою отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 1800 мм/хв. При фрезеруванні трьохзубою фрезою менша шорсткість отримана при частоті обертання шпинделя 22000 об/хв та подачі 2700 мм/хв.

4. При пост-обробці пластиків після 3D-друку фрезеруванням можливо досягти точності розмірів до 10 квалітету.

5. Розглянуту технологію пост-обробки моделей, створених 3D-друком, можна рекомендувати для виготовлення точних макетів, майстер-моделей для лиття, форм для формування деталей вакуумом і як закінчену пластикову деталь для одиничного та дрібносерійного виробництва.

### Список літератури

1. Сучасний стан та перспективи розвитку адитивних технологій / О. В. Муравйов, Ю. М. Нижник, В. Ф. Петрик и др. // Вчені записки таврійського національного університету імені В. І. Вернадського; серія : Технічні науки. – 2021. – Т. 32. – № 5. – С. 114–119.
2. Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology [Text] / Bryll, Katarzyna, et al. // MATEC Web of Conferences. EDP Sciences. – 2018. – Vol. 237.
3. 3D друк в умовах біомедичного використання [Електронний ресурс] : конспект лекцій з дисципліни «3D друк в умовах біомедичного використання» для студентів спеціальності 163 «Біомедична інженерія» денної та заочної форм навчання / уклад. Б. В. Єфременко. – Маріуполь : ДВНЗ «ПДТУ», 2019. – 56 с. / Режим доступу: <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf>
4. Williams, L. Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. / L. Williams // McGraw-Hill Education, 2016. – 459 p.
5. Turner, B. N. A review of melt extrusion additive manufacturing processes / B. N. Turner, R. Strong, A. Scott // Gold Rapid Prototyping Journal. – 2014. – Vol. 0(3). – P. 192–204.
6. Bourella D. A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead [Electronic resource] / Bourella D., J. Beaman, M.C. Leub, D. Rossen // RosencRapidTech US-Turkey Workshop on Rapid Technologies, Istanbul. – 2009. Available at:

[https://www.researchgate.net/publication/304497852\\_A\\_brief\\_history\\_of\\_additive\\_manufacturing\\_and\\_the\\_2009\\_roadmap\\_for\\_additive\\_manufacturing\\_Looking\\_back\\_and\\_looking\\_ahead](https://www.researchgate.net/publication/304497852_A_brief_history_of_additive_manufacturing_and_the_2009_roadmap_for_additive_manufacturing_Looking_back_and_looking_ahead)

7. Mohamed, O. Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects [Text] / O. A. Mohamed, S. H. Masood, J. L. Bhowmik // *Advances in Manufacturing*. – 2015. – Vol. 3(1). – P. 42–53.

8. A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts / Z. Liu, Y. Wang, B. Wu, C. Cui, Y. Guo, C. Yan // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. – 2019. – Vol. 102(9). – P. 2877–2889.

9. Taufik M. Jain P. Part surface quality improvement studies in fused deposition modelling process: a review [Electronic resource] / M. Taufik, P. Jain // *Australian Journal of Mechanical Engineering*. – 2020. – P. 527–551. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/metrics/10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top>. doi: 10.1080/14484846.2020.1723342

10. Chohan J. S. Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications / J. S. Chohan, R. Singh // *Rapid Prototyping Journal*. – 2017. – Vol. 3. – P. 495–513.

11. Boschetto, A. Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining / A. Boschetto, L. Bottini, F. Veniali // *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*. – 2016. – Vol. 41. – P. 92–101.

12. Diegel, O. Post-processing. In *A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing* / Diegel O., Nordin A., Motte D., Springer: Singapore, 2019. – P. 181–207.

13. Комісаров О. О. Матеріали для FDM-друку в Україні [Електронний ресурс] / О. О. Комісаров, Г. В. Пухальська // Тижень науки-2023. Тези доповідей науково-практичної конференції, Запоріжжя, 24–28 квітня 2023 р., НУЗП. – Запоріжжя, 2023. – С. 43–45. 1 електрон. опт. диск (DVD-ROM).- Електронне видання комбінованого використання на DVD-ROM.

14. Продукція Monofilament [Електронний ресурс] / Режим доступу:

<https://monofilament.com.ua/ua/products/>

15. ABS+ пластик для 3D принтера [Електронний ресурс] / Режим доступу:

<https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>

16. Компанія «UKR-TOOLS» [Електронний ресурс] / Режим доступу : <https://ukr-tools.com/>

Одержано 13.02.2024

## POST-PROCESSING OF DETAILS BY MILLING ON A CNC MACHINE AFTER 3D PRINTING BY THE SOLUTION METHOD

- Komisarov O. Post-graduate student of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [Al.komissarov@meta.ua](mailto:Al.komissarov@meta.ua), ORCID: 0009-0003-6285-3674
- Pukhalska H. PhD, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Machinery Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [pukhalska66@gmail.com](mailto:pukhalska66@gmail.com), ORCID: 0000-0001-8118-4179
- Dyadya S. PhD, Associate Professor, Head of the Department of Mechanical Engineering Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [djadya@zp.edu.ua](mailto:djadja@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0002-7457-7772

**Purpose.** Conduct research on the possibility of milling samples from various polymer materials after their production by 3D-printing Fused Deposition Modeling (FDM), determine the optimal milling modes that improve surface quality and dimensional accuracy.

**Research methods.** The roughness and accuracy of the samples of polymer materials, which were manufactured by the FDM method on a RepSystem V2.1 3D printer with the PrusaSlicer G-code creation program and processed with different modes on a Profi+Wood CNC milling machine, were experimentally determined. The accuracy of the dimensions was determined using a mechanical micrometer MK 25 GOST 6507-90 with an accuracy of 0,01 mm. A MikroView 500x digital microscope was used to examine the surface of the treated samples.

**Results.** The dimensional accuracy and surface roughness of printed samples made of polymer materials after processing with cutters of various designs with different cutting modes were determined.

**Scientific novelty.** The possibility of using mechanical processing by the method of milling of samples from various polymer materials used for 3D-printing was investigated.

**Practical value.** An analysis of milling cutters for processing was carried out and the possibility of their use for parts printed by the FDM method was tested. Recommended milling modes for materials used for 3D-printing, which

*significantly improve the quality of the surface: for a single-tooth cutter, the number of revolutions is 22,000 rpm and the feed is 1800 mm/min; for a three-tooth milling cutter: the number of revolutions is 22,000 rpm and the feed is 2,700 mm/min. When processing in these modes, the roughness is reduced by 95 %. It has been established that during the post-processing of plastics after 3D-printing by milling, it is possible to achieve dimensional accuracy of up to 10 quality. Identified, polymer materials, products from which after FDM printing are recommended to be finished by milling for the production of accurate mock-ups, master models for casting, forms for forming parts by vacuum and as a finished plastic part for single and small-scale production.*

**Key words:** Fused Deposition Modeling, 3D-printer, post-processing, milling, plastic, roughness, accuracy.

## References

1. Muravyov, O. V., Nyzhnyk, Yu. M., Petryk, V. F., Protasov, A.H., Seryi K.M. (2021) Suchasnij stan ta perspektivi rozvitku aditivnih tehnologij [Current state and prospects for the development of additive technologies]. Scholarly notes of V.I. Tavrii National University. Vernadskyi; series: Technical sciences, 32 (5), 114–119.
2. Bryll, K, et al. (2018). Polymer composite manufacturing by FDM 3D printing technology. MATEC Web of Conferences. EDP Sciences, Vol. 237.
3. Yefremenko, B. V. ed. (2019). 3D druk v umovah biomedichnogo vikoristannya: konspekt lekcij z disciplini “3D druk v umovah biomedichnogo vikoristannya” dlya studentiv specialnosti 163 “Biomedichna inzheneriya” dennoyi ta zaochnoyi form navchannya [3D printing in conditions of biomedical use: synopsis of lectures on the discipline “3D printing in conditions of biomedical use” for students of specialty 163 “Biomedical engineering” of full-time and part-time forms of education]. Mariupol: DVNZ “PDTU”, 56. Available at : <https://events.pstu.edu/bioart/wp-content/uploads/sites/3/2020/04/3d-printing-for-biomedical-applications-lec.pdf>
4. Williams, L. (2016). Additive Manufacturing or 3D Scanning and Printing, Manufacturing Engineering Handbook, 2nd ed. McGraw-Hill Education, 459.
5. Turner, B. N., Strong, R., Scott, A. (2014). A review of melt extrusion additive manufacturing processes. Gold Rapid Prototyping Journal, 10(3), 192–204.
6. Bourella D., Beaman J., Leub, M.C., Rossen, D. (2009). A brief history of additive manufacturing and the 2009 roadmap for additive manufacturing: looking back and looking ahead. RosencRapidTech US-Turkey. Workshop on Rapid Technologies, Istanbul. Available at: [https://www.researchgate.net/publication/304497852\\_A\\_brief\\_history\\_of\\_additive\\_manufacturing\\_and\\_the\\_2009\\_roadmap\\_for\\_additive\\_manufacturing\\_Looking\\_back\\_and\\_looking\\_ahead](https://www.researchgate.net/publication/304497852_A_brief_history_of_additive_manufacturing_and_the_2009_roadmap_for_additive_manufacturing_Looking_back_and_looking_ahead)
7. Mohamed, O. A., Masood, S. H., Bhowmik, J. L. (2015). Advances in Manufacturing Optimization of fused deposition modeling process parameters: a review of current research and future prospects, 3(1), 42–53.
8. Liu, Z., Wang, Y., Wu, B., Cui, C., Guo, Y. and Yan, C., (2019). A critical review of fused deposition modeling 3D printing technology in manufacturing polylactic acid parts. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 102(9), 2877–2889.
9. Mohammad Taufik & Prashant K. Jain (2020). Part surface quality improvement studies in fused deposition modelling process: a review, Australian Journal of Mechanical Engineering, 527–551, doi: 10.1080/14484846.2020.1723342. Available at: <https://www.tandfonline.com/doi/metrics/10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top>. doi: 10.1080/14484846.2020.1723342?scroll=top
10. Chohan, J. S. and Singh, R., (2017). Pre and post processing techniques to improve surface characteristics of FDM parts: a state of art review and future applications. Rapid Prototyping Journal, 3, 495–513.
11. Boschetto, A., Bottini, L. and Veniali, F., (2016). Finishing of Fused Deposition Modeling parts by CNC machining. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 41, 92–101.
12. Diegel, O., Nordin A., Motte D. (2019). Post-processing. In A Practical Guide to Design for Additive Manufacturing [Text., Springer: Singapore, 181–207.
13. Komisarov, O. O., Puhalska, G. V. (2023). Materiali dlya FDM-druku v Ukrayini. [Materials for FDM printing in Ukraine]. Science Week-2023. Abstracts of reports of the scientific and practical conference, April 24–28, Zaporizhzhia : NUZP, 43–45, 1 electron. wholesale disc (DVD-ROM). Electronic edition of combined use on DVD-ROM.
14. Production Monofilament. Available at : <https://monofilament.com.ua/ua/products/>
15. ABS+ plastic for 3D printer. Available at : <https://shop.plexiwire.com.ua/abs-plus-filament/>
16. Company “UKR-TOOLS”. Available at : <https://ukr-tools.com/>



УДК 546.161 + 661.482

- Шевченко В. Г. канд. техн. наук, доцент, завідувач кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: shevawk@gmail.com, ORCID: 0000-0001-9037-6367
- Баженов Є. В. канд. техн. наук, лаборант кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: bazeugen@gmail.com, ORCID: 0000-0002-2889-788X
- Попов С. М. канд. техн. наук, професор кафедри інтегрованих технологій зварювання та моделювання конструкцій Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: suporovzntu@ukr.net, ORCID: 0000-0003-0977-9500
- Шалева Н. В. асистент кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail*: shaleva1711@ukr.net, ORCID: 0000-0002-6571-0359

## ЛАБОРАТОРНІ ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОЦЕСУ РОЗКРИТТЯ ІЛЬМЕНІТОВОГО КОНЦЕНТРАТУ ЗА ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОЮ ТЕХНОЛОГІЄЮ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ФТОРИДУ АМОНІЮ

**Мета роботи.** Полягає в дослідженні основних технологічних можливостей інноваційного напрямку отримання з ільменітового концентрату матеріалів, що містять титан, шляхом гідрофторування.

**Методи дослідження.** Лабораторні дослідження процесу розкриття концентрату ільменіту шляхом гідрофторування в водному розчині при різних концентраціях і температурних режимах, поділ отриманих продуктів шляхом вилуговування і фільтрації, визначення складу продуктів методами хімічного аналізу.

**Отримані результати.** У дослідженнях використовувався сировинний компонент – концентрат ільменіту Малишевського родовища (Вольногорський ГМК, Україна). Як реагент використано твердофазний фторвмісний комплексоутворювач – фторид амонію ( $NH_4F$ ). Як робочий варіант організації процесу обрана схема розтину ільменітового концентрату в розчині при температурах від 170 °C до 200 °C. Побічні продукти реакції у вигляді парогазової суміші (ПГС), що не містить фтор-компоненти, евакуювали з реактора. Фтор залишається у продуктах проведеної реакції. У реакторі утворюється водяна суспензія розчинних комплексних солей титану і кремнію, фториду амонію, що не прореагував, та комплексних солей заліза, що не розчиняються. Утворена суспензія використовується у подальших операціях поділу компонентів. Дослідження, що проведені при температурах не вище 200 °C, показали ефективність процесу розкриття ільменітового концентрату з отриманням фторметалатів амонію, що поділяються у наступних гідрометалургійних операціях.

**Наукова новизна.** Встановлено залежності параметрів процесу від співвідношення реагентів, вплив заповнення реактора і температури процесу на характер протікання та швидкість реакції, на повноту вилучення титану.

**Практична цінність.** Отримані показники чистоти продуктів реакції підтверджують перспективи дослідженої технології для оптимізації ряду виробничих схем отримання матеріалів, що містять титан, і ефективного використання попутних оксидів – кремнію і заліза.

**Ключові слова:** концентрат, ільменіт, титан, гідрофторування, фтортитанат амонію, фтороферрат амонію, діоксид титану, оксид заліза, оксид кремнію.

### Вступ

Попит на металевий титан і продукти, що містять титан, актуалізовано необхідністю задоволення запитів галузей промисловості, що забезпечують потреби сучасного суспільства. Основа інтересу до титану – унікальне поєднання його фізико-хімічних властивостей та значних сировинних ресурсів, реально доступних до використання.

Розвиток титанової галузі – один з найбільш перспективних напрямків розвитку економіки України. Зазвичай, це питання розглядається стосовно металевого титану – що, наприклад, цілком зрозуміло для запорізького промислового регіону [1]. Натомість, розвиток виробництва іншого продукту галузі – діоксиду

титану є не менш важливим з погляду перспектив економіки [2]. З погляду перспектив розвитку, цей напрямок є визначальним чинником принципових змін структури титанової галузі. Інноваційні технології отримання діоксиду титану задають нові технічні, економічні та екологічні критерії – як для безпосередньо продуктів діоксиду титану, так і для виробництва металевого титану. Напрямки розвитку базуються на отриманні високочистого нано-дисперсного діоксиду титану [3]. Ефект напрямку багаторазово підсилюється потребою знаходження рішень по технологічних процесах керованого отримання порошків діоксиду титану, його поліморфних модифікацій та прямого отримання з порошків діоксиду титану порошків металевого титану [4].

Наявність промислового досвіду та мінеральних ресурсів, які має Україна, створює значний потенціал розвитку країни. Причини, що призвели до проблем у галузі, багаторазово описані і в першу чергу мають суб'єктивний характер [1, 2]. Об'єктивна сторона проблем – невідповідність використовуваних технологій сучасним критеріям. Як альтернатива існуючим технологіям запропонована до розгляду схема розкриття концентратів, що містять діоксид титану, фторидом амонію. Екологічна безпека технології забезпечується рішеннями, що виключають циркуляцію та накопичення агресивних (фтористий водень, аміак) речовин у газовій фазі.

### Аналіз досліджень і публікацій

Мінерал ільменіт класифікується як оксидний мінерал, основні складові хімічні елементи якого – титан і залізо, оксидні форми яких об'єднані в кристали. В результаті збагачення отримують ільменітовий концентрат – вихідний сировинний матеріал у технологіях отримання продуктів, що містять титан, в тому числі діоксиду титану і металевому титану (титанова губка, титанові зливки, титановий порошок). Залізо в технологіях вилучення титану сприймається як попутний метал.

На даний час широко розповсюджений, що став традиційним спосіб металотермічного поділу компонентів концентрату ільменіту. Спосіб є складовою частиною хлоридної технології. Недоліки хлоридної технології полягають у її багатостадійності та дискретності процесів (термічне відновлення титану магнієм з тетрахлориду титану, сепарація титанової губки). Для технології характерні висока енергоємність та низький коефіцієнт використання реагентів (за хлором – не вище 70 %). Значний недолік технології – її екологічна проблематичність (отримання 1 тони металу призводить до утворення до 100 м<sup>3</sup> хлоридних стічних вод і поповнення відвалів електролітами, що містять хлор, відпрацьованими сольовими шлаками високої кислотності pH < 3).

Незважаючи на розуміння її недоліків, хлоридна технологія продовжує домінувати у світовій практиці навіть за наявності теж широко поширених альтернативних схем (сірчанокислотної, солянокислотної, та ін.) – наприклад, [5–6].

Хлоридна та паралельно існуючі на сьогоднішній день технології визначають сучасну структуру виробництва титанової продукції. У рамках сформованої структури, що існує багато десятиліть, процес розвитку техніко-економічних та екологічних показників виробництва набув екстенсивного характеру. Зміна структури, що склалася, є процес високовитратний і розвиток виробництв відбувався шляхом оптимізуючих коригувань технологій та обладнання.

Розвиток системи критеріїв, що використовуються для оцінки процесу отримання титану, визначає актуальність зміни напрямків розвитку, задаючи нові вимоги до технології з боку економії ресурсів та впливу на екологію.

Як перспективну, з урахуванням зазначених вище критеріїв, запропоновано до розгляду технологічну

схему фторидного способу переробки руд, що містять титан.

Початок робіт з фторидних технологій відноситься до другої половини ХХ століття [7–10]. Висока активність фтору та його сполук стала об'єктивною основою їх застосування. Технологічний досвід роботи з фторидами урану (матеріал для реакторів), що накопичився на той час, дозволив розпочати практичну реалізацію ефективних схем. Адаптація відпрацьованих технологій для розтину титанових концентратів [10–12] показує їх відмінні переваги – високу продуктивність та селективність, екологічність, можливість ефективної регенерації реагентів з наступним реверсом їх у початковій стадії процесу.

Отримані у процесі розвитку фторидної технології варіанти її практичної реалізації [11–13] дозволяють розглядати цей напрямок як перспективне вдосконалення процесів отримання титану та продуктів, що містять титан, в рамках сучасних критеріїв оцінки виробництва.

У межах існуючих масштабів виробництва обмеження щодо забезпечення процесів реагентом практично відсутні. Світові запаси основного джерела промислового одержання фтору – мінералу флюорит (плавиковий шпат), у 2020 році оцінені у 320 мільйонів тон, що забезпечує потреби світового споживання як мінімум на найближчі 200–250 років [14].

Аналіз інформації щодо застосування фторидного способу розтину концентрату ільменіту вказує на технологічні переваги використання фториду амонію (NH<sub>4</sub>F) в якості реагенту. Переваги фториду амонію перед газоподібним фтористим воднем (HF) забезпечуються вищою реакційною активністю. Варіанти реалізації процесів фторування при невисоких температурах – до 200 °С, виключають утворення газоподібного фтористого водню, забезпечують додаткові переваги технологічного та екологічного характеру.

Отримані в результаті реакцій фторування комплексні сполуки (фторометалати і оксофторометалати амонію) мають фізико-хімічні характеристики, що дозволяють ефективно виконати їх розподіл. Достатньо доступні технологічні прийоми перетворення названих продуктів в оксиди (розглядаємо TiO<sub>2</sub>, Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SiO<sub>2</sub>) з високою точністю поділу компонентів.

Розглянуті технологічні рішення значною мірою універсальні і перспективні з огляду на отримання високоякісних кінцевих продуктів. Мова йде насамперед про пряме отримання діоксиду титану пігментної якості [12] та інших його поліморфних форм [13]. Значний потенціал додає також можливість прямого отримання високочистого діоксиду кремнію [11], відкриваючи перспективи роботи [15] з доведення його якісних показників до характеристик високодисперсного продукту AEROSIL AG (популярний продукт фірми Evonik Degussa AG). Також, отримання високодисперсного порошку діоксиду кремнію високої чистоти надає перспективу розглядати його як вихідний матеріал у виробництві полікристалічного кремнію [16–17].

Накопичений світовий досвід – як позитивний, так і досвід негативних побічних ефектів – висуває нові технологічні вимоги. Назрілі вимоги формування сучасних критеріїв оцінки технологій титанової промисловості. Сучасні критерії визначають завдання нових розробок, заснованих на інноваційних рішеннях.

### Мета роботи

Метою роботи є отримання практичних результатів розкриття ільменітового концентрату із застосуванням фториду амонію для оцінювання основних технологічних можливостей інноваційного напрямку отримання з ільменітового концентрату матеріалів, що містять титан, та матеріалів з супутніх елементів (розглядаються залізо та кремній).

### Матеріал і методика досліджень

Схема представленого до розгляду дослідження: реалізація процесу розкриття ільменітового концентрату в лабораторних умовах, визначення впливу основних параметрів процесу і реагентів, що використовуються, на властивості одержуваних продуктів – фтораммонійних комплексних солей титану, заліза, кремнію.

У дослідженнях використовувався сировинний компонент (рис. 1а) – концентрат ільменіту Малишевського родовища (Вольногорський ГМК, Україна). Склад концентрату регламентований ТУ У 14-10-005-98. Відповідно до сертифікату на партію концентрату, використаного в експериментах, вміст основних компонентів становив 65,2 %  $\text{TiO}_2$ , 1,1 %  $\text{SiO}_2$ . Медіанний розмір кристалів 70 мкм.

У лабораторних дослідженнях як реагент використано твердофазний фторвмісний комплексоутворювач – фторид амонію ( $\text{NH}_4\text{F}$ ). На рис. 1б–г відображено перетворення водного розчину фториду амонію при нагріванні.

Як робочий варіант організації процесу обрана схема розкриття ільменітового концентрату в розчині при температурах від 170 °C до 200 °C.

Побічні продукти реакції у вигляді парогазової суміші (ПГС), що не містить фтор-компоненти, евакуюються з реактора, уловлюються, конденсуються і розчиняються у воді, та регенеруються з можливістю подальшого повторного використання. Фтор залишається у продуктах проведеної реакції.

У реакторі утворюється водна суспензія на основі водного розчину розчинних комплексних солей титану і кремнію, комплексоутворювача, який не прореагував, і твердих частинок комплексних солей заліза, що погано розчиняються. Утворена суспензія використовується у подальших процесах поділу компонентів.

У лабораторних умовах дослідження розкриття ільменітового концентрату фторидом амонію виконували в реакторі циліндричної форми ємністю 2000 мл. Реактор виконаний з нержавіючої сталі (12X18H10T), оснащений системою вимірювання та регулювання температури. Можливість інтенсифікації процесів розчинення реалізована шляхом перемішу-

вання розчину в реакторі. Система перемішування розчину використовується також для управління процесом розкриття ільменітового концентрату. Збільшення інтенсивності перемішування призводить до збільшення швидкості реакцій за умови запобігання турбулентності.

Лабораторна установка для виконання реакції наведена на рис. 1: при використанні у відкритому виконанні реактора (рис. 1д) та у закритому виконанні реактора з уловлюванням та конденсацією газоподібних продуктів реакції (рис. 1е).

Дослідження, проведені за температур не вище 200°C, показали ефективність процесу. При цьому виявлялися ефекти, що ускладнюють ведення процесу:

- випаровування розчину, що призводить до порушення вихідного співвідношення концентрацій реагентів;
- інтенсивне утворення піни, що призводить до аварійних викидів розчину з реактора;
- скорочення обсягу реакційного простору як наслідок випаровування розчину та утворення газоподібних продуктів, що видаляються з реактора;
- утворення скрапу, подібного до каменю і що блокує перемішування робочого розчину.

### Результати досліджень

Отримані продукти розкриття концентрату ільменіту у вигляді розчину вилучали з реактора і накопичували в робочій ємності (рис. 1ж).

Поділ отриманих комплексних солей та переведення в оксиди виконувався послідовними процедурами вилуговування та фільтрації розчинів. Вигляд продуктів, отриманих в результаті виконаного процесу, наведено на рис. 2.

Вміст цільових елементів в отриманих продуктах на даному етапі досліджень наведено в таблиці 1. Показані результати – вибірка даних хімічного аналізу продуктів, отриманих в серії варіантів схем поділу та очищення отриманих продуктів.

### Висновки

Розтин ільменітового концентрату з подальшим поділом сполук титану, заліза і кремнію дозволяє отримувати затребувані промисловістю продукти за енергоєфективною низькотемпературною технологією.

У технології виконується повна утилізація побічних продуктів реакції з регенерацією їх у вихідний реагент, що витрачається (фтористий амоній) і речовини, що використовуються (аміачна вода, дистильована вода). Дані характеристики визначають перспективні оцінки економічної привабливості технології.

Порошки діоксиду титану, що отримані, можуть бути використані в хлоридній технології, замінивши титановий шлак – як більш дешевий продукт. Додаткова перевага використання порошків – більш високий вміст титану. Ступінь чистоти та можливість управління поліморфною формою одержуваних порошків діоксиду титану є достатнім для обґрунтованості подальшої роботи з доведення їх до якості титанового піг-

менту та нано-дисперсних порошоків-добавок для фотокаталітичних бетонів.

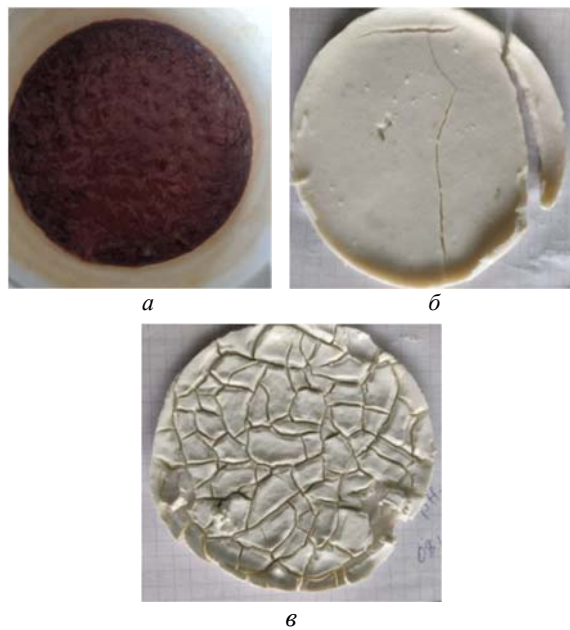
Є перспективним рішенням завдання по отриманню високоякісних пігментів на основі оксиду заліза.

Розглянуті технологічні рішення значною мірою універсальні. Зокрема, що до виділення діоксиду кремнію з можливістю прямого отримання високочистого

високодисперсного діоксиду кремнію з доведення його до характеристик продукту AEROSIL AG (продукт фірми Evonik Degussa AG) та високодисперсного порошку аморфного діоксиду кремнію високої чистоти як вихідного матеріалу у виробництві полікристалічного кремнію.



**Рисунок 1.** Візуалізація процесу розкриття ільменіту – вихідні матеріали, реактор та продукт: концентрат ільменіту (а); фториду амонію (початок нагрівання) (б); фториду амонію (кипіння) (в); фториду амонію (розкладання) (г); ведення реакції у відкритому реакторі (д); ведення реакції у закритому реакторі (е); суспензія (продукт реакції в накопичувальній ємності) (ж)



**Рисунок 2.** Зовнішній вигляд одержаних зразків компонентів продукту розкриття ільменітового концентрату: компонент, що містить залізо (а); компонент, що містить титан (б); компонент, що містить кремній (в)

**Таблиця 1** – Результати хімічного аналізу одержаних продуктів (вибірка з масиву отриманих даних виконаних експериментів – як приклад)

Елемент	Зразок 1 (зміст % мас.)	Зразок 2 (зміст % мас.)
Кисень	42	40,2
Фтор	0,11	0,10
Алюміній	0,35	0,20
Кремній	8,78	0,79
Титан	47,15	58,12
Залізо	0,17	0,15
Ніобій	0,08	0,1
Продукт (формульне визначення):		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,65	0,39
FeF <sub>2</sub>	0,28	0,256
SiO <sub>2</sub>	18,8	1,7
TiO <sub>2</sub>	78,66	96,96

#### Список літератури

1. Перспективи титанової отрасли України [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://biz.liga.net/all/all/article/trudno-nayti-zamenu-rochemu-rossii-nujen-ukrainskiy-titan> (дата звернення 25.12.2023).
2. Титан України [Електронний ресурс] / Режим доступу: <http://geoproject.com.ua/publ011.html> 1/4 (дата звернення 22.12.2023).

3. Виробництво діоксиду титану – перспективний шлях розвитку, про який усі забули [Електронний ресурс] / Режим доступу: <https://zn.ua/ukr/promyshliennost/virobnitstvo-dioksidu-titanu-perspektivnij-shljakh-rozvitku-pro-jakij-usi-zabuli.html> (дата звернення 25.12.2023).

4. Brodskyu Andriy, Troshchy; Viktor, Gonchar Andrii (2022). Method for producing alloy powders based on titanium metal. US20220062993 A1; заявл. 28.08.2020; опубл. 03.03.2022.

5. CHEN Guo, CHEN Jin (2018) Method for preparing rutile from acid-soluble titanium slag. US20180030575 A1 ; заявл. 17.09.2015 ; опубл. 01.02.2018.

6. Спосіб отримання пігментного діоксиду титану UA116737 / Дубенко А.В., Ніколенко М.В., Суцницький О. Д. Подання заявки : 19.07.2016. Дата публікації 12.06.2017.

7. Рабинович Е. Химия урана / Е. Рабинович. – М. : Издательство иностранной литературы, 1994. – С. 192–199.

8. Karlson O. N., Schmidt F. A., Wilhelm H. A. (1997). Journal of The Electrochemical Society, 379–387.

9. Раков Е. Г. Фториды в технологии редких металлов / Е. Г. Раков, Г. А. Ягодин – М. : Издательство московского химико-технологического ин-та им. Д. И. Менделеева, 1990. – 60 с.

10. Раков, Е.Г., Мельниченко О.И. Особенности и реакции фторидов аммония. Успехи химии / Е. Г. Раков, О. И. Мельниченко – Вып. 9, 1984. – С. 1463–1492.

11. AU5384799A (2000) Silicon-containing titanium dioxide, method for preparing the same and catalytic compositions thereof. Rotem Amfert Negev Ltd; заявл. 23.08.1999 ; опубл. 19.03.2000.

12. GB 1357499 Production of titanium tetrafluoride british titan ltd / GB19720029944. 19720627.

13. US7670407B2. (2010) Method of producing titanium. Gerard Pretorius ; заявл. 14.12.200 ; опубл. 02.03.2010.

14. Шварцман Л. Я. Одержання колоїдного діоксиду кремнію (SiO<sub>2</sub>) з кварцу / Л. Я. Шварцман, С. В. Баженов // Проблеми науково-технічної діяльності. – 2023. – № 1(25). – С. 37–43.

15. Баженов С. В. Кварцовий пісок – доступне недороге сировина для технологій електроніки та фотовольтаніки / С.В. Баженов, Т. В. Критська, М. К. Сукач // Underwater technologies: industrial and Civil Engineering. – 2022. – Iss. 12. – P. 63–67.

16. Баженов С. В. Кремній з піску – перспективна технологія отримання кремнію напівпровідникової якості / С. В. Баженов, Т. В. Критська, М. К. Сукач // Transfer of Innovative Technologies. – 2022. – Vol. 5, №1. P. 29–44.

Одержано 15.02.2024

## LABORATORY STUDIES OF THE PROCESS OF OPENING ILMENITE CONCENTRATE USING ENERGY-EFFICIENT TECHNOLOGY USING AMMONIUM FLUORIDE

- Shevchenko V. Candidate of Technical Sciences, Head of the Department of Mechanics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: shevawk@gmail.com*, ORCID: 0000-0001-9037-6367
- Bazhenov E. Candidate of Technical Sciences, laboratory technician of the Department of Mechanics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: bazeugen@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-2889-788X
- Popov S. Candidate of Technical Sciences, professor of the Department "Integrated technologies of welding and modeling of structures", National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: supopovzntu@ukr.net*, ORCID: 0000-0003-0977-9500
- Shaleva N. Assistant lecturer of the Department of Mechanics, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: shaleva1711@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-6571-0359

**Purpose.** It consists in evaluating the main technological possibilities of the innovative direction of obtaining titanium-containing materials from ilmenite concentrate by hydrofluorination.

**Research methods.** Laboratory experiments on the opening of ilmenite concentrate by hydrofluorination in an aqueous solution at different concentrations and temperature regimes, separation of the obtained products by leaching and filtration, evaluation of the composition of products by chemical analysis methods.

**Obtained results.** The research used a raw material component – ilmenite concentrate from the Malyshev deposit (Volnogorsk HMC, Ukraine). A solid-phase fluorine-containing complexing agent – ammonium fluoride (NH<sub>4</sub>F) was used as a reagent. As a working version of the organization of the process, the scheme of dissection of ilmenite concentrate in solution at temperatures from 170 °C to 200 °C was chosen. By-products of the reaction in the form of a steam-gas mixture (VGM), which does not contain fluorine components, were evacuated from the reactor. Fluorine remains in the products of the reaction. In the reactor, an aqueous suspension of soluble complex salts of titanium and silicon, unreacted ammonium fluoride and poorly soluble iron complex salts are formed. The resulting suspension is used in further procedures for the separation of components. Studies conducted at temperatures no higher than 200 °C showed the effectiveness of the process of opening ilmenite concentrate to obtain ammonium fluorometalates, which are divided into the following hydrometallurgical procedures.

**Scientific novelty.** The dependencies of the process parameters were determined - the ratio of reagents, the degree of filling of the reactor on the process, the influence of the process temperature on the reaction rate and the completeness of titanium extraction.

**Practical value.** The obtained data on the degree of purity of the reaction products confirm the prospects of the researched technology for the optimization of a number of production schemes for obtaining materials containing titanium, and the effective use of accompanying oxides – silicon and iron.

**Key words:** concentrate, ilmenite, titanium, hydrofluorination, ammonium fluorotitanate, ammonium fluoroferrate, titanium dioxide, iron oxide, silicon oxide.

## References

1. Prospects of the titanium industry of Ukraine (2023). <https://biz.liga.net/all/all/article/trudno-nayti-zamenu-pochemu-rossii-nujen-ukrainskiy-titan>.
2. Titan of Ukraine (2023). <http://geoproject.com.ua/publ011.html> 1/4.
3. The production of titanium dioxide is a promising development path that everyone has forgotten about (2023). <https://zn.ua/ukr/promyshliennost/virobnitstvo-dioksidu-titanu-perspektivnij-shljakh-rozvitku-pro-jakij-usi-zabuli.html>.
4. Brodskyy Andriy, Troshchy; Viktor, Gonchar Andrii (2022) Method for producing alloy powders based on titanium metal. US20220062993 A1; declared 28.08.2020; published 03.03.2022.
5. CHEN Guo, CHEN Jin (2018). Method for preparing rutile from acid-soluble titanium slag. US20180030575 A1; declared 17.09.2015; published 01.02.2018.
6. Dubenko A. V., Nikolenko M. V., Sushchynskiy O. D. (2017). The method of obtaining pigment titanium dioxide UA116737; declared 19.07.2016; published 12.06.2017.
7. Rabinovych, E. (1994). The chemistry of uranium. Publishing house of foreign literature, 192–199.
8. Karlson O. N., Schmidt F. A., Wilhelm H. A. (1997) Journal of The Electrochemical Society, 379–387.
9. Rakov, E. (1990). Fluorides in the technology of rare metals. Publishing House of the Moscow Chemical and Technological Institute named after D. I. Mendeleev, 60.
10. Rakov, E. (1984). Features and reactions of ammonium fluorides. Success in chemistry, 1463–1492.
11. AU5384799A (2000). Silicon-containing titanium dioxide, method for preparing the same and catalytic compositions thereof. Rotem Amfert Negev Ltd; declared 23.08.1999; published 19.03.2000.
12. GB 1357499 Production of titanium tetrafluoride british titan ltd / GB19720029944. 19720627.
13. US7670407B2. (2010) Method of producing titanium. Gerard Pretorius; declared 14.12.2005; published 02.03.2010.
14. Shvartsman, L. (2023). Production of colloidal silicon dioxide (SiO<sub>2</sub>) from quartz. Problems of scientific and technical activity, 37–43.
15. Bazhenov, E (2022). Quartz sand is an available and inexpensive raw material for electronics and photovoltaic technologies. Underwater technologies: industrial and Civil Engineering, 63–67.
16. Bazhenov, E (2022). Silicon from sand is a promising technology for obtaining semiconductor-quality silicon. Transfer of Innovative Technologies, 29–44.

## МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ В МЕТАЛУРГІЇ ТА МАШИНОБУДУВАННІ

### MODELING OF PROCESSES IN METALLURGY AND MECHANICAL ENGINEERING

УДК 621.316.13

- Джус А. В. асистент кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: dzhus\_anna@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Нарівський О. Е. д-р техн. наук, технічний директор ТОВ «Укрспецмаш», м. Бердянськ, Україна, e-mail: amz309@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2934-183X
- Сніжної Г. В. д-р техн. наук, професор, професор кафедри інформаційної безпеки та наноелектроніки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: snow@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0003-1452-0544
- Беліков С. Б. д-р техн. наук, професор Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: belikov@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-9510-8190
- Субботін С. О. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри програмних засобів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: subbotin.csit@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5814-8268
- Пуліна Т. В. д-р економ. наук, професор, завідувачка кафедри менеджменту Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: pulinatv@ukr.net, ORCID: 0000-0002-2672-8281

### ЗАКОНОМІРНОСТІ І МЕХАНІЗМИ ПІТІНГУВАННЯ СПЛАВУ 06ХН28МДТ (АНАЛОГ СТАЛЬ AISI 904L) В МОДЕЛЬНИХ ОБОРОТНИХ ВОДАХ ПІДПРИЄМСТВ

**Мета роботи.** Полягає у встановленні закономірностей і механізмів пітінгування сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах з рН 4–8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л, які найчастіше використовують на промислових підприємствах.

**Методи дослідження.** Розроблена математична модель, яка ґрунтується на деревах регресій та встановлює взаємозв'язок між критичними температурами пітінгування (КТП) сплаву 06ХН28МДТ та його хімічним складом, складовими структури і параметрами модельних оборотних вод (рН, концентрація хлоридів). Металографічний аналіз, енергодисперсійний аналіз, регресійний аналіз.

**Отримані результати.** За результатами аналізу розробленої математичної моделі, хімічного складу, структурної гетерогенності сплаву та відомих літературних даних встановлено, що в модельних оборотних водах з рН від 4,5 до 7,5 КТП сплаву 06ХН28МДТ має сталі значення близько 48,3 °С, яке не залежить від його хімічного складу, складових структури і концентрації хлоридів в модельних оборотних водах. В модельних оборотних водах з концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л КТП сплаву підвищується, в середньому, до 59 °С, зі збільшенням їх рН від 7,5 до 8, але вона зменшується до 39 °С, з його зниженням від 5 до 4. Виявлено, що рН середовища суттєвіше впливає на КТП сплаву, ніж концентрація в ньому хлоридів.

**Наукова новизна.** На підставі встановлених закономірностей між критичними температурами пітінгування сплаву 06ХН28МДТ та його хімічним складом, складовими структури і параметрами оборотних вод встановлено механізми його пітінгування, зокрема в слабкокислих середовищах з рН 4, 5 його КТП мінімальна, що зумовлено зменшенням перенапруги іонізації водню на карбідній фазі (Cr, Mo, Ti, Si, Mn, C) в околі нітридів титану, де зароджуються пітінги, а в близьких до нейтральних модельних оборотних водах КТП сплаву більше в широкому інтервалі рН, що пов'язано з утворенням оксидної плівки з моношару атомів Cr на його поверхні внаслідок її твердофазної дифузії під впливом Mn, але в слаболужних модельних оборотних водах КТП сплаву найвища, що зумовлено зниженням активності іонів хлору та їх адсорбції на недосконалоствях структури сплаву.

**Практична цінність.** Розроблена математична модель запропонована для використання при виборі найбільш стійкого к пінгунгу у промислових оборотних водах сплаву 06ХН28МДТ та передбачення утворення пінгунгів при роботі теплообмінників.

**Ключові слова:** сплав 06ХН28МДТ, корозія, пінгунгостійкість, оборотні води, обладнання теплообміну, структурна гетерогенність, критична температура пінгунгування.

### Вступ

Сплав 06ХН28МДТ та його аналоги сталі AISI 904L (США), ZINCDH31-27-03 (Франція), SCS23 (Японія) широко використовують у виробництві пластинчастих і кожухотрубчастих теплообмінників, які застосовують для виробництва сірчаної, фосфорної, плавикової та інших кислот [1, 2]. Для охолодження технологічних продуктів із цих кислот задіяють воду оборотних систем підприємств, яка містить іони хлору та інші активатори пінгунгової, щільної та виразкової корозії [3–5]. Вони часто можуть бути причиною перфорації теплообмінних елементів, якщо температура води в їх порожнинах перевищує критичне значення для визначеної концентрації хлоридів та рН [4, 6]. Через це оцінка і прогнозування пінгунготривкості теплообмінників при їх експлуатації є актуальним завданням, яке вирішували в працях [7–10], встановлюючи КТП сплаву і [10, 11] – граничні потенціали. Для розв’язання таких задач встановлюють закономірності і механізми пінгунгування сталей і сплавів [7–9, 12], які ґрунтуються на встановлених особливостях селективного розчинення основних хімічних елементів із пінгунгів [13, 14]. Тому в цій статті досліджували закономірності і механізми пінгунгування сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах, застосовуючи розроблену математичну модель, яка ґрунтується на деревах регресій.

### Мета роботи

Для встановлення закономірностей і механізмів пінгунгування сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах з рН 4–8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л були побудовані математичні моделі, які ґрунтуються на лінійних квадратичних регресіях і на двошаровій нейронній мережі прямого поширення сигналу для скороченого набору вхідних ознак.

### Матеріал і методика досліджень

Досліджували п’ять промислових плавок сплаву 06ХН28МДТ (аналог сталі AISI 904L). Їх хімічний склад (табл. 1), структурну гетерогенність, критичні температури пінгунгування (КТП) в модельних оборотних водах з рН 4–8 і концентрацією хлоридів 350, 400, 500, 550 і 600 мг/л визначали раніше [12]. За основу побудови математичної моделі (табл. 2) використовували дерева регресій, які є найпопулярнішим методом вирішення багатьох практичних завдань [15], оскільки вони автоматично відбирають інформативні ознаки (найважливіші хі моделі). В розробленій математичній моделі (табл. 2)  $Y$  – значення вихідної ознаки (КТП) [9, 16], а  $x_i$  – змінні незалежні, зокрема:  $x_1$  – рН модельної оборотної води (4...8);  $x_2$  – вміст хлоридів у ній (350, 400, 500, 550, 600 мг/л);  $x_3$  – вміст

вуглецю (С) мас. %;  $x_4$  – вміст марганцю (Mn) мас. %;  $x_5$  – вміст кремнію (Si) мас. %;  $x_6$  – вміст хрому (Cr) мас. %;  $x_7$  – вміст нікелю (Ni) мас. %;  $x_8$  – вміст титану (Ti) мас. %;  $x_9$  – вміст сірки (S) мас. %;  $x_{10}$  – вміст фосфору (P) мас. %;  $x_{11}$  – вміст молибдену (Mo) мас. %;  $x_{12}$  – вміст міді (Cu) мас. %;  $x_{13}$  – об’єм нітридів ( $V_H$ ), (0,0931...0,1918 Vol %);  $x_{14}$  – об’єм сульфідів та окисульфідів ( $V_{окс}$ ), (0,0031...0,0091 Vol %);  $x_{15}$  –  $d_3$ , мкм, середній діаметр зерна аустеніту (11...31 мкм).

Якість моделі (табл.2) оцінювали, використовуючи суму квадратів миттєвих похибок [15]

$$E = \sum_{S=1}^S (y^S - y^{S*})^2$$

де  $y^S$  – фактичне значення вихідної ознаки (КТП), °С;  $y^{S*}$  – розрахункове значення вихідної ознаки (КТП), °С.

**Таблиця 1** – Хімічний склад сплаву 06ХН28МДТ (аналог сталі AISI 904L), мас. %

	№ плавки				
	1	2	3	4	5
C	0,050	0,067	0,068	0,048	0,050
Si	0,60	0,57	0,55	0,62	0,57
Mn	0,32	0,46	0,54	0,57	0,31
Cr	24,31	22,68	21,84	22,67	23,46
Ni	27,39	27,65	27,45	27,73	27,51
Mo	2,90	2,78	2,55	2,56	2,51
Cu	2,75	2,68	2,60	2,53	2,78
Ti	0,79	0,59	0,55	0,67	0,89
S	0,006	0,005	0,004	0,006	0,004
P	0,029	0,027	0,038	0,028	0,032

Мінімальне абсолютне значення (модуль) миттєвої похибки ( $E_{\min}$ ) для моделі (табл. 2) дорівнює нулю, максимальне абсолютне значення (модуль) миттєвої похибки ( $E_{\max}$ ) для цієї моделі – 2,75 °С, середнє абсолютне значення (модуль) миттєвої похибки ( $E_{\text{ср}}$ ) моделі – 0,827999 °С, а сумарне абсолютне значення (модуль) миттєвої похибки ( $E_{\text{сум}}$ ) – 103,4499 °С. Отже, ця модель точніша, ніж моделі, які ґрунтуються на багатомірній лінійній регресії [7], багатомірній регресії з попарними комбінаціями ознак, багатомірній квадратичній регресії та багатомірній квадратичній регресії з поєднанням ознак [6, 8], аде вона нижча, ніж у нейромережевої моделі. Проте на відміну від побудованої моделі (табл. 2) вона не дає можливість для аналізу впливу окремих змінних на вихідне значення у (КТП).

### Результати досліджень та їх обговорення

В результаті досліджень пінгунготривкості сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах з рН 4–8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л було



встановлено, що вона зростала зі збільшенням їх рН та зниженням концентрації хлоридів [7]. Це узгоджується із загальновідомими даними [4, 6, 8, 9]. Зокрема, в модельній оборотній воді з концентрацією хлоридів 350 мг/л вона зростала від 50 до 61 °С у плавки 1 та від 53 до 58 °С у пл. 2, з 400 мг/л – від 48 до 57 °С у пл. 1 та від 51 до 58 °С у пл. 2, з 500 мг/л – від 49 до 56 °С у пл. 1 та від 44 до 52 °С у пл. 3, з 550 мг/л – від 46 до 57 °С у пл. 1 та від 46 до 49 °С у пл. 3, з 600 мг/л – від 43 до 50 °С у пл. 1 та від 38 до 44 °С у пл. 4 зі збільшенням її рН від 4 до 8 [10]. З цієї інформації виходить, що параметри оборотних вод (рН,  $C_{Cl}$ ) і показники сплаву впливають на його опір пітінгуванню в хлоридовмісному середовищі. Аналіз побудованої математичної моделі (табл. 2), яка ґрунтується на дереві регресії показав, що параметри модельних оборотних вод (рН,  $C_{Cl}$ ) та хімічний склад сплаву 06ХН28МДТ впливають на його опір пітінгуванню в модельних оборотних водах. Разом з тим, з аналізу розробленої математичної моделі виходить, що складові його структури  $x_{13}$  (об'єм нітридів титану),  $x_{14}$  (об'єм сульфідів і оксисульфідів титану) і  $x_{15}$  (середній діаметр зерна аустеніту) не впливають на його пітінготривкість у досліджуваних умовах. Але слід зауважити, що в праці [7], де досліджували пітінготривкість теплообмінників, вироблених з таких самих плавок сплаву 06ХН28МДТ, за результатами аналізу побудованої багатомірної лінійної регресії першого порядку встановлено, що параметри хлоридовмісного середовища (рН,  $C_{Cl}$ ) і вміст в сплаві Cr мають найсуттєвіший вплив на його опір пітінговій корозії, а вплив вмісту Mo, Ni, об'єму нітридів титану і середнього діаметру зерна аустеніту дуже малий. Це узгоджується з результатами аналізу розробленої моделі (табл. 2).

**Таблиця 2** – Математична модель дерева регресії

Вузол	Функція
1	якщо $x_2 < 575$ то вузол 2 інакше якщо $x_2 \geq 575$ то вузол 3 інакше $y = 49,008$
2	якщо $x_1 < 6,5$ то вузол 4 інакше якщо $x_1 \geq 6,5$ то вузол 5 інакше $y = 50,37$
3	якщо $x_1 < 6,5$ то вузол 6 інакше якщо $x_1 \geq 6,5$ то вузол 7 інакше $y = 43,56$
4	якщо $x_2 < 450$ то вузол 8 інакше якщо $x_2 \geq 450$ то вузол 9 інакше $y = 48,4833$
5	якщо $x_2 < 450$ то вузол 10 інакше якщо $x_2 \geq 450$ то вузол 11 інакше $y = 53,2$
6	якщо $x_5 < 0,565$ то вузол 12 інакше якщо $x_5 \geq 0,565$ то вузол 13 інакше $y = 41,9333$
7	якщо $x_{11} < 2,665$ то вузол 14 інакше якщо $x_{11} \geq 2,665$ то вузол 15 інакше $y = 46$
8	якщо $x_8 < 0,635$ то вузол 16 інакше якщо $x_8 \geq 0,635$ то вузол 17 інакше $y = 50,1$
9	якщо $x_5 < 0,52$ то вузол 18 інакше якщо $x_5 \geq 0,52$ то вузол 19 інакше $y = 46,8667$
10	якщо $x_{12} < 2,65$ то вузол 20 інакше якщо $x_{12} \geq 2,65$ то вузол 21 інакше $y = 55,5$
11	якщо $x_6 < 23,865$ то вузол 22 інакше якщо $x_6 \geq 23,865$ то вузол 23 інакше $y = 50,9$

12	якщо $x_1 < 5,5$ то вузол 24 інакше якщо $x_1 \geq 5,5$ то вузол 25 інакше $y = 42,7778$
13	якщо $x_1 < 4,5$ то вузол 26 інакше якщо $x_1 \geq 4,5$ то вузол 27 інакше $y = 40,6667$
14	якщо $x_3 < 0,049$ то вузол 28 інакше якщо $x_3 \geq 0,049$ то вузол 29 інакше $y = 45$
15	$y = 47,5$
16	якщо $x_3 < 0,0675$ то вузол 30 інакше якщо $x_3 \geq 0,0675$ то вузол 31 інакше $y = 52$
17	якщо $x_1 < 5,5$ то вузол 32 інакше якщо $x_1 \geq 5,5$ то вузол 33 інакше $y = 48,8333$
18	якщо $x_1 < 4,5$ то вузол 34 інакше якщо $x_1 \geq 4,5$ то вузол 35 інакше $y = 50,3333$
19	якщо $x_7 < 27,66$ то вузол 36 інакше якщо $x_7 \geq 27,66$ то вузол 37 інакше $y = 46$
20	якщо $x_1 < 7,5$ то вузол 38 інакше якщо $x_1 \geq 7,5$ то вузол 39 інакше $y = 53,625$
21	якщо $x_2 < 375$ то вузол 40 інакше якщо $x_2 \geq 375$ то вузол 41 інакше $y = 56,75$
22	якщо $x_4 < 0,36$ то вузол 42 інакше якщо $x_4 \geq 0,36$ то вузол 43 інакше $y = 49,625$
23	$y = 56$
24	якщо $x_6 < 23,49$ то вузол 44 інакше якщо $x_6 \geq 23,49$ то вузол 45 інакше $y = 42,1667$
25	$y = 44$
26	$y = 39$
27	$y = 41,5$
28	$y = 44$
29	$y = 45,5$
30	якщо $x_1 < 4,5$ то вузол 46 інакше якщо $x_1 \geq 4,5$ то вузол 47 інакше $y = 54$
31	якщо $x_1 < 5,5$ то вузол 48 інакше якщо $x_1 \geq 5,5$ то вузол 49 інакше $y = 50$
32	якщо $x_5 < 0,53$ то вузол 50 інакше якщо $x_5 \geq 0,53$ то вузол 51 інакше $y = 48,1667$
33	якщо $x_3 < 0,049$ то вузол 52 інакше якщо $x_3 \geq 0,049$ то вузол 53 інакше $y = 50,1667$
34	$y = 48$
35	$y = 51,5$
36	якщо $x_1 < 5,5$ то вузол 54 інакше якщо $x_1 \geq 5,5$ то вузол 55 інакше $y = 46,5556$
37	якщо $x_1 < 5,5$ то вузол 56 інакше якщо $x_1 \geq 5,5$ то вузол 57 інакше $y = 44,3333$
38	$y = 52,75$
39	$y = 54,5$
40	якщо $x_1 < 7,5$ то вузол 58 інакше якщо $x_1 \geq 7,5$ то вузол 59 інакше $y = 58,1667$
41	якщо $x_1 < 7,5$ то вузол 60 інакше якщо $x_1 \geq 7,5$ то вузол 61 інакше $y = 55,3333$
42	$y = 51,75$
43	якщо $x_1 < 7,5$ то вузол 62 інакше якщо $x_1 \geq 7,5$ то вузол 63 інакше $y = 48,9167$
44	$y = 41,75$
45	$y = 43$
46	$y = 52$
47	$y = 55$
48	$y = 48,25$
49	$y = 53,5$
50	$y = 49,75$
51	якщо $x_1 < 4,5$ то вузол 64 інакше якщо $x_1 \geq 4,5$ то вузол 65 інакше $y = 47,375$
52	$y = 49$
53	$y = 50,75$

Продовження табл. 2

54	якщо $x_5 < 0,555$ то вузол 66 інакше якщо $x_5 \geq 0,555$ то вузол 67 інакше $y = 46,0833$
55	якщо $x_2 < 525$ то вузол 68 інакше якщо $x_2 \geq 525$ то вузол 69 інакше $y = 47,5$
56	$y = 44$
57	$y = 45$
58	$y = 57$
59	$y = 59,3333$
60	$y = 54$
61	$y = 56,6667$
62	якщо $x_3 < 0,0575$ то вузол 70 інакше якщо $x_3 \geq 0,0575$ то вузол 71 інакше $y = 47,6667$
63	якщо $x_2 < 525$ то вузол 72 інакше якщо $x_2 \geq 525$ то вузол 73 інакше $y = 50,1667$
64	$y = 47$
65	$y = 47,75$
66	$y = 45,5$
67	якщо $x_2 < 525$ то вузол 74 інакше якщо $x_2 \geq 525$ то вузол 75 інакше $y = 46,375$
68	$y = 48$
69	$y = 47$
70	$y = 46$
71	$y = 48,5$
72	$y = 51,3333$
73	$y = 49$
74	$y = 47$
75	$y = 45,75$

Зокрема виходить, що, якщо виконуються такі вимоги:  $x_2(C_{Cl}) < 575$  мг/л у вузлі 1, то  $x_1(pH) < 6,5$  у вузлі 2, то  $x_2(C_{Cl}) < 450$  мг/л (вуз. 4), то  $x_8(Ti) < 0,635$  мас. % (вуз. 8), то  $x_3(C) < 0,0675$  мас. % (вуз. 16), то  $x_1(pH) < 4,5$  (вуз. 30), то  $Y(КТП)$  у вузлі 46 буде становити  $46^\circ C$ . Водночас, якщо  $x_2(C_{Cl}) \geq 575$  мг/л (вуз. 1), то  $x_1(pH) < 6,5$  (вуз. 3), то  $x_5(Si) < 0,655$  мас. % (вуз. 24), то КТП ( $Y$ ) сплаву за таких умов буде  $41,75^\circ C$ . За відсутності цих вимог  $Y(КТП)$  сплаву становитиме  $49,01^\circ C$ . З аналізу цих функцій, можна зазначити, що в слабкокислих модельних оборотних водах з рН нижче 4,5 і концентрацією хлоридів менше 450 мг/л КТП сплаву 06ХН28МДТ знижується на  $3^\circ C$ , внаслідок утворення карбідів Тi. Це згідно з даними [16] зумовлено зниженням перенапруги іонізації водню на карбідах титану в кислих хлоридовмісних середовищах та пришвидшенням катодних реакцій на карбонітридах титану і анодних ділянках, якими є пітинги в їх околі. До того ж відомо [17], що збільшення вмісту карбідів у корозійноотривких сталях і сплавах сприяє зменшенню області потенціалів за яких вони знаходяться у пасивному стані в хлоридовмісних середовищах. Слід зауважити, що такі процеси протікають лише в плавках 2, 3 сплаву 06ХН28МДТ, де вміст С більше його розчинності в твердому розчині аустеніту ( $0,05$  мас. %) [18] (табл. 1), що може сприяти випадінню карбідів титану, в тому числі по периметру нітридів титану в околі яких фіксували пітинги (рис. 1).

В плавках 1, 4, 5 сплаву 06ХН28МДТ карбідної фази в околі нітридів не спостережено, а в праці [10]

встановлено, що титан, розчинений в твердому розчині аустеніту сплаву 06ХН28МДТ, за таких самих умов випробувань сприяє підвищенню його пітинготривкості.

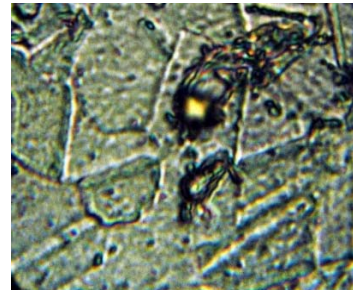
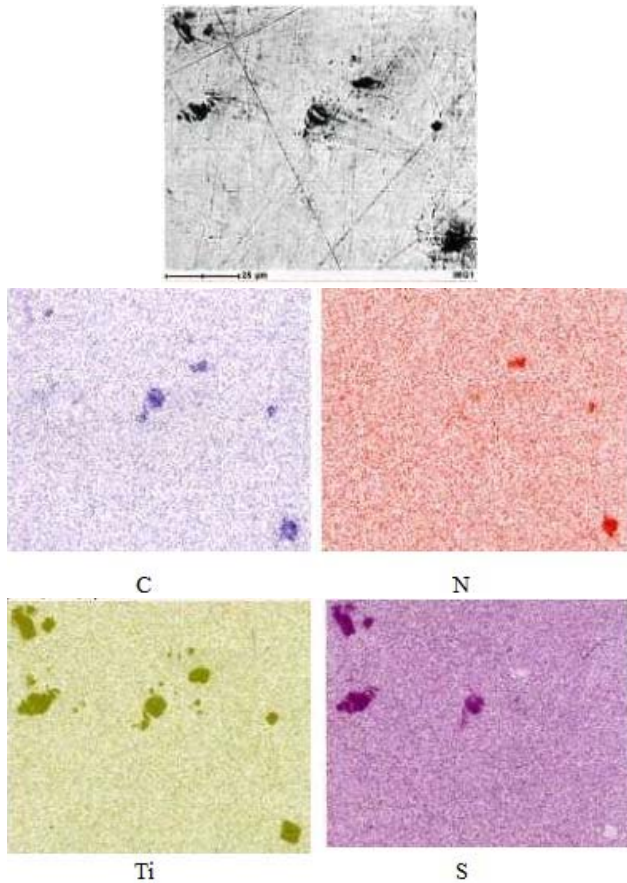


Рисунок 1. Пітинги в околі нітридів титану на поверхні сплаву 06ХН28МДТ ( $\times 1500$ )

Аналіз ланцюжка другої частини функції вузла 1, розробленої математичної моделі (табл. 2), показав, що зі збільшенням концентрації хлоридів у модельних оборотних водах ( $x_2$ ) від 575 (вузол 1, II частина) до 600 мг/л (табл. 2) та зменшенням вмісту Si в сплаві від 0,655 (вузол 3, I частина) до 0,55 мас. % (табл. 2) за рН середовища менше 6,5 та вмісту Cr від 23,49 (вузол 6, I частина) до 21,84 мас. % пл. 3 сплаву (табл. 1) за рН середовища менше 5,5 (вузол 12, I частина) КТП сплаву знижується від 49 до  $41,75^\circ C$ . Така тенденція зумовлена тим, що Cr легко пасивується навіть у розчині кислот внаслідок окиснювальної дії іонів водню, утворюючи на поверхні оксидні плівки, які протидіють активуючому впливу іонів хлору [18]. При цьому за даними В. В. Герасімова [19] потенціал  $E_{pit}$  корозійноотривких сплавів становить 0,1 В при вмісті у них Cr 25 мас. % і залишається незмінними при його збільшенні, що зумовлено утворенням на їх поверхні моношару з атомів Cr. Негативна роль Si в пітинготривкості сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах з рН < 6,5 (вузол 3) за умови, що  $x_5(Si) < 0,655$  мас. % (вузол 6) найвірогідніше полягає в тому, що Si, розчинений в твердому розчині аустеніту, сприяє випадінню карбідів із нього [20] по периметру нітридів титану, в околі яких утворюються стабільні пітинги внаслідок зменшення перенапруги іонізації водню на поверхні карбідної фази та, як результат, росту густини струму в пітингах в околі цих включень. До того ж за даними [13, 14] Cr і Si пришвидшують корозійні втрати  $\Delta Fe$  із пітингів, що також сприяє їх стабільному підростанню. При цьому природа цих включень теж відіграє немало важливу роль [3, 21–25].

Аналіз ланцюжка (вуз.1, II частина, вузли 11, 22, 42, I частина) показав, що якщо  $x_2(C_{Cl}) \geq 450$  мг/л,  $x_6(Cr) \geq 23,865$  мас. %,  $x_4(Mn) < 0,36$  мас.%, то КТП сплаву становить  $51,75^\circ C$ . Це може свідчити про те, що збільшення концентрації хлоридів в модельних оборотних водах від 450 до 600 мг/л практично не впливає на опір сплаву 06ХН28МДТ пітинговій корозії за умови, коли його поверхня покрита шаром із атомів Cr, а Mn, розчинений у твердому розчині

аустеніту, не утворює із сіркою сульфідних включень, які згідно з даними [21, 22, 26–28] є центрами активного пітінгування. Це підтверджується металографічним аналізом сплаву 06ХН28МДТ, яким виявлено лише сульфідні і карбонітриди титану (рис. 2), які розчиняються в розчинах лише активних кислот [17].



**Рисунок 2.** Сульфідні і карбонітриди титану в сплаві 06ХН28МДТ ( $\times 550$ ) (енергодисперсійна топограма поверхні зразка)

Кремній, як карбідотвірний хімічний елемент [17], може сприяти випадінню карбідів із твердого розчину аустеніту сталей і сплавів [20]. Через це, за умови  $x_5(\text{Si}) \geq 0,565$  мас. % (вуз. 6, II частина), в модельній оборотній воді з  $x_1(\text{pH}) < 4,5$  (вуз.13, I частина) КТП сплаву 06ХН28МДТ становить лише  $39^\circ\text{C}$ , що зумовлено зниженням перенапруги іонізації водню в кислому хлоридовмісному середовищі на карбідній фазі біля нитридів титану в околі яких зароджуються пітінги (рис. 1). Слід зауважити, що між концентрацією хлоридів у модельній оборотній воді та її рН кислотність має пріоритетне значення, що витікає з аналізу такого ланцюга, розробленої математичної моделі. Зокрема, якщо  $x_2(\text{Cl}^-) \geq 450$  мг/л (вуз. 4, II частина),  $x_3(\text{Si}) < 0,52$  мас. % (вуз. 9, I частина), а  $x_1(\text{pH}) < 4,5$  (вуз. 18, I частина), то КТП сплаву становить  $52,75^\circ\text{C}$  (вуз. 38). Таке узагальнення також узгоджується з даними аналізу ланцюжка моделі

$x_1(\text{pH}) \geq 7,5$  (вуз.41, II частина), то КТП сплаву 06ХН28МДТ становить  $56,7^\circ\text{C}$  (вуз.61) та загально відомими літературними даними [11, 29, 30]. Про найважливішу роль  $x_1(\text{pH})$  модельних оборотних водах у пітінгуванні сплаву 06ХН28МДТ свідчать 26 із 40 ланцюжків, розробленої математичної моделі (табл. 2). Але кислотність середовища неоднозначно впливає на пітінготривкість досліджуваного сплаву, зокрема спостережено, що, якщо  $x_1(\text{pH}) \geq 7,5$  (вуз. 41, II частина), то КТП =  $56,7^\circ\text{C}$  (вуз. 61) за базового значення цієї величини  $55,3^\circ\text{C}$  (вуз. 41);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 12, II частина), то КТП =  $44^\circ\text{C}$  (вуз. 25) за базового значення цієї величини  $42,8^\circ\text{C}$  (вуз. 12);  $x_1(\text{pH}) \geq 4,5$  (вуз. 13, II частина), то КТП =  $41,5^\circ\text{C}$  (вуз. 27) за базового значення цієї величини  $40,7^\circ\text{C}$  (вуз. 13);  $x_1(\text{pH}) \geq 4,5$  (вуз. 18, II частина), то КТП =  $51,5^\circ\text{C}$  (вуз. 35) за базового значення цієї величини  $50,3^\circ\text{C}$  (вуз. 18);  $x_1(\text{pH}) \geq 7,5$  (вуз. 20, II частина), то КТП =  $54^\circ\text{C}$  (вуз. 39) за базового значення цієї величини  $53,6^\circ\text{C}$  (вуз. 20);  $x_1(\text{pH}) \geq 4,5$  (вуз. 30, II частина), то КТП =  $55^\circ\text{C}$  (вуз. 47) за базового значення цієї величини  $54^\circ\text{C}$  (вуз. 30);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 31, II частина), то КТП =  $53,5^\circ\text{C}$  (вуз. 49) за базового значення цієї величини  $50^\circ\text{C}$  (вуз. 31);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 37, II частина), то КТП =  $45^\circ\text{C}$  (вуз. 57) за базового значення цієї величини  $44,3^\circ\text{C}$  (вуз. 37);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 40, II частина), то КТП =  $59,3^\circ\text{C}$  (вуз. 59) за базового значення цієї величини  $58,2^\circ\text{C}$  (вуз. 40);  $x_1(\text{pH}) \geq 4,5$  (вуз. 51, II частина), то КТП =  $47,8^\circ\text{C}$  (вуз. 65) за базового значення цієї величини  $47,4^\circ\text{C}$  (вуз. 51).

Аналіз цих залежностей моделі (табл. 2) показав, що за умов  $x_1(\text{pH}) \geq 7,5$  (вуз. 41, 20, II частина), КТП сплаву максимальні, що узгоджується з загально відомими даними [4], а різниця між КТП у вузлах 61 і 41 та 39 і 20 відповідно становить 1,4 і  $0,4^\circ\text{C}$ . Це може свідчити про набагато менший вплив концентрації хлоридів у модельній оборотній воді ( $x_2$ ) та хімічного складу сплаву на КТП. Адаже за результатами аналізу моделі (табл. 2) виявлено, що складові структури сплаву ( $x_{13}$ ,  $x_{14}$ ,  $x_{15}$ ) не впливають на його пітінготривкість.

Разом з тим, слід відзначити, що вміст сірки ( $x_9$ ) і фосфору ( $x_{10}$ ) також не впливає на пітінготривкість сплаву в досліджуваних модельних оборотних водах. Найвірогідніше, це зумовлено тим, що сірка, нерозчинена в твердому розчині аустеніту, утворює з титаном сульфідні, які тривкіші, ніж  $\text{MnS}$  у кислих хлоридовмісних розчинах. До того ж встановлено [21], що потенціал репасивації цього сплаву у щільності  $E_{\text{TP}}$  в розчині 3%  $\text{NaCl}$  за прямолінійною залежністю зсувається у додатний бік зі збільшенням у ньому об'єму сульфідів титану, а  $\text{Cr}$ ,  $\text{Mo}$  і  $\text{Ti}$  аналогічним чином впливають на таку тенденцію.

За умови, коли  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 12, II частина; 31, II частина і 37, II частина), КТП досліджуваного сплаву становили 44; 53,5 і  $45^\circ\text{C}$ , тобто в середньому  $47,5^\circ\text{C}$ , що на  $9,2^\circ\text{C}$  менше ніж, коли  $x_1(\text{pH}) \geq 7,5$ . Водночас, коли  $x_1(\text{pH}) \geq 4,5$  (вуз.13, II частина; 18, II частина і 30, II частина), КТП сплаву 06ХН28МДТ в

середньому становила 49,3 °С, що, в середньому, на 1,7 °С більше, ніж, коли  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$ . Це знаходиться практично в межах похибки вимірювання температури модельних оборотних вод ( $\pm 0,5$  °С) під час визначення КТП сплаву, до того ж температуру середовища підвищували з кроком 2°С до встановлення її критичного значення. Тому узагальнюючи вище наведене, можна зазначити, що в модельних оборотних водах з концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л і рН від 4,5 до 7,5 КТП сплаву становить, в середньому, 48,3 °С і не залежить від його хімічного складу в межах стандарту і складових структури. За такої ж самої концентрації хлоридів у модельній оборотній воді та рН від 7,5 до 8 середнє значення КТП сплаву становить 56,7 °С і також не залежить від його параметрів.

Аналіз ланцюгів залежностей моделі (табл. 2)  $x_1(\text{pH}) \geq 7,5$  (вуз. 43),  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) < 525$  мг/л (вуз. 63), то КТП = 51,3 °С (вуз. 73);  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) \geq 375$  мг/л (вуз. 21),  $x_1(\text{pH}) < 7,5$  (вуз. 41), то КТП = 54 °С (вуз. 60);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 36),  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) < 525$  мг/л (вуз. 55), то КТП = 48 °С (вуз. 68);  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 36, II),  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) \geq 525$  мг/л (вуз. 55, II), то КТП = 47 °С (вуз. 69) показав, що за таких умов випробувань КТП сплаву 06ХН28МДТ, в середньому, становила 50,1 °С. Воно близьке до КТП = 52,5 °С, яке визначене за таких самих умов випробувань, що підтверджує вищезазначене узагальнення про вплив параметрів середовища і сплаву на його пітинготривкість. Водночас залежності  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) \geq 525$  мг/л (вуз. 67, II), то КТП = 45,75 °С (вуз. 75);  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) \geq 525$  мг/л (вуз. 63, II), то КТП = 49 °С (вуз. 73);  $x_2(\text{C}_{\text{Cl}^-}) \geq 525$  мг/л (вуз. 55, II), то КТП = 47 °С (вуз. 69) показують, що збільшення концентрації хлоридів у модельних оборотних водах від 525 до 600 мг/л сприяє зниженню пітинготривкості сплаву 06ХН28МДТ. Найвірогідніше це зумовлено ростом густини анодних струмів у пітингах, які залишилися на поверхні сплаву після репасивації більшості із них, внаслідок руйнування залишків оксидної плівки над ними хлоридами та вільного доступу кисню до їх поверхні [31]. Це узгоджується з даними праць [32, 33] для корозійнотривких сталей за таких самих умов випробувань.

Вуглець є карбідотвірним елементом, який стабілізує аустеніт в корозійнотривких сталях і сплавах [17]. Ці властивості відбиваються на пітинготривкості сплаву 06ХН28МДТ в модельних оборотних водах з рН 4-8 і концентрацією хлоридів від 350 до 600 мг/л. Зокрема, аналіз ланцюжків математичної моделі (табл. 2)  $x_1(\text{pH}) \geq 5,5$  (вуз. 17, II),  $x_3(\text{C}) < 0,049$  мас. % (вуз.33, I), то КТП = 49 °С (вуз. 52);  $x_3(\text{C}) \geq 0,049$  мас. % (вуз. 14, II), то КТП = 45,5°С (вуз. 29);  $x_3(\text{C}) \geq 0,0675$  мас. % (вуз. 16, II), то  $x_1(\text{pH}) < 5,5$  (вуз. 31, I), то КТП = 48,25°С (вуз. 48);  $x_3(\text{C}) \geq 0,049$  мас. % (вуз. 33, II), то КТП = 50,75°С (вуз. 53);  $x_3(\text{C}) < 0,0575$  мас. % (вуз. 62, I), то КТП = 46°С (вуз. 70);  $x_3(\text{C}) \geq 0,0575$  мас. % (вуз. 62, II), то КТП = 47,7 °С (вуз. 71) показує, що КТП сплаву змінюється від 45,5 до 50,75 °С. З аналізу цих залежностей виходить, що вплив вуглецю на КТП сплаву 06ХН28МДТ необ-

хідно розглядати в контексті з вмістом у ньому карбідотвірних хімічних елементів Cr, Mo, Si, Mn, тощо, які, як показав загальний аналіз моделі (табл. 2), впливають на пітинготривкість сплаву в складі карбідної фази. Зокрема, із залежностей  $x_1(\text{pH}) \geq 6,5$  (вуз.3, II), то  $x_{11}(\text{Mo}) < 2,665$  мас.% (вуз.7, I), то  $x_3(\text{C}) \geq 0,049$  мас. % (вуз. 14, I), то КТП = 44°С (вуз. 28);  $x_{11}(\text{Mo}) \geq 2,665$  мас.% (вуз.7, II), то КТП = 47,5°С (вуз.15) виходить, що Мо з С створює карбідну фазу та збіднює твердий розчин аустеніту вуглецем, що за умови  $x_3(\text{C}) < 0,049$  мас. % сприяє суттєвому зниженню КТП сплаву до 44 °С. Але збільшення вмісту Мо в сплаві понад 2,665 мас. % сприяє росту КТП сплаву до 47,5 °С в близькому до нейтрального середовищі. Це узгоджується із загальновідомими даними [34, 35] про позитивну роль Мо у опорі корозійнотривких сталей і сплавів пітинговій, щілинній та виразковій корозії у хлоридовмісних середовищах. Разом з тим відомо [34], що Мо з Cr утворюють змішані оксиди у пасивній плівці, корозійнотривкіші за оксиди хрому, що пов'язують із «гальмуванням» розчинення металів у пітингах близько до потенціалу репасивації [36]. Але за результатами аналізу математичної моделі (табл. 2) встановлено, що в сплаві 06ХН28МДТ Cr сам по собі створює пасивні оксидні плівки, які недостатньо тривкі до активуючої дії хлоридів у досліджуваних модельних оборотних водах, оскільки встановлено, що, якщо  $x_6(\text{Cr}) < 23,43$  мас. % (вуз. 24, I), то КТП = 41,75 °С (вуз. 44). А, якщо вміст хрому в сплаві більше 23,49 мас. % (вуз. 24, II), то КТП зростає лише до 43 °С (вуз. 45). Найвірогідніше така тенденція зумовлена впливом іншим легувальних елементів і розкисників у сплаві на вміст хрому, безпосередньо, в оксидній плівці, оскільки з аналізу залежностей  $x_6(\text{Cr}) < 23,865$  мас. % (вуз. 11, I), то  $x_4(\text{Mn}) < 0,36$  мас. % (вуз.22, I), то КТП = 51,75 °С (вуз. 42). Водночас за умови, що  $x_6(\text{Cr}) \geq 23,685$  мас. % (вуз. 11, II), то КТП = 56 °С (вуз. 23). Крім того, про це свідчить залежність  $x_6(\text{Cr}) < 23,865$  мас. % (вуз. 11, I), то  $x_4(\text{Mn}) < 0,36$  мас. % (вуз. 22, I), то  $x_1(\text{pH}) < 7,5$ , то  $x_3(\text{C}) < 0,0575$  мас. % (вуз. 62, I), то КТП = 46 °С (вуз. 70). Проте, якщо  $x_3(\text{C}) \geq 0,575$  мас. % (вуз. 62, II), то КТП = 48,5 °С (вуз. 71). Таким чином, узагальнюючи вищенаведене, можна зазначити, що вміст Mn, Cr, C в сплаві 06ХН28МДТ суттєво впливає на його пітинготривкість в досліджуваних модельних оборотних водах в широкому інтервалі рН від 4 до 7,5. Зокрема, за близько до мінімального вмісту Mn і Cr (табл. 1) КТП сплаву на 10 °С вище, ніж за таких самих умов, але без Mn. Найвірогідніше Mn за такого вмісту в сплаві сприяє збагаченню оксидної плівки Cr, що підвищує його КТП. Але збільшення вмісту Mn в сплаві від 0,36 до 0,57 мас.% та наявність у ньому C в усьому інтервалі концентрацій від 0,048 до 0,068 мас. % (табл. 1) сприяє зниженню його КТП на 3,25–5,75 °С. Найвірогідніше це пов'язано зі збідненням оксидної плівки хромом в околі карбонітридів титану (рис.1) внаслідок прищвиднення твердофазної дифузії Cr марганцем до карбідної фази біля цих

включень. Крім того, на ній, як відомо [37], знижується перенапряга іонізації водню в кислих і слабокислих хлоридовмісних середовищах, що також сприяє пітінгуванню сплаву. Але за максимального вмісту Cr в сплаві 24,31 мас. % (табл. 1) його поверхня покрита, в основному, атомами Cr, що сприяє його максимальній пітінготривкості. Це узгоджується з даними [38]. Вище згадували про негативний вплив карбідів титану на пітінготривкість сплаву 06ХН28МДТ, який найбільше проявляється при  $x_1(\text{pH}) < 4,5$  навіть за концентрації хлоридів  $x_2(\text{Cl}^-)$  нижче 450 мг/л та вмісті Ti і С в ньому 0,635 і 0,0675 мас. %, відповідно. Але, коли  $x_3(\text{Ti}) \geq 0,635$  мас. % (вуз. 8, II), то  $x_1(\text{pH}) < 5,5$  (вуз. 17, I), то  $x_5(\text{Si}) < 0,53$  мас. % (вуз. 32, I), а КТП = 49,75°C (вуз. 50). Її підвищення на 3,75°C пов'язано зі зниженням вмісту Si в сплаві, який сприяє випадінню карбідної фази [20]. До того ж залежності  $x_5(\text{Si}) \geq 0,565$  мас. % (вуз. 6, II), то  $x_1(\text{pH}) < 4,5$  (вуз. 13, I), то КТП = 39°C (вуз. 26) показують, що в слабкислій модельній оборотній воді збільшення вмісту Si в сплаві 06ХН28МДТ від 0,565 до 0,62 мас. % (табл. 1) сприяє суттєвому зниженню його КТП до 39 °С. Слід зазначити, що така тенденція можлива лише за високої концентрації хлоридів у модельних оборотних водах ( $x_2$ ) і низькому рН, оскільки КТП сплаву росте до 47 °С (вуз. 74) за умови, що  $x_5(\text{Si}) \geq 0,555$  мас. % (вуз. 54, II), а  $x_2(\text{Cl}^-) < 525$  мг/л (вуз. 67, I). Це підтверджує адсорбційну теорію пітінгування корозійотривких сталей і сплавів у хлоридовмісних середовищах, яку підтримував академік Л.І. Розенфельд [4]. Вважають [30], що у корозійотривких сталях і сплавах частка Ni витрачається на компенсацію негативного впливу S на їх пітінготривкість. Але в досліджуваних плавках максимальний вміст S становив 0,006 мас. % (табл. 1). Тому вона, в основному, була розчинена в твердому розчині аустеніту, а решта в складі TiS, які не розчинні в багатьох кислотах [38]. Через це Ni не витрачається на нейтралізацію негативного впливу MnS, яких в сплаві не виявлено та не компенсує негативний вплив Si. Це виходить з аналізу залежностей моделі (табл. 2), зокрема,  $x_5(\text{Si}) \geq 0,52$  мас. % (вуз. 9, II), то  $x_7(\text{Ni}) < 27,66$  мас. % (вуз. 19, I), то  $x_1(\text{pH}) < 5,5$  (вуз. 36, I),  $x_5(\text{Si}) \geq 0,555$  мас. % (вуз. 54, I), та КТП = 45,5°C (вуз. 66), та  $x_7(\text{Ni}) \geq 27,66$  мас. % (вуз. 19, II), та  $x_1(\text{pH}) < 5,5$  (вуз. 37, I), то КТП = 44 °С (вуз. 56). Це узгоджується з даними праць [12, 39, 40], але в них не встановлено роль міді у пітінготривкості цього сплаву. Розроблена математична модель, яка ґрунтується на деревах регресії, показала, що Cu впливає на опір пітінговій корозії сплаву. Зокрема, згідно із залежностями  $x_1(\text{pH}) \geq 6,5$  (вуз. 2, II), то  $x_2(\text{Cl}^-) < 450$  мг/л (вуз. 5, I), то  $x_{12}(\text{Cu}) < 2,65$  мас. % (вуз. 10, I), то  $x_1(\text{pH}) < 7,5$  (вуз. 20, I), то КТП = 52,75 °С (вуз. 38) та  $x_{12}(\text{Cu}) \geq 2,65$  мас. % (вуз. 10, II), то  $x_2(\text{Cl}^-) < 375$  мг/л (вуз. 21, II), то  $x_1(\text{pH}) < 7,5$  (вуз. 40, I), то КТП = 57 °С (вуз. 58). Можна відзначити, що зі зниженням рН і концентрації хлоридів в модельних оборотних водах, збільшенням вмісту Cu в сплаві 06ХН28МДТ від 2,65 до 2,78

мас. % його КТП підвищується на 4,25 °С. Це узгоджується з даними [17], оскільки хромопіднікельмолібденові сплави додатково легують Cu для підвищення їх корозійної тривкості в розчинах кислот.

Узагальнюючи вищевказане, можна зазначити, що в модельних оборотних водах з рН від 4,5 до 7,5 і концентрацією хлоридів до 600 мг/л КТП сплаву 06ХН28МДТ практично стала і, в середньому становить 48,3 °С. Це зумовлено впливом щільної оксидної плівки на його поверхні, яка складається з моношару атомів Cr і Mo. За таких умов випробувань вплив вмісту Mo на КТП сплаву мінімальний, що пов'язано, в основному, зі зниженням розчинності металу в пітінгах. Але при мінімальному вмісті Mn в сплаві до 0,36 і Cr до 21,82 мас. % (табл. 1) спостережено зниження його КТП на 10 °С, що найвірогідніше, зумовлено сприянням Mn твердофазній дифузії атомів Cr до оксидної плівки на його поверхні. В слабкислих модельних оборотних водах з рН 4 і 5 практично не залежно від концентрації хлоридів проявляється негативний вплив Ti, Mo, Si, Mn і С не розчинених в твердому розчині аустеніту сплаву, що пов'язано з випадінням карбідної фази із цих металів в околі нітридів титану і позитивна Cu, який сприяє зсуванню потенціалу сплаву в додатний бік у кислих середовищах. У слаболужних модельних оборотних водах з рН > 7,5 не залежно від концентрації у них хлоридів та вмісту цих хімічних елементів у сплаві його КТП підвищується до 59 °С.

## Висновки

За результатами аналізу розробленої математичної моделі, яка ґрунтується на деревах регресії встановлено, що в слабкислих модельних оборотних водах з рН < 4,5 практично не залежно від концентрації хлоридів в інтервалі від 350 до 600 мг/л, КТП сплаву 06ХН28МДТ мінімальні ( $\approx 39$  °С), що зумовлено зниженням перенапряги іонізації водню на карбідній фазі в околі нітридів титану, де зароджуються і розвиваються пітінги. З'ясовано, що в модельних оборотних водах з такими параметрами КТП сплаву знижуються до мінімальних значень зі збільшенням у ньому вмісту Si та зниженням Cu. Це зумовлено тим, що Si сприяє випадінню карбідної фази (Cr, Mo, Ti, Si) із твердого розчину аустеніту в околі нітридів титану і сприянням зсуванню потенціалу сплаву міддю у додатний бік у кислих середовищах. Виявлено, що в модельних оборотних водах з рН від 4,5 до 7,5 і концентрацією хлоридів 650...600 мг/л КТП сплаву стала і, в середньому, становить 48,3 °С. Це зумовлено протидією пітінгуванню Cr, Mo-вмісної оксидної плівки, яка складається, в основному, з моношару атомів Cr за такої його концентрації (21,82-24,29 мас. %). Але за мінімального вмісту Cr і Mn (до 0,36 мас. %) в сплаві його КТП може знижуватися на 10 °С за таких умов випробувань, що може бути зумовлено впливом Mn на твердофазну дифузію атомів Cr до оксидної плівки. Показано, що в слаболужних модельних оборотних

водах з  $\text{pH} > 7,5$  КТП сплаву 06ХН28МДТ максимальні (до 59 °С), що пов'язано зі зниженням адсорбції хлоридів в околі нітридів титану, де зароджуються пітинги.

#### Список літератури

1. Чехов А. П. Корозійна стійкість матеріалів. Довідник / Чехов А. П. – Д. : Промінь, 1980. – 190 с.
2. Torres С.Е.А.С. Corrosion failures of austenitic and duplex stainless steels in a biodiesel plant / С.Е.А.С. Torres, Т.Е. Santos, V.F.C. Lins // *Revista Materia*. – 2020. – Vol. 25. – No. 2. – P. 25–36. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1020>.
3. Нарівський О. Е. Корозійне руйнування пластинчастих теплообмінників / Нарівський О. Е. // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2005. – № 1. – С. 104–108.
4. Snizhnoi G. V. Dependence of the corrosion behavior of austenitic chromium-nickel steels on the paramagnetic state of austenite / G. V. Snizhnoi // *Materials Science*. – 2013. – Vol. 49, No. 3. – P. 341–346. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9620-4>
5. Нарівський О. Е. Мікромеханізм корозійного руйнування пластин, теплообмінників / О. Е. Нарівський // *Фізико-хімічна механіка матеріалів*. – 2007, (43) 1. – С. 124–132.
6. Нарівський О. Е. Корозійні процеси та швидкість підростання пітингів сталей AISI304 та 08Х18Н10Т в модельних оборотних водах / О. Е. Нарівський, Н. А. Солідор // *Вісник Приазовського державного технічного університету, серія технічні науки*. – 2011. – 23. – № 2. – С. 87–97.
7. Математичне моделювання пітинготривкості теплообмінників зі сплаву 06ХН28МДТ в оборотних водах / А. В. Джус, О. Е. Нарівський, С. Б. Беліков и др. // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2023. – № 3. – С. 45–52. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-3-7>
8. Нарівський О. Е. Кінетика корозійних процесів та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у слабких хлоридовмісних середовищах / Нарівський О. Е. // *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник, Луцьк*. – 2011. – № 31. – С. 214–220.
9. Ar-implantation on AISI 304 stainless steel against pit initiation processes / L. Martínez, B. Malki, G. Berthomé et al. // *Surface and Coatings Technology*. – 2006, 201(3–4). – P. 1671–1678. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.042>
10. Нарівський О. Е. Закономірності і механізми локальної корозії корозійнотривких сталей і сплаву аустенітного класу для емнісної та теплообмінної апаратури : дис. доктора техн. наук : 05.17.14 / Нарівський Олександр Едуардович. – 2015. – 456 с.
11. Нарівський О. Е. Оцінка стійкості сплаву 06ХН28МДТ до пітингової та щільної корозії в хлоридовмісних середовищах / О. Е. Нарівський, С. Б. Беліков // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2007. – № 2. – С. 45–53.
12. Narivs'kyi O. E. Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media / O. E. Narivs'kyi, S. B. Belykov // *Materials Science*. – 2008. – Vol. 44, No. 4. – P. 573–580. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9107-5>
13. Narivs'kyi O.E. Influence of alloying elements and structural heterogeneity of AISI 321 steel on selective dissolution of metals from pittings / O.E. Narivs'kyi, G.S. Yar-Mukhamedova // *Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University. Physics Series*. – 2016, (56) № 1. – P. 86–97.
14. Наривский А. Э. Характерные особенности селективного растворения питтингов на поверхности стали AISI 321 в модельных оборотных водах / А. Э. Наривский, С. Б. Беликов // *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. – 2015. – № 1. – С. 24–31. <https://doi.org/10.15588/v0i1.98905>
15. Freedman O.A. *Statical models : theory and practice* // Cambridge University Press. 2005. – 458 p.
16. Фрейман Л. И. Влияние никеля и включений MnS в металле на питтинговую коррозию низкоуглеродистых нержавеющей сталей / Л. И. Фрейман, Т. Д. Нгуен, Д. Е. Волков // *Защита металлов*. – 1986, 22(5). – С. 71–720.
17. Vauccio, M. (Ed.). *ASM metals reference book* / Vauccio, M. (Ed.) // ASM international. – 1993. – 2521 с.
18. Нарівський О. Е. Закономірності корозійного розчинення та швидкість пітингування сплаву 06ХН28МДТ у нейтральних хлоридовмісних розчинах / Нарівський О. Е. // *Наукові нотатки. Міжвузівський збірник, Луцьк*. – 2011. – № 32. – С. 255–261.
19. Герасимов В. В. Прогнозирование коррозии металлов / В. В. Герасимов // *М. : Металлургия*, 1989. – 151с.
20. Snizhnoi V. Determining the role of individual and combined chemical elements in the pitting corrosion process of austenitic Fe-Cr-Ni steels / V. Snizhnoi, G. Snizhnoi, S. Stepanenko // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. – 2022. – Vol. 3, No. 12 (117). – P. 13–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257841>
21. The composition of the boundary region of MnS inclusions in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion / P. Schmuki, H. Hildebrand, A. Friedrich, S. Virtanen // *Corrosion Science*. – 2005, Volume 47, Issue 5. – P. 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.023>
22. Webb E. G. Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel. Part III. Mathematical model / E. G. Webb, R. C. Alkire // *Journal of The Electrochemical Society*. – 2002, 149(6). – B286-B295. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1474432>
23. Vannevik H. Effect of Elemental Partitioning on Pitting Resistance of High Nitrogen Duplex Stainless Steels / H. Vannevik, J. Nilsson, P. Kangas // *Materials Science, Engineering*. – 1996, Vol. 36, Issue 7. – P. 807–812. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.807>
24. Weber L. Partitioning of chromium and molybdenum in super duplex stainless steels with respect to nitrogen and nickel content / L. Weber, P.J. Uggowitzer //

Materials Science and Engineering: A. – 1998, Vol. 242, Issue 1–2. – P. 222–229. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00521-2)

25. Tsuge H. Corrosion resistance of super duplex stainless steel in chloride ion / H. Tsuge, Y. Tarutani, T. Codo // Corrosion. – 1988, Vol. 4, No. 5. – P. 305–314.

26. Why stainless steel corrodes / M. P. Ryan, D. E. Williams, R. J. Chater et al. // Nature. – 2002, Vol. 415. – P. 770–774. <https://doi.org/10.1038/415770a>

27. Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions / A. Pardo, M. C. Merino, A. E. Coy et al. // Corrosion Science. – 2008, Vol. 50, Issue 6. – P. 1796–1806. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.005>

28. Williams D. E. Elucidation of a Trigger Mechanism for Pitting Corrosion of Stainless Steels Using Sub-micron Resolution Scanning Electrochemical and Photoelectrochemical Microscopy / D. E. Williams, T. F. Mohiuddin, Y. Y. Zhu // Journal of The Electrochemical Society. – 1998, Vol. 145, No. 8. – P. 2664–2672.

29. Pistorius, P. C. Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate / P.C. Pistorius, G.T. Burstein // Corrosion science. – 1992, 33(12). – P. 1885–1897. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90191-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90191-5)

30. Abd El Meguid E.A The effect of some sulphur compounds on the pitting corrosion of type 304 stainless steel / E.A Abd El Meguid, N.A Mahmoud, S.S Abd El Rehim // Materials Chemistry and Physics. – 2000, Vol. 63, Issue 1. – P. 67–74. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00206-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00206-0)

31. Laycock N. J. Metastable Pitting and the Critical Pitting Temperature / N. J. Laycock, M. H. Moayed, R. C. Newman // Journal of The Electrochemical Society. – 1998, Vol. 145, No. 8. – P. 2622–2628. <https://doi.org/10.1149/1.1838691>

32. Нарівський О. Е. Вплив гетерогенності сталі AISI321 на її пітінгування у хлоридовмісному середовищі / Нарівський О. Е. // Фізико-хімічна механіка матеріалів. – 2007, № 2. – С. 100–106.

33. Narivskiy A. E. Determination of pitting resistance steel AISI 321 in chloride-containing environments is present in the heat-exchanger / Narivskiy A. E. // Physicochemical mechanics of materials. Special Issue. – 2006. – No. 5. – P. 316–320.

34. О механизме повышения питтингостойкости нержавеющей сталей добавками в них молибдена / Я. М. Колотыркин, Л. И. Фрейман, И. И. Реформатская, Е. А. Панышин // Защита металлов. – 1994, 30(5). – С. 453–462.

35. Alonso C. Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements / C. Alonso, M. Castellote, C. Andrade // Electrochimica Acta. – 2002, 47(21). – P. 3469–3481. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00283-9](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00283-9)

36. Колотыркин Я. М. Металл и коррозия / Я. М. Колотыркин. – М. : Металлургия, 1985. – 88 с.

37. Dzhus A. Prediction the durability of heat exchangers made of 06KhN28MDT alloy (analogous to AISI904L steel) to crevice corrosion during their operation in recycled water / A. Dzhus, G. Snizhnoi // Physical Sciences and Technology. – 2023. – Vol. 10. – N (3–4). – P. 57–67. <https://doi.org/10.26577/phst.2023.v10.i2.07>

38. Wranglen G. Pitting and sulphide inclusions in steel / G. Wranglen // Corrosion Science. – 1974, Vol. 14, Issue 5. – P. 331–349. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(74\)80047-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(74)80047-8)

39. Evaluation and prediction of pitting resistance of heat exchangers made of alloy 06KhN28MDT (similar to AISI904L steel) to crevice corrosion / A. Dzhus, S. Subbotin, T. Pulina et al. // Book Proceedings of 23rd International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023. – 2023, Vol. 23, No. 6.1. – P. 25–34. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/6.1/s24.03>

40. Snizhnoi G. Dependence of corrosion resistance of austenitic chromium-nickel steels on the magnetic state of austenite: monograph. ISBN 978-1-80355-133-3 / G. Snizhnoi // Published: IntechOpen, London, UK. 2022, 23 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102388>

Одержано 12.02.2024

## PATTERNS AND MECHANISMS OF PITTING OF 06XH28МДТ ALLOY (ANALOGUE OF AISI 904L STEEL) IN MODEL RECYCLED WATER OF ENTERPRISES

- Dzhus A. Assistant of the “Physical Materials Science” department, of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [anna-92@ukr.net](mailto:anna-92@ukr.net), ORCID: 0000-0002-6474-0732
- Narivskiy O. Dr. Sc., Technical Director of Ukrspetsmash LLC, Berdiansk, Ukraine, *e-mail*: [amz309@ukr.net](mailto:amz309@ukr.net), ORCID: 0000-0002-5608-1474
- Snizhnoi G. Dr. Sc., Professor, Professor of the Department of Information Security and Nanoelectronics, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [snow@zp.edu.ua](mailto:snow@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0003-1452-0544
- Byelikov S. Dr. Sc., Professor of National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [belikov@zp.edu.ua](mailto:belikov@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0002-9510-8190

- Subbotin S. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of software tools, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [subbotin.csit@gmail.com](mailto:subbotin.csit@gmail.com), ORCID: 0000-0001-5814-8268
- Pulina T. Dr. of Ec. Sc., Professor, Head of the Department of Management, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [pulinatv@ukr.net](mailto:pulinatv@ukr.net), ORCID: 0000-0002-2672-8281

**Purpose.** The aim of the study is to establish the patterns and mechanisms of pitting of the 06XH28MДТ alloy in model recycled waters with a pH of 4-8 and a chloride concentration of 350 up to 600 mg/l, which are most often used in industrial enterprises.

**Research methods.** A mathematical model based on regression trees to establish the relationship between the critical pitting temperatures (CPT) of the 06XH28MДТ alloy and its chemical composition, structure components, and parameters of model recycled water (pH, chloride concentration) has been developed. Metallographic analysis, energy dispersion analysis, regression analysis.

**Results.** Based on the results of the analysis of the developed mathematical model, chemical composition, structural heterogeneity of the alloy, and known literature data, it was found that in model recycled waters with a pH of 4.5 up to 7.5, the CPT of the 06XH28MДТ alloy has a constant value of about 48.3 °C, which does not depend on its chemical composition, structural components, and chloride concentration in the model recycled waters. In model recycled waters with a chloride concentration of 350 up to 600 mg/l, the alloy's CPT increases, on mean, to 59 °C, with an increase in their pH from 7.5 up to 8, but it decreases to 39 °C, with its decrease from 5 to 4. It has been found that the pH of the media has a more significant effect on the CPT of the alloy than the concentration of chlorides in it. It was found that the pH of the media has a more significant effect on the CTE of the alloy than the concentration of chlorides in it.

**Scientific novelty.** Based on the established patterns between the critical pitting temperatures of the 06XH28MДТ alloy and its chemical composition, structure components, and parameters of recycled water, the mechanisms of its pitting has been determined, in particular, in low acidic media with pH 4.5, its CPT is minimal, which is due to a decrease in the hydrogen ionisation overvoltage on the carbide phase (Cr, Mo, Ti, Si, Mn, C) in the vicinity of titanium nitrides, where pitting occurs, and in close to neutral model recycled waters, the alloy's CPT is higher in a wide pH range, which is associated with the formation of an oxide film from a monolayer of Cr atoms on its surface due to its solid-phase diffusion under the influence of Mn, but in low alkaline model recycled waters, the alloy's CPT is the highest, which is due to a decrease in the activity of chlorine ions and their adsorption on the imperfections of the alloy structure.

**Practical value.** The developed mathematical models are proposed to be applied to the selection of the most resistant melts to pitting in recirculating industrial waters of the alloy 06KhN28MDT melts and prediction of its pitting during the operation of heat exchangers.

**Key words:** 06XH28MДТ alloy, corrosion, pitting resistance, circulating water, heat exchange equipment, structural heterogeneity, critical pitting temperature.

## References

1. Chekhov, A. P. (1980). Koroziiina stiikist materialiv [Corrosion resistance of materials]: Dovidnyk, Promin.
2. Torres, C. E. A. S., Santos, T. E., & Lins, V. F. C. (2020). Corrosion failures of austenitic and duplex stainless steels in a biodiesel plant. *Revista Materia*, 25(2), 25-36. <https://doi.org/10.1590/S1517-707620200002.1020>
3. Narivskiy, O. E. (2005). Koroziiine ruinovannia plastynchastykh teploobminnykiv [Corrosion damage of plate-like heat exchangers]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 1, 104-108.
4. Snizhnoi, G. V. (2013). Dependence of the corrosion behavior of austenitic chromium-nickel steels on the paramagnetic state of austenite. *Materials Science*, 49, 3, 341-346. <https://doi.org/10.1007/s11003-013-9620-4>
5. Narivskiy, O. E. (2007). Mikromekhanizm koroziiinoho ruinovannia plastyn teploobminnykiv [Micromechanism of corrosion destruction of heat exchanger plates]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 43(1), 124-132.
6. Narivskiy, O. E., & Solidor, N. A. (2011). Koroziiini protsesy ta shvydkist pidrostannia pitinhiv stalei AI-SI304 ta 08Kh18N10T v modelnykh oborotnykh vodakh [Corrosion processes and pitting growth rate of AISI304 and 08X18H10T steels in model circulating waters]. *Visnyk Pryazovskoho derzhavnogo tekhnichnoho universytetu, seriia tekhnichni nauky*, 23(2), 87-97.
7. Dzhus, A. V., Narivskiy, O. E., Bielikov, S. B., Subbotin, S. O., Pulina, T. V., & Leoshchenko, S. D. (2023). Matematychni modeliuvannia pitynotryvkosti teploobminnykiv zi splavu 06KhN28MDT v oborotnykh vodakh [Mathematical modelling of pitting resistance of heat exchangers made of 06KhN28MDT alloy in circulating waters]. *Novi materialy i tekhnolohii v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 3, 45-52. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-3-7>
8. Narivskiy, O. E. (2011). Kinetyka koroziiinykh protsesiv ta shvydkist pitinhuvannia splavu 06KhN28MDT u slabokyslykh khlorodyovmisnykh



seredovyshchakh [Kinetics of corrosion processes and pitting rate of 06KhN28MDT alloy in low-acid chloride-containing media]. *Naukovi notatky. Mizhvuzivskyi zbirnyk, Lutsk*, 31, 214–220.

9. Martínez, L., Malki, B., Berthomé, G., Baroux, B., & Pérez, F. J. (2006). Ar-implantation on AISI 304 stainless steel against pit initiation processes. *Surface and Coatings Technology*, 201(3–4), 1671–1678. <https://doi.org/10.1016/j.surfcoat.2006.02.042>

10. Narivskiy, O. (2015). Patterns and mechanisms of local corrosion of co-corrosion-resistant steels and austenitic alloy for capacitive and heat exchange equipment [Zakonomirnosti i mekhanizmy lokalnoi korozii ko-roziinotryvkykh stalei i splavu austenitnoho klasu dlia yemnisnoi ta teploobminnoi aparatury] [Doctor thesis], Karpenko FMI, 456.

11. Narivskiy, O. E., & Bielikov, S. B. (2007). Otsinka stiikosti splavu 06KhN28MDT do pitynhovoi ta shchilyn-noi korozii v khlorydovmisnykh seredovyshchakh [Evaluation of 06KhN28MDT alloy resistance to pitting and crevice corrosion in chloride-containing media]. *Novi materialy i tekhnologii v metalurhii ta mashynobudu-vanni*, 2, 45–53.

12. Narivs'kyi, O. E. (2008). Pitting resistance of 06KhN28MDT alloy in chloride-containing media. *Materials Science*, 44(4), 573–580. <https://doi.org/10.1007/s11003-009-9107-5>

13. Narivs'kyi, O. E., & Yar-Mukhamedova, G. S. (2016). Influence of alloying elements and structural heterogeneity of AISI 321 steel on selective dissolution of metals from pittings. *Bulletin of Al-Farabi Kazakh National University. Physics Series*, 56(1), 86–97.

14. Narivskij, A. E., & Belikov, S. B. (2015). Harakternye osobennosti selektivnogo rastvoreniya pittingov na poverhnosti stali AISI 321 v modelnykh oborotnykh vodakh [Characteristic features of selective dissolution of pittings on the surface of AISI 321 steel in model circulating waters]. *Novi materialy i tekhnologiyi v metalurhii ta mashynobuduvanni*, 1, 24–31. <https://doi.org/10.15588/v0i1.98905>

15. Freedman, O. A. (2005). *Statical models: theory and practice*. Cambridge University Press.

16. Frejman, L. I., Nguen, T. D., & Volkov, D. E. (1986). Vliyanie nikelya i vklyuchenij MnS v metalle na pittingovuyu korroziyu nizkouglerodistykh nerzhaveyushih stalej [Effect of nickel and MnS inclusions in metal on pitting corrosion of low-carbon stainless steels]. *Zashita metallov*, 22(5), 716–720.

17. Bauccio, M. (Ed.). (1993). *ASM metals reference book*. ASM international.

18. Narivskiy, O. E. (2011). Zakonomirnosti korozinoho rozchynennia ta shvydkist pitinhuvannia splavu 06KhN28MDT u neitralnykh khlorydovmisnykh rozchynakh [Corrosion dissolution patterns and pitting rate of 06HN28MDT alloy in neutral chloride-containing solutions]. *Naukovi notatky. Mizhvuzivskyi zbirnyk, Lutsk*, 32, 255–261.

19. Gerasimov, V. V. (1989). Prognozirovanie korrozii metallov [Prediction of metal corrosion]. *Metal-lurgiya*.

20. Snizhnoi, V., Snizhnoi, G., & Stepanenko, S. (2022). Determining the role of individual and combined chemical elements in the pitting corrosion process of austenitic Fe-Cr-Ni steels. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 3(12), 13–19. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2022.257841>

21. Schmuki, P., Hildebrand, H., Friedrich, A., & Virtanen, S. (2005). The composition of the boundary region of MnS inclusions in stainless steel and its relevance in triggering pitting corrosion. *Corrosion Science*, 47(5), 1239–1250. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2004.05.023>

22. Webb, E. G., & Alkire, R. C. (2002). Pit initiation at single sulfide inclusions in stainless steel. Part III. Mathematical model. *Journal of The Electrochemical Society*, 149(6), B286–B295. <http://dx.doi.org/10.1149/1.1474432>

23. Vannevik, H., Nilsson, J., & Kangas, P. (1996). Effect of Elemental Partitioning on Pitting Resistance of High Nitrogen Duplex Stainless Steels. *Materials Science, Engineering*, 36(7), 807–812. <https://doi.org/10.2355/isijinternational.36.807>

24. Weber, L., & Uggowitzer, P. J. (1998). Partitioning of chromium and molybdenum in super duplex stainless steels with respect to nitrogen and nickel content. *Materials Science and Engineering: A*, 242(1–2), 222–229. [https://doi.org/10.1016/S0921-5093\(97\)00521-2](https://doi.org/10.1016/S0921-5093(97)00521-2)

25. Tsuge, H., Tarutani, Y., & Codo, T. (1988). Corrosion resistance of super duplex stainless steel in chloride ion. *Corrosion*, 4(5), 305–314.

26. Ryan, M. P., Williams, D. E., Chater, R. J., Hutton, B. M., & McPhail, D. S. (2002). Why stainless steel corrodes. *Nature*, 415, 770–774. <https://doi.org/10.1038/415770a>

27. Pardo, A., Merino, M. C., Coy, A. E., Viejo, F., Arrabal, R., & Matykin, E. (2008). Pitting corrosion behaviour of austenitic stainless steels – combining effects of Mn and Mo additions. *Corrosion Science*, 50(6), 1796–1806. <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2008.04.005>

28. Williams, D. E., Mohiuddin, T. F., & Zhu, Y. Y. (1998). Elucidation of a Trigger Mechanism for Pitting Corrosion of Stainless Steels Using Submicron Resolution Scanning Electrochemical and Photoelectrochemical Microscopy. *Journal of The Electrochemical Society*, 145(8), 2664–2672.

29. Pistorius, P. C., & Burstein, G. T. (1992). Growth of corrosion pits on stainless steel in chloride solution containing dilute sulphate. *Corrosion science*, 33(12), 1885–1897. [https://doi.org/10.1016/0010-938X\(92\)90191-5](https://doi.org/10.1016/0010-938X(92)90191-5)

30. Abd El Meguid, E. A., Mahmoud, N. A., & Abd El Rehim, S. S. (2000). The effect of some sulphur compounds on the pitting corrosion of type 304 stainless steel. *Materials Chemistry and Physics*, 63(1), 67–74. [https://doi.org/10.1016/S0254-0584\(99\)00206-0](https://doi.org/10.1016/S0254-0584(99)00206-0)

31. Laycock, N. J., Moayed, M. H., & Newman, R. C. (1998). Metastable Pitting and the Critical Pitting Temperature. *Journal of The Electrochemical Society*, 145(8), 2622-2628. <https://doi.org/10.1149/1.1838691>
32. Narivskiy, O.E. (2007). Vplyv heterohennosti stali AISI321 na yii pitinhuvannya u khlorodyovmisnomu sere-dovyshchi [Influence of AISI321 steel heterogeneity on its pitting in a chloride-containing media]. *Fizyko-khimichna mekhanika materialiv*, 2, 100–106.
33. Narivskiy, A.E. (2006). Determination of pitting resistance steel AISI 321 in chloride-containing environments is present in the heat-exchanger. *Physicochemical mechanics of materials. Special Issue*, 5, 316–320.
34. Kolotyrykin, Ya. M., Frejman, L. I., Reformatskaya, I. I., & Panshin, E. A. (1994). O mehanizme povysheniya pittingostojkosti nerzhavayushih stalej do-bavkami v nih molibdena [On the mechanism of increasing pitting resistance of stainless steels by molybdenum additives in them]. *Zashita metallov*, 30(5), 453–462.
35. Alonso, C., Castellote, M., & Andrade, C. (2002). Chloride threshold dependence of pitting potential of reinforcements. *Electrochimica Acta*, 47(21), 3469–3481. [https://doi.org/10.1016/S0013-4686\(02\)00283-9](https://doi.org/10.1016/S0013-4686(02)00283-9)
36. Kolotyrykin, Ya.M. (1985). *Metall i korroziya* [Metal and corrosion], Metallurgiya.
37. Dzhus, A., & Snizhnoi, G. (2023). Prediction the durability of heat exchangers made of 06KhN28MDT alloy (analogous to AI-SI904L steel) to crevice corrosion during their operation in recycled water. *Physical Sciences and Technology*, 10(3-4), 57–67. <https://doi.org/10.26577/phst.2023.v10.i2.07>
38. Wranglen, G. (1974). Pitting and sulphide inclusions in steel. *Corrosion Science*, 14(5), 331-349. [https://doi.org/10.1016/S0010-938X\(74\)80047-8](https://doi.org/10.1016/S0010-938X(74)80047-8)
39. Dzhus, A., Subbotin, S., Pulina, T., Leoshchenko, S., & Snizhnoi, G. (2023). Evaluation and prediction of pitting resistance of heat exchangers made of alloy 06KhN28MDT (similar to AISI904L steel) to crevice corrosion. *Book Proceedings of 23rd International Multi-disciplinary Scientific GeoConference SGEM 2023*, 23(6.1), 25–34. <https://doi.org/10.5593/sgem2023/6.1/s24.03>
40. Snizhnoi, G. (2022). Dependence of Corrosion Resistance of Austenitic Chromium-Nickel Steels on the Magnetic State of Austenite. Published: IntechOpen, London, UK. 23 p. <https://doi.org/10.5772/intechopen.102388>

УДК 621.431

- Слинько Г. І. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gslynko@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Беженів С. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: bezhenov@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-7329-356X
- Бокарьов В. І. магістр, старший лаборант кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vladislavmontoya@gmail.com, ORCID: 0000-0001-7675-8094
- Слинько В. В. старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: vslynko@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0002-4553-8387
- Шемет І. В. магістр, Національний університет «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: shemetttttt8@gmail.com

## ПРО ВПЛИВ ФОРМИ КАМЕР ЗГОРАННЯ ДИЗЕЛЬНОГО ДВИГУНА НА ЙОГО ЕФЕКТИВНІ ПОКАЗНИКИ

**Мета роботи.** Підвищення ефективних показників роботи дизельного двигуна за рахунок покращення перебігу теплових процесів в камері згорання, зокрема, зменшення часу утворення робочої суміші.

**Методи дослідження.** Фізико-математична модель розрахунку робочого циклу ДВЗ другого рівня у другій модифікації – як основа обчислювального експерименту, а також планування багатофакторного експерименту на основі моделей першого та другого порядків. Обчислювальні розрахунки згідно наведеної моделі проводилися за програмою Engine Calculation, в якій реалізовано модифікований метод Ейлера.

**Отримані результати.** Досліджено вплив форми камер згорання дизельного двигуна на його ефективні показники. Показано, що коригування форми поршня (коригування профілю його днища), має прямий вплив на процеси сумішоутворення і згорання, що позначається на показниках роботи двигуна, таких, як економічність та потужність. Побудовано план експериментальних досліджень, на основі якого в результаті теплового розрахунку одержано залежності ефективних показників двигуна від досліджуваних параметрів.

**Наукова новизна.** Вперше на основі багатофакторного експерименту проаналізовано з ефектом взаємодії вплив на ефективні показники роботи дизельного двигуна таких факторів як відносна площа теплообміну поршня та показник характеру згорання. Доведено, що співвідношення  $F_n'/F_n = 1,3$  із величиною показника характеру згорання  $m_1 = 0,4$  є оптимальним для забезпечення ефективних показників роботи дизельного двигуна.

**Практична цінність.** Запропоновано модернізацію форми камери згорання існуючого двигуна, яка дає можливість підвищити його індикаторний к.к.д при зменшенні питомої індикаторної витрати палива, можна застосувати на дизельних двигунах аналогічного класу.

**Ключові слова:** багатофакторний експеримент, двигун внутрішнього згорання, дизель, камера згорання, робочий процес, план експериментальних досліджень.

### Вступ

На даний момент дизельні двигуни є основним типом рушія для вантажних автомобілів, автобусів, суден, тепловозів, сільськогосподарської техніки. Така роль дизелів зумовлена особливостями роботи (порівняно невисокі оберти, великий крутний момент, низька питома витрата палива). Для дослідження обрано дизельний двигун Д-245, який випускається з 1984 р. та головним чином застосовується на вантажних автомобілях та тракторній техніці. Рядний чотирициліндровий силовий агрегат в модифікації 7E2 має збільшені розміри (робочий об'єм 4,75 л, що дозволяє розвивати потужність в 105 к. с.) і масу близько 700 кг. У 2016 р. на підприємстві-виробнику

пройдено сертифікацію двигуна Д-245.35E5, що відповідає європейським екологічним стандартам Євро-5 [1–4]. Використання посиленних силових елементів і перевірена часом досить проста конструкція цього двигуна дозволили істотно підвищити моторесурс. Проте, слід зазначити і такі негативні моменти: показники потужності недостатні для такого об'єму, і доказом цього є факти, що в дійсності цей двигун не забезпечує бажану тягу важким вантажним автомобілям. Ще одним безперечним недоліком цього мотора є низька паливна економічність.

### Аналіз досліджень та публікацій

Вибір камери згоряння впливає на протікання робочого процесу [5–7], перш за все – на процес згоряння палива. Зміна поверхні камери згоряння викликає зміну зони гасіння хімічних реакцій згоряння, змінюються інтенсивність вихрового руху й турбулізації заряду. Від форми камери згоряння залежить ступінь стиснення, а ця величина, в свою чергу, впливає на ефективну витрату палива та ККД двигуна в цілому. На двигуні Д-245 встановлена одна з найбільш поширених камер згоряння, нероздільного типу трапецеїдальної форми з розміщенням в поршні (рис. 1).

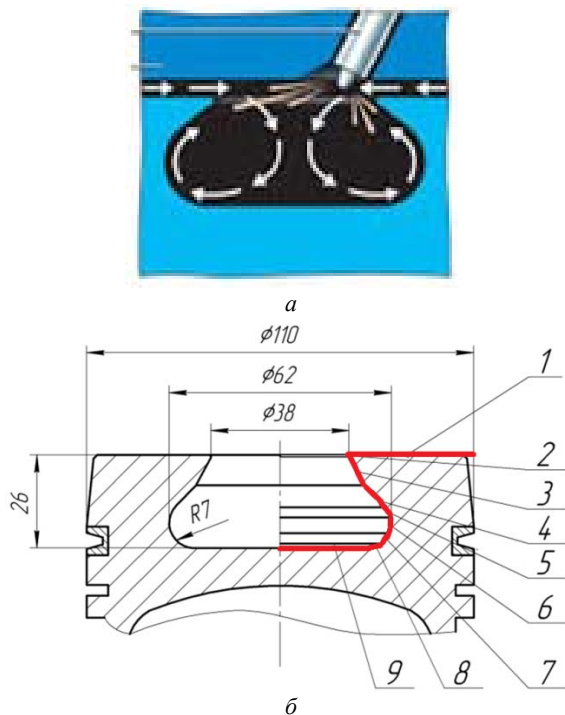


Рисунок 1. Камера згоряння двигуна Д-245:

а – схема потоків робочої суміші; б – схема визначення площі теплообміну

В таких двигунах повітря в циліндрі підводиться через впускні канали, що мають тангенціальне розташування відносно камер згоряння, цим досягається додаткове завихорення повітря в процесі впускання. Основний об'єм камери згоряння знаходиться у впадині в середній частині поршня. При русі поршня вгору повітря з надпоршневого простору витісняється в камеру, розташовану в поршні. Це створює стійкі вихори усередині камери (рис. 1а). Впорскування палива в даному типі конструкції відбувається безпосередньо у камеру згоряння. Основна маса палива, що упорскує форсункою, потрапляє на стінки камери і покриває їх тонкою плівкою. Цей вид камери згоряння має як ряд переваг так і недоліків, головним з яких є не самий високий показник сумішоутворення при зростанні обертів,

внаслідок чого це погіршує ряд показників двигуна в цілому.

Площа теплообміну поршня  $F_n'$  (рис. 1б) для такої форми камери згоряння відрізняється від площі поршня  $F_n$ . Для базової модифікації двигуна Д-245 співвідношення  $F_n' / F_n = 1,68$ . Зміна відносної площі форми теплообміну поршня ( $F_n' / F_n$ ) камери згоряння призведе до зміни в процесах утворення робочої суміші, зокрема, до зміни часу затримки згоряння та характеру його протікання. Так при оптимальній конфігурації форми, зміниться час затримки згоряння та характер його протікання.

Важливою характеристикою також є показник характеру згоряння  $m_1$ , який згідно рекомендацій [8–10] для дизельних двигунів може змінювати своє значення в діапазоні від  $-0,3$  до  $+0,7$ . Фізична суть цього показника, виходячи з літературних джерел, залишається досить незрозумілою. Проте, вплив даного показника в розширеному діапазоні на робочі параметри дизеля був розглянутий та досліджений в працях професора І. І. Вібе. Зокрема, було встановлено, що цей показник оцінює характер розвитку процесу згоряння в часі, тобто в математичному вигляді, вказує на величину часу, при якому швидкість згоряння має максимум. Також було зазначено, що від показника  $m_1$  прямо залежить показник затримки згоряння.

Таким чином, з вищенаведеного аналізу випливає, що існує можливість оптимізувати форму камери згоряння, яка буде мати меншу площу теплообміну та водночас забезпечить якісне сумішоутворення [11–14]. Параметрами, які підлягають зміні в процесі досліджень обрано відносну площу теплообміну поршня  $F_n' / F_n$ , яку планується варіювати в межах від 1,2 до 2,0, та показник характеру згоряння  $m_1$  з дослідницьким діапазоном варіювання від 0 до 2,0.

### Мета і задачі дослідження

Основною метою дослідження є підвищення ефективних показників роботи дизельного двигуна за рахунок покращення перебігу теплових процесів в камері згоряння, зокрема, зменшення часу утворення робочої суміші.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити ряд завдань:

- проаналізувати особливості робочих процесів, що протікають в циліндрі дизельного двигуна;
- визначити фактори, що формують безпосередньо процес згоряння і можуть мати суттєвий вплив на показники роботи дизеля;
- побудувати оптимальний план експериментальних досліджень;
- провести тепловий розрахунок дизельного двигуна з варіацією обраних факторів.

Об'єктом дослідження є процеси, які забезпечують ефективне перетворення теплової енергії згоряння палива у механічну роботу дизельного двигуна.

Предметом дослідження є способи підвищення ефективності роботи камери згорання двигуна Д-245.

### Матеріал і методика досліджень

Дослідження функціонування в натурних умовах таких технічно-складних систем, якими є двигуни внутрішнього згорання, у багатьох випадках є складним і дуже дорогим. Тому на стадії прийняття рішень щодо доцільності тих чи інших конструкторсько-технологічних змін часто застосовують такий метод наукового пізнання як моделювання. Моделювання технічних об'єктів здебільшого відбувається базуючись на емпіричному підході, який потребує організації експериментальних досліджень. Широкого застосування здобув обчислювальний експеримент, в ході якого на основі математичної моделі досліджуваного об'єкта здійснюють оцінювання його поведінки в різних умовах чи модифікаціях. При цьому важливим етапом стає раціональне планування експериментальних досліджень.

Одержати значення ефективних показників роботи двигуна можна на основі його теплового розрахунку, який, в свою чергу, ґрунтується на відповідній фізико-математичній моделі (ФММ) другого рівня [15] у другій модифікації, коли вплив зміни складу враховується приблизно: у процесах впуску і стиснення робочим тілом вважається повітря, а в процесах розширення і випуску – продукти згорання. Крім того, в цій моделі розрахунок виконують для основних процесів (стиснення, згорання, розширення) при зміні кута повороту кривошипа  $\varphi$  в межах від  $180^\circ$  до  $540^\circ$  для чотиритактного двигуна. Вплив процесів при впуску і випуску враховано сумарно за статистичними даними.

Дана ФММ описується системою (1), яка складається із звичайних нелінійних диференціальних рівнянь зі змінними коефіцієнтами і розв'язується чисельними методами.

$$\left. \begin{aligned} dV &= F_n r_k (\sin \varphi + \frac{\lambda_k}{2} \sin 2\varphi) d\varphi; \\ dm &= \Delta m_{\tau_{\text{ц}}} \cdot dx; \\ dT &= \frac{1}{c_v m} (dQ_c + dQ_w) - T \frac{dm}{m} - (k-1) \frac{dV}{V} T; \\ \frac{dp}{p} + \frac{dV}{V} &= \frac{dm}{m} + \frac{dT}{T}. \end{aligned} \right\} (1)$$

До системи рівнянь (1) додаються і ряд інших додаткових рівнянь в диференціальній або кінцевій формі, які дозволяють на кожному розрахунковому кроці визначати необхідні доданки та множники.

Для отримання єдиного розв'язку задачі за допомогою системи рівнянь (1) потрібні початкові і граничні умови. Оскільки процес в ДВЗ періодичний, то в принципі початкові умови можуть бути будь-які, оскільки в процесі розрахунку вони послідовно уточнюються. Довільний вибір початкових умов при

цьому не впливає на результат, а впливає на кількість розрахункових циклів.

До граничних умов в цій задачі відносяться: основні розміри двигуна, умови на вході, температура стінок, характеристики процесу згорання. Усі ці величини вибирають або оцінюють залежно від конкретного типу двигуна, режиму роботи, умов експлуатації.

Обчислювальні розрахунки згідно наведеної моделі ведуться за програмою Engine Calculation [16], в якій реалізовано модифікований метод Ейлера.

Кожний експеримент передбачає відтворення явища, що досліджується у певних умовах і закінчується представленням його результатів у вигляді зв'язку між головним фактором (відгуком)  $Y$  та факторами входу  $X(i)$ , які можуть змінюватися в залежності від умов проведення експериментів. При багатофакторному експерименті одночасно змінюються всі фактори, що зменшує кількість опитів і дозволяє перейти до моделювання на основі принципу оптимізації. Для планування експерименту необхідно [17]: сформулювати факторний простір і визначити сумісну область визначення факторів, вибрати вид математичної моделі, визначитися з інтервалом варіювання, побудувати план повного факторного експерименту.

На попередньому етапі достатньо застосувати модель першого порядку, яку описують поліномом першого ступеню:

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (2)$$

в якому коефіцієнти регресії ( $b_j$ ) визначають за формулою

$$b_j = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{ji} \cdot y_j), \quad (3)$$

де  $N$  – кількість незалежних дослідів, яка зумовлена кількістю факторів (для двофакторного експерименту  $N = 4$ ).

Аналіз результатів моделі першого порядку дозволяє, визначивши тенденції впливу факторів на відгук, вибрати нову підобласть в межах сумісної області визначення факторів і описати відгук більш складною моделлю – поліномом другого ступеню, який на відміну від поліному першого ступеню має екстремум. Тут зручним підходом може стати використання ортогональних центральних композиційних планів другого порядку – які з великої кількості можливих є одними з простіших [18].

Поліном другого ступеню з урахуванням можливих взаємодій факторів за цих умов має вигляд

$$y = b_0 + b_1 \cdot x_1 + b_2 \cdot x_2 + b_{11} \cdot x_1^2 + b_{22} \cdot x_2^2 + b_{12} \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (4)$$

де  $x_j^2 = (x_j - \lambda)^2$  ( $\lambda = 0,667$  [17]), а відповідні коефіцієнти регресії визначаються за формулою

$$b_j = \frac{1}{C_j} \cdot \sum_{i=1}^N (x_{ji} \cdot y_j) \quad \text{при} \quad C_j = \sum_{i=1}^N x_{ji}^2. \quad (5)$$

**Виклад основного матеріалу дослідження**

Експериментальна частина роботи складається з:

- визначення ефективних показників роботи базового двигуна на номінальному режимі в результаті теплового розрахунку;
- проведення серії обчислювальних експериментів, спрямованих на визначення оптимальних значень варіативних факторів;
- визначення на основі математичного моделювання ефективних показників роботи модифікованої версії двигуна з оптимальними значеннями варіативних факторів;
- експериментальної перевірки прийнятого рішення.

Важливим елементом для теплового розрахунку двигуна є підготовка початкових даних, які готуються у два етапи: на першому етапі виконують попередні розрахунки, щоб оцінити основні розміри циліндра, необхідні при використанні прийнятої ФММ, на другому етапі розраховують усі величини, які є початковими при використанні ФММ. Початкові дані, необхідні для розрахунку за програмою Engine Calculation, наведено в таблиці 1.

За наведеними початковими даними здійснено тепловий розрахунок, в результаті якого визначено такі значення основних ефективних показників базового двигуна:

- індикаторний ККД  $\eta_i = 0,524$ ;
- питома індикаторна витрата палива  $g_i = 0,162$  кг/(кВт·год)
- ефективна потужність  $N_e = 82,71$  кВт;
- максимальний тиск робочого тіла  $p_{max} = 19,44$  МПа
- максимальна температура робочого тіла  $T_{max} = 2460$  К
- температура в кінці процесу розширення  $T_r = 900$  К
- середній ефективний тиск  $p_e = 0,8704$  МПа;
- ефективний ККД  $\eta = 0,3928$ .

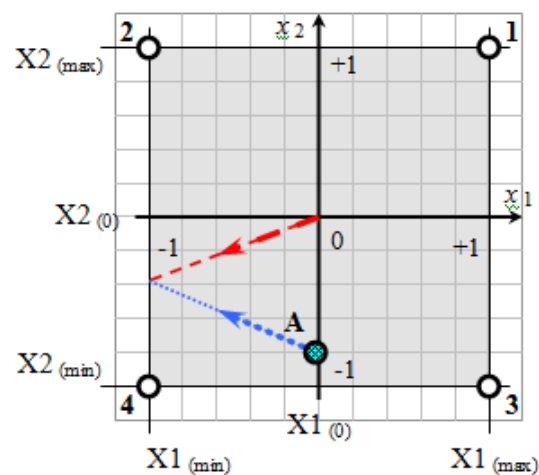
Контрольною величиною для оцінки результатів розрахунку є ефективна потужність двигуна, яку слід порівняти з ефективною потужністю двигуна-прототипу ( $N_{e\ p}$ ). Похибка здійсненого розрахунку складає 3,39 %, що є допустимим.

Обчислювальні експерименти здійснюються за незмінними початковими даними, представленими в таблиці 1, з варіюванням лише двох факторів:  $X1 = F_{п'}/F_{п}$  та  $X2 = m_1$ . Сумісна область визначення факторів, яку представлено на рисунку 2, обмежується границями, які встановлюємо наступним чином:

- для фактору  $X1$  верхній рівень  $X1_{(max)} = 2,2$ , нижній –  $X1_{(min)} = 1,2$ ;
- для фактору  $X2$  верхній рівень  $X2_{(max)} = 2,0$ , нижній –  $X2_{(min)} = 0$ .
- нульовий рівень обраного факторного простору відповідає таким дійсним значенням факторів  $X1_{(0)} = 1,7$ ;  $X2_{(0)} = 1,0$ .

**Таблиця 1** – Початкові дані для теплового розрахунку робочого циклу двигуна Д-245 на номінальному режимі роботи, при  $F_{п'}/F_{п} = 1,68$

Найменування величини	Числові значення
<b>Код двигуна</b>	дизельний
<b>Тип двигуна</b>	
1. Теплота згорання палива $H_{ут}$ , МДж/кг	42,5
2. Показник процесу згорання $m_1$	0,2
<b>Конструктивні дані</b>	
3. Кількість циліндрів $i$	4
4. Компоновка	рядний
5. Діаметр циліндра $D$ , м	0,11
6. Площа поршня $F_{п}$ , м <sup>2</sup>	0,009503
7. Радіус кривошипа $r_k$ , м	0,0625
8. Відношення $\lambda_k = r_k / L_{ш}$	0,27
9. Площа теплообміну поршня $F_{п'}$ , м <sup>2</sup>	0,01597
10. Площа теплообміну кришки $F_k$ , м <sup>2</sup>	0,01045
11. Об'єм камери стиснення $V_c$ , м <sup>3</sup>	$84,25 \cdot 10^{-6}$
<b>Надув</b>	
12. Тиск наддуву $p_k$ , кПа	150,0
13. Температура наддувочного повітря $T_k$ , К	323,5
<b>Регульовальні дані</b>	
14. Кут початку згорання $\phi_c$ , град.	345
15. Кут кінця згорання $\phi_z$ , град.	425
<b>Режимні дані</b>	
16. Кутова швидкість валу $\omega$ , рад/с	251,3
17. Коефіцієнт надлишку повітря $\alpha$	1,8
18. Циклова подача палива $\Delta m_{ци}$ , г/цикл	0,06194
19. Середня температура стінок $T_w$ , К	500
<b>Початкові умови</b>	
20. Тиск $p_a$ , кПа	135,0
21. Температура $T_a$ , К	364,2
22. Маса робочого тіла $m_a$ , г/цикл	1,643
23. Об'єм робочої порожнини $V_a$ , м <sup>3</sup>	0,001272
<b>Розрахунковий крок <math>\Delta\phi</math>, град</b>	1



**Рисунок 2.** Схема плану експерименту  $2^2$  для моделі першого порядку

Обчислювальний експеримент у вигляді теплового розрахунку робочого циклу двигуна здійснюємо для точок 1 – 4 обраного факторного простору (рис. 2). На рис. 2 також показано точку А,

яка відповідає базовому співвідношенню досліджуваних факторів двигуна Д-245:  $X_1 = 1,68$ ;  $X_2 = 0,2$ .

Результати теплового розрахунку з такими співвідношеннями досліджуваних факторів представлено в таблиці 2.

**Таблиця 2** – Результати теплового розрахунку плану  $2^2$

Ефективні показники		Значення показника в точках плану $N_i$			
Позначення	одиниця виміру	т. 1	т. 2	т. 3	т. 4
$\eta_i$	–	0,458	0,476	0,491	0,53
$g_i$	кг/(кВт·год)	0,185	0,178	0,173	0,16
$N_e$	кВт	72,41	75,2	77,55	83,74
$p_{max}$	МПа	6,517	6,595	14,03	14,29
$T_{max}$	К	1839	1875	2414	2453
$T_f$	К	1019	1060	908,2	965,8

Далі переходимо до кодованих ( $x_1$  та  $x_2$ ) значень факторів, верхні та нижні рівні яких матимуть значення «+1» та «-1», а нульовий рівень – «0». За цільові функції (відгуки) оберемо такі показники ефективності роботи двигуна: індикаторний ККД –  $Y_1 = \eta_i$  та питома індикаторна витрата палива –  $Y_2 = g_i$ , причому перший відгук має досягати максимального значення, а другий – мінімального. Матриця планування такого експерименту та його результати у вигляді відповідних відгуків (обраних цільових функцій) представлено в таблиці 3.

**Таблиця 3** – Матриця планування та результати експерименту  $2^2$  з ефектом взаємодії

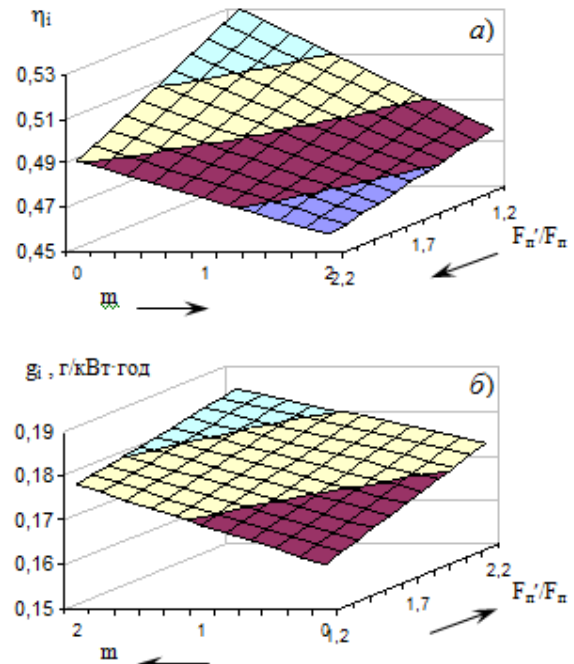
N	$x_0$	Умови експерименту		$x_1 \cdot x_2$	Результати експерименту	
		$x_1$	$x_2$		$Y_{(1)}$	$Y_{(2)}$
1	+1	+1	+1	+1	0,458	0,185
2	+1	-1	+1	-1	0,476	0,178
3	+1	+1	-1	-1	0,491	0,173
4	+1	-1	-1	+1	0,53	0,16

Одержані дані дозволяють розрахувати за формулою (3) відповідні коефіцієнти регресії і одержати два рівняння регресії першого порядку у вигляді формул (6) для відгуку «індикаторний к.к.д» та (7) для відгуку «питома індикаторна витрата палива».

$$Y_{(1)} = 0,4888 - 0,0143 \cdot x_1 - 0,0218 \cdot x_2 + 0,0053 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (6)$$

$$Y_{(2)} = 0,174 + 0,005 \cdot x_1 + 0,0075 \cdot x_2 - 0,0015 \cdot x_1 \cdot x_2, \quad (7)$$

Графічне зображення плоских поверхонь відгуку за формулами (6) та (7) в дійсних координатах досліджуваних факторів наведено на рис. 3.



**Рисунок 3.** Поверхні відгуку цільових функцій в моделі першого порядку:  
 а – індикаторний ККД; б – питома індикаторна витрата палива

Аналіз коефіцієнтів регресії при відповідних факторах дозволяє зробити висновок, що задля як підвищення  $\eta_i$ , так і зменшення  $g_i$  необхідно зменшувати обидва досліджуваних фактора. При цьому фактор  $m_1$  має майже вдвічі більший вплив на відгук, ніж фактор  $F_n'/F_n$ . Ефект взаємодії факторів виявляється значно слабкішим за ефекти кожного з факторів окремо. Лінію тренду для нульового рівня обраного факторного простору показано на рисунку 2 пунктирною лінією. Крапковою лінією тут же показано тренд для базової точки.

Виходячи з одержаних результатів було прийнято рішення перейти до моделі другого порядку, звуживши сумісну область визначення факторів. Така модель описується формулою (4), яка являє собою поліномом другого ступеню, що дає можливість знайти екстремум на поверхні відгуку, який відповідає оптимальній комбінації досліджуваних факторів. Встановимо для такої моделі границі сумісної області визначення факторів (див. рис. 4) наступним чином:

- для фактору  $X_1$  верхній рівень  $X_{1(max)} = 1,7$ , а нижній –  $X_{1(min)} = 1,2$ ;
- для фактору  $X_2$  верхній рівень  $X_{2(max)} = 1,0$ , а нижній –  $X_{2(min)} = 0$ ;
- нульовий рівень такого факторного простору відповідає таким дійсним значенням факторів  $X_{1(0)} = 1,45$ ;  $X_{2(0)} = 0,5$ .

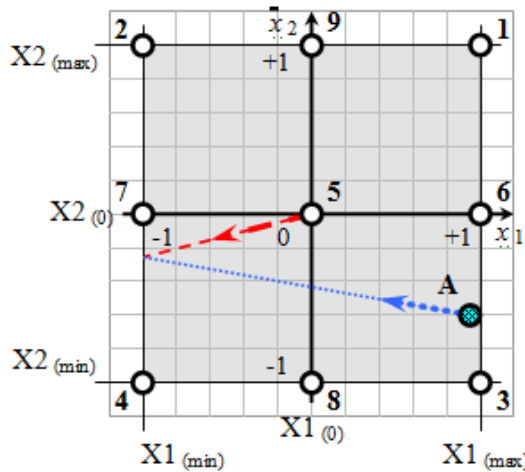


Рисунок 4. Схема плану експерименту  $2^2 + 1 + 2 \cdot 2$  для моделі другого порядку

Далі знову переходимо до кодованих ( $x_1$  та  $x_2$ ) значень факторів, верхні та нижні рівні яких матимуть значення «+1» та «-1», нульовий рівень – «0», а також кодованих значень нелінійних факторів  $x'_j$ , суть яких було зазначено вище. Для наглядності розмірів обраного факторного простору на рис. 4 також позначено положення базової точки А.

Ортогональний центральний композиційний план другого порядку такої моделі, згідно схеми, представленої на рисунку 4, потребує проведення дев'яти експериментів. Результати теплового розрахунку з такими співвідношеннями досліджуваних факторів представлено в табл. 4. Матриця планування такого експерименту та його

результати у вигляді відповідних відгуків (обраних цільових функцій) представлено в таблиці 5.

Одержані дані дозволяють розрахувати за формулою (5) відповідні коефіцієнти регресії і одержати два рівняння регресії другого порядку у вигляді формул (8) для відгуку «індикаторний к.к.д» та (9) для відгуку «питома індикаторна витрата палива».

$$y_{(1)} = 0,5204 - 0,0082x_1 - 0,0043x_2 + 0,0002x'_1 - 0,0143 x'_2 + 0,0018 x_1 x_2, \quad (8)$$

$$y_{(1)} = 0,1629 - 0,0025x_1 - 0,0015x_2 + 0,0002x'_1 + 0,0048 x'_2 - 0,0005 x_1 x_2. \quad (9)$$

Графічне зображення поверхонь відгуку за формулами (8) та (9), які являють собою викривлені поверхні з чіткою наявністю екстремуму, в дійсних координатах досліджуваних факторів наведено на рисунку 5.

Аналіз коефіцієнтів регресії при відповідних факторах дозволяє зробити висновок, що задля досягнення оптимальної комбінації досліджуваних факторів їх також, як і в попередньому випадку необхідно зменшувати. Проте інтенсивність впливу кожного з факторів на відгук значно зменшується у порівнянні з попередньою моделлю, причому значимість впливу у факторів міняється місцями. Ефект взаємодії факторів знову виявляється значно слабкішим за ефекти кожного з факторів окремо. Лінію тренду для нульового рівня обраного факторного простору показано на рисунку 4 пунктирною лінією. Крапковою лінією тут же показано тренд для базової точки.

Таблиця 4 – Результати теплового розрахунку плану  $2^2 + 1 + 2 \cdot 2$

Позначення ефективного показника	Одиниця вимірювання	Значення показника в точках плану $N_i$								
		т. 1	т. 2	т. 3	т. 4	т. 5	т. 6	т. 7	т. 8	т. 9
$\eta_i$	–	0,505	0,518	0,51	0,53	0,53	0,522	0,538	0,511	0,52
$g_i$	кг/(кВт·год)	0,168	0,164	0,166	0,16	0,16	0,162	0,157	0,166	0,163
$N_e$	кВт	79,82	81,78	80,55	83,74	83,76	82,53	85,04	80,79	82,12
$p_{max}$	МПа	9,328	9,39	14,16	14,29	11,73	11,68	11,77	9,358	14,22
$T_{max}$	К	1990	2010	2433	2453	2186	2171	2201	2000	2443
$T_r$	К	983	1007	935,8	965,8	974,7	961,6	988,2	994,7	950,5

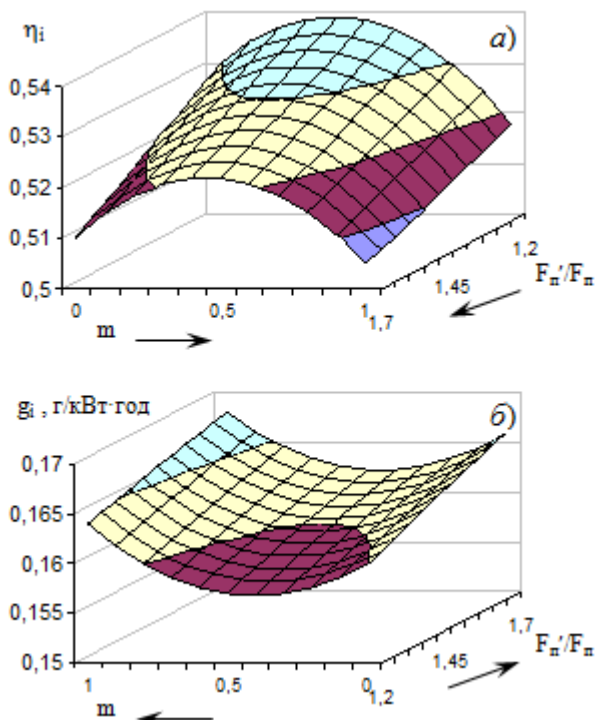
Таблиця 5 – Ортогональний центральний композиційний план  $2^2 + 1 + 2 \cdot 2$  з ефектом взаємодії

N	Елементи плану	$x_0$	$x_1$	$x_2$	$x'_1$	$x'_2$	$x_1 \cdot x_2$	$y_{(1)}$	$y_{(2)}$
1	ядро	+ 1	+ 1	+ 1	0,333	0,333	+ 1	0,505	0,168
2		+ 1	- 1	+ 1	0,333	0,333	- 1	0,518	0,164
3		+ 1	+ 1	- 1	0,333	0,333	- 1	0,51	0,166
4		+ 1	- 1	- 1	0,333	0,333	+ 1	0,53	0,16
5	центр	+ 1	0	0	-0,667	-0,667	0	0,53	0,16
6	зіркові точки	+ 1	+ 1	0	0,333	-0,667	0	0,522	0,162
7		+ 1	- 1	0	0,333	-0,667	0	0,538	0,157
8		+ 1	0	+ 1	-0,667	0,333	0	0,511	0,166
9		+ 1	0	- 1	-0,667	0,333	0	0,52	0,163
$C_j =$		9	6	6	2	2	4	–	–



**Аналіз одержаних результатів та прийняття технічного рішення**

В результаті дослідження на екстремум поліномів другого ступеню (8) та (9) було встановлено, що обидві цільові функції  $Y(1) = f_1(X1, X2)$  та  $Y(2) = f_2(X1, X2)$  набувають своїх екстремальних значень при значеннях досліджуваних факторів  $X1 = F_n'/F_n = 1,2$  та  $X2 = m_1 = 0,4$ . Проте, при зменшенні відносної площі теплообміну поршня і, відповідно, частки об'єму камери згорання, яку утворено в днищі поршня, не завжди вдається досягти таких значень показника  $m_1$ , які відповідають розв'язку задачі оптимізації.



**Рисунок 5.** Поверхні відгуку цільових функцій в моделі другого порядку:  
 а – індикаторний ККД; б – питома індикаторна витрата палива

Виходячи з технологічних міркувань, приймаємо рішення встановити значення фактору  $F_n'/F_n = 1,3$ , яке, з одного боку, є достатньо близьким до оптимального згідно математичної оптимізаційної моделі, а з іншого – може бути реалізовано технічно з досягненням необхідної величини показника характеру згорання  $m_1 = 0,4$ . Для такої комбінації значень факторів впливу було визначено прогнозовані значення ефективних показників роботи дизельного двигуна з модернізованою формою камери згорання, які було порівняно з результатами обчислювального експерименту, проведеного для обраних значень факторів  $F_n'/F_n$  та  $m_1$  в ході теплового розрахунку за програмою Engine Calculation (табл. 6). З наведеної таблиці видно, що точність прогнозування є достатньою, оскільки прогнозовані та експериментальні значення ефективних показників

роботи двигуна відрізняються менше, ніж на 1 %. Це дає можливість оцінити доцільність модернізації камери згорання, порівнявши відповідні значення ефективних показників роботи базового двигуна ( $F_n'/F_n = 1,68$ ;  $m_1 = 0,2$ ) і двигуна з модернізованою формою камери згорання ( $F_n'/F_n = 1,3$ ;  $m_1 = 0,4$ ) – див. табл. 7.

**Таблиця 6** – Результати прогнозу та теплового розрахунку двигуна з модернізованою формою камери згорання

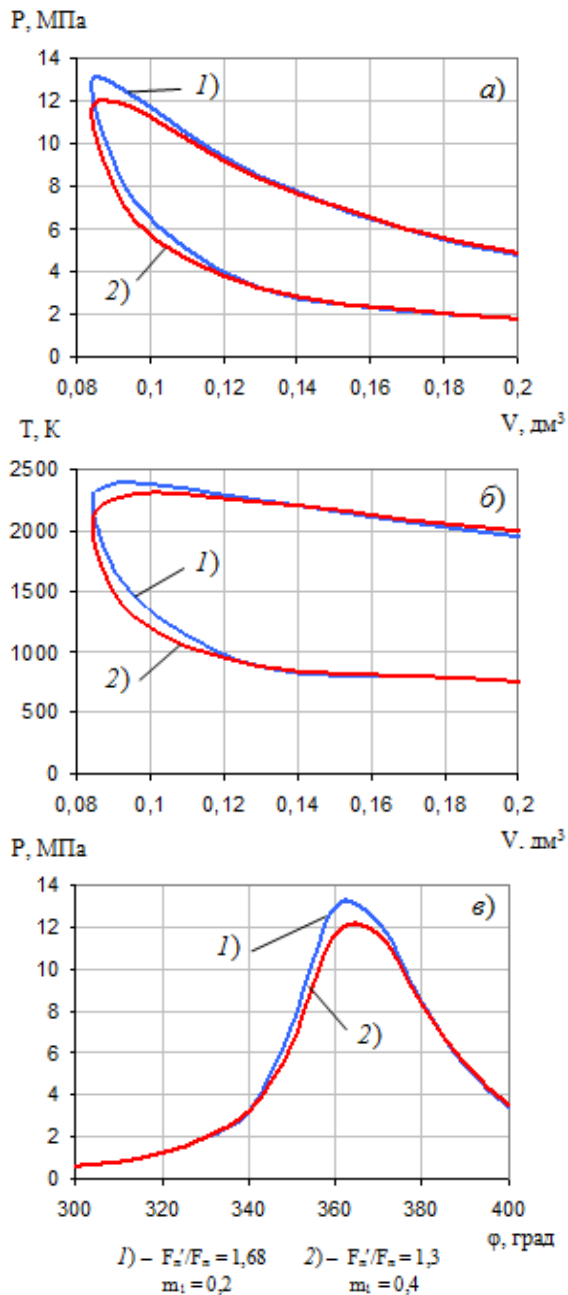
Ефективні показники		Значення показників		Похибка
Позначення	одиниця виміру	прогноз	експеримент	%
$\eta_i$	–	0,535	0,538	– 0,5
$g_i$	кг/(кВт·год)	0,158	0,158	0
$N_e$	кВт	84,6	84,9	– 0,4
$p_{max}$	МПа	12,25	12,29	– 0,3
$T_{max}$	К	2239	2225	+ 0,6
$T_r$	К	978,5	979,6	– 0,1

**Таблиця 7** – Порівняння ефективних показників роботи двигуна з різними формами камер згорання

Ефективні показники		Форма камери згорання		Динаміка
Позначення	одиниця виміру	базова	модернізована	%
$\eta_i$	–	0,524	0,538	+ 2,7
$g_i$	кг/(кВт·год)	0,162	0,158	– 2,5
$N_e$	кВт	82,71	84,9	+ 2,7
$p_{max}$	МПа	19,44	12,29	– 7,5
$T_{max}$	К	2460	2225	– 1,2
$T_r$	К	900	979,6	+ 3,0
$\eta$	–	0,3928	0,4032	+ 2,6

Згорнуті індикаторні діаграми для дизельного двигуна із зазначеними варіантами форми камери згорання в різних системах координат представлено на рисунку 6.

Зміна форми камери згорання до варіанту  $F_n'/F_n = 1,3$  та  $m_1 = 0,4$  призводить до зменшення максимального тиску та зменшення максимальної температури в камері згорання, але розширює зону, яка відповідає за процес згорання, який в базовій версії виконання відбувається більш інтенсивно: час цього процесу скорочується, що призводить до зсуву точки максимального тиску в бік ВМТ. Це означає збільшення роботи стиснення і, відповідно, зменшення роботи розширення робочого тіла. Наглядно це ілюструється індикаторною діаграмою в залежності від кута повороту колінчастого валу (рис. 6б).



**Рисунок 6.** Індикаторні діаграми двигуна Д-245 з варіацією форми камери згоряння:  
 а – індикаторна діаграма  $p(V)$ ; б – індикаторна діаграма  $T(V)$ ; в – індикаторна діаграма  $p(\varphi)$

### Висновки

На основі аналізу особливостей робочих процесів, що протікають в циліндрі дизельного двигуна, визначено фактори, що формують безпосередньо процес згоряння і можуть мати суттєвий вплив на показники роботи дизеля, а саме: відносна площа теплообміну поршня  $F_p'/F_p$  та показник характеру згоряння  $m_1$ .

Вперше на основі багатофакторного експерименту з використанням моделей першого та другого порядків проаналізовано з ефектом взаємодії

вплив таких факторів як  $F_p'/F_p$  та  $m_1$  на ефективні показники роботи дизельного двигуна.

Ґрунтуючись на результатах вирішення оптимізаційної задачі, а також на результатах перевірного обчислювального експерименту, запропоновано технічне рішення щодо модернізації форми камери згоряння базового дизельного двигуна Д-245.

Доцільність прийнятого технічного рішення зміни відносної площі теплообміну поршня до значення  $F_p'/F_p = 1,3$  із забезпеченням величини показника характеру згоряння  $m_1 = 0,4$  підтверджено як аналітичними, так і експериментальними дослідженнями.

### Список літератури

- 243-0000100 РЭ. Двигатели Д-242, Д-243, Д-245 и их модификации. – Мн. : Минский моторный завод, 2009. – 79 с.
- Автомобільні двигуни : Підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. – 3-тє видання. – К. : Арістей, 2006. – 476 с.
- Франц К. Мозер. Дизель в 2015 г. Требования и направления развития технологий дизелей для легковых и грузовых автомобилей // Журнал автомобильных инженеров. – 2008. – № 4(51). – С. 7–16.
- Двигатели внутреннего сгорания : серия учеб. для вузов в 6 томах. Т. 1. Разработка конструкций форсированных двигателей наземных транспортных машин / А. П. Марченко, М. К. Рязанцев, А. Ф. Шеховцов; под ред. А. П. Марченко и А. Ф. Шеховцова. – Х. : Прапор, 2004. – 384 с.
- Сумішоутворення в дизелях. – Сайт «Будівельна техніка (довідник)». – 2016. – Режим доступу: <http://budtehnika.pp.ua/2911-sumshoutvorenniya-v-dizelyah.html>
- Шеховцов А. Ф. Процессы в перспективных дизелях / А. Ф. Шеховцов, Ф. И. Абрамчук, В. И. Крутов и др.; под ред. А. Ф. Шеховцова. – Х. : Основа, 1992. – 352 с.
- Белогуб А. В. Новые подходы к конструированию поршней / А. В. Белогуб // Авиационно-космическая техника и технология: сб. науч. тр. – Х. : ХАИ, 2000. – Вып. 19. Тепловые двигатели и энерго-установки. – С. 201–206.
- Колчин В. П. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – М. : Высш. шк., 2003. – 496 с.
- Пильов В. О. Автоматизоване проектування поршнів швидкохідних дизелів із заданим рівнем тривалої міцності: Монографія / В. О. Пильов. – Х. : Видавничий центр НТУ «ХП», 2001. – 332с.
- Белогуб А. В. Методика расчета переменного напряженно-деформированного состояния поршня в цикле для различных режимов работы двигателя / А. В. Белогуб, О. С. Стрибуль // Авиационно-космическая техника и технология: Зб. науч. праць. – Х. : ХАИ;

Миколаїв : Вид-во МФ НаУКМА, 2002. – Вип. 30. Двигуни та енергоустановки. – С. 124 – 126.

11. Нгуен В. З. Метод прогнозування полей температур и напружений поршня ДВС. Система и средства транспорта. Проблемы эксплуатации и диагностики: монографія / В. З. Нгуен, А. В. Белогуб. – Херсон : ХДМА, 2019. – С. 9–27.

12. Матвєєнко В. В. Результати оцінки ресурсної міцності поршня автотракторного дизеля з урахуванням локального теплообміну в камері згоряння / В. В. Матвєєнко, В. О. Пильов, О. В. Матюха // Двигуни внутрішнього згоряння. – 2011. – № 2. – С. 78–81.

13. Гащук П. М. Моделювання теплообмінних процесів, що перебігають в циліндрах двигуна внутрішнього згоряння / П. М. Гащук, С. В. Нікіпчук // Пожежна безпека. – 2018. – № 33. – С. 15–34. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.03

14. Турчин В. Т. Удосконалення методики визначення ресурсної міцності поршнів тракторних дизелів / В. Т. Турчин, В. О. Пильов, А. П. Кузьменко

// Двигатели внутреннего сгорания. – 2007. – № 2. – С. 30–35.

15. Егоров Я. А. Физико-математическая модель рабочего цикла двигателя внутреннего сгорания автотракторного типа: Учеб. пособие / Я. А. Егоров. – К.: УМК ВО, 1991. – 60 с.

16. 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.

17. Фролов М. В. Математичне моделювання для металорізального інструменту: основні положення та практичне застосування. Навчальний посібник / М. В. Фролов. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 197 с.

18. Спирин Н. А. Методы планирования и обработки результатов инженерного эксперимента: учеб. пос. / Н. А. Спирин, В. В. Лавров. – Екатеринбург: ГОУ ВПО УГТУ – УПИ, 2004. – 257 с.

Одержано 26.02.2024

## ON THE INFLUENCE OF THE SHAPE OF THE COMBUSTION CHAMBER OF A DIESEL ENGINE ON ITS EFFICIENT INDICATORS

- Slyn'ko G. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID 0000-0002-1954-8530
- Bezhenov S. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: bezhenov@zp.edu.ua, ORCID 0000-0001-7329-356X
- Bokarov V. Senior laboratory assistant of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vladislavmontoya@gmail.com, ORCID 0000-0001-7675-8094
- Slyn'ko V. Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: vslinko@zp.edu.ua, ORCID 0000-0002-4553-8387
- Shemet I. M. Sc., National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: shemetttttt8@gmail.com

**Purpose.** Increasing the effective performance of the diesel engine due to the improvement of the course of thermal processes in the combustion chamber, in particular, reducing the time of formation of the working mixture.

**Research methods.** The physic-mathematical model for calculating the working cycle of the second level of internal combustion engine in the second modification – as the basis of a computational experiment, as well as the planning of a multifactorial experiment based on models of the first and second orders. Computational calculations according to the given model were carried out using the Engine Calculation program, which implements the modified Euler method.

**Results.** The influence of the shape of the combustion chambers of a diesel engine on its effective performance was studied. It is shown that manipulations with the very shape of the piston (changing its bottom) have a direct effect on the processes of mixture formation and combustion, which affects more global indicators of engine performance, such as economy and power. A plan of experimental research was built, on the basis of which, as a result of the thermal calculation, the dependences of the engine's effective indicators on the studied parameters were obtained.

**Scientific novelty.** For the first time, on the basis of a multifactorial experiment, the influence of such factors as the relative heat exchange area of the piston and the indicator of the nature of combustion on the effective performance indicators of a diesel engine was analyzed with the interaction effect. It has been proven that the ratio  $Fp'/Fp = 1.3$  with the value of the combustion characteristic index  $m_1 = 0.4$  is optimal for ensuring effective performance of a diesel engine.

**Practical value.** *The proposed modernization of the shape of the combustion chamber of the existing engine, which makes it possible to increase its indicator efficiency while reducing the specific indicator fuel consumption, can be applied to diesel engines of a similar class.*

**Key words:** *multifactorial experiment, internal combustion engine, diesel, combustion chamber, work process, experimental research plan.*

### References

1. 243-0000100 RE. Dvigateli D-242, D-243, D-245 i ih modifikacii [243-0000100 RE. Engines D-242, D-243, D-245 and their modifications] (2009). Mn. : Minsk Motor Plant, 79.
2. Abramchuk, F. I., Gutarevich Ju. F., Dolganov, K. E. (2006). Avtomobil'ni dviguni [Automobile engines]. Kyiv: Aristej, 476.
3. Franc, K. Mozer (2008). Dizel v 2015 g. Trebovaniya i napravleniya razvitiya tehnologij dizelej dlya legkovykh i gruzovykh avtomobilej [Diesel in 2015. Requirements and directions for the development of diesel technologies for cars and trucks]. Zhurnal avtomobilnykh inzhenerov, 4(51), 7–16.
4. Marchenko, A. P., Ryazancev, M. K., Shehovcov, A. F. (2004). Dvigateli vnutrennego sgoraniya : seriya ucheb. dlya vuzov v 6 tomah. T. 1. Razrabotka konstrukcij forsirovannykh dvigatelej nazemnykh transportnykh mashin [Internal combustion engines: a series of textbooks for universities in 6 volumes. Vol. 1. Development of designs of forced engines of ground transport vehicles]. Kharkiv: Prapor, 384.
5. Mixture formation in diesel engines. Construction machinery, handbook (2016). Available at: <http://budtehnika.pp.ua/2911-sumshoutvorenniya-v-dizelyah.html>
6. Shehovcov, A. F., Abramchuk, F. I., Krutov, V. I. (1992). Processy v perspektivnykh dizelyah [Processes in advanced diesel engines]. Kharkiv: Osnova, 352.
7. Belogub, A. V. (2000) Novye podhody k konstruirovaniyu porshnej [New approaches to the design of pistons]. Aviacionno-kosmicheskaya tehnika i tehnologiya: sb. nauch. tr. – Kharkiv: KhAI. – Vol. 19. Teplovye dvigateli i energo-ustanovki, 201–206.
8. Kolchin, A. I., Demidov, V. P. (2008) Raschet avtomobilnykh i traktornykh dvigatelej: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Calculation of automobile and tractor engines: Textbook for universities]. 4th Edition. Moscow: Vysch. Shk., 496.
9. Pilov, V. O. (2001). Avtomatizovane proektuvannya porshniv shvidkohidnykh dizeliv iz zadanim rivnem trivaloyi micnosti: Monografiya [Automated design of pistons of high-speed diesel engines with a given level of long-term durability: Monograph]. Kharkiv : Vidavnicij centr NTU «KhPI», 332.
10. Belogub, A. V., Stribul O. S. (2002). Metodika rascheta peremennogo napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya porshnya v cikle dlya razlichnykh rezhimov raboty dvigatelya [Methodology for calculating the variable stress-strain state of the piston in a cycle for various engine operation modes]. Aviacijno-kosmichna tehnika i tehnologiya: Zb. nauk. prac. – H. : HAI; Mikolayiv: Vid-vo MF NaUKMA, Vip. 30. Dviguni ta energoustanovki, 124–126.
11. Nguen, V. Z., Belogub, A. V. (2019). Metod prognozirovaniya polej temperatur i napryazhenij porshnya DVS. Sistema i sredstva transporta. Problemy ekspluatacii i diagnostiki: monografiya [The method of forecasting the temperature and stress fields of the internal combustion engine piston. System and means of transport. Problems of exploitation and diagnostics : monograph]. Kherson : KhDMA, 9–27.
12. Matvyeyenko, V. V., Pilov, V. O., Matyuha, O. V. (2011). Rezultati ocinki resursnoyi micnosti porshnya avtotraktornogo dizelya z urahuvannyam lokalnogo teploobminu v kameri zgoryannya [Results of the assessment of the durability of the piston of an auto-tractor diesel engine taking into account the local heat exchange in the combustion chamber]. Dviguni vnutrishnogo zgoryannya, 2, 78–81.
13. Gashuk, P. M., Nikipchuk, S. V. (2018). Modelyuvannya teploobminnykh procesiv, sho perebigayut v cilindrah dviguna vnutrishnogo zgorannya [Modeling of heat exchange processes occurring in the cylinders of an internal combustion engine]. Pozhezhna bezpeka, 33, 15–34. DOI: 10.32447/20786662.33.2018.03
14. Turchin, V. T., Pilov, V. O., Kuzmenko, A. P. (2007). Udoskonalennya metodiki viznachennya resursnoyi micnosti porshniv traktornih dizeliv [Improvement of the method of determining the durability of tractor diesel pistons]. Dvigateli vnutrennego sgoraniya, 2, 30–35.
15. Egorov, Ya. A. (1991). Physic-mathematical model of the working cycle of an internal combustion engine of the tractor type: Textbook [Physico-mathematical model of the working cycle of an internal combustion engine of an auto-tractor type: Textbook]. Kyiv : UMK VO, 60.
16. Slyn'ko, G. I., Sukhonos, R. F., Slyn'ko, V. V. (2024). Teplovij i dinamichnij rozrahunok DVZ : navchal'nij posibnik z kursovogo proektuvannja [Thermal and dynamic calculation of internal combustion engine: textbook for course project]. Zaporizhzhia: National University «Zaporizhzhia Polytechnic», 130.
17. Frolov, M. V. (2017). Matematichne modelyuvannya dlya metalorizalnogo instrumentu: osnovni polozhennya ta praktichne zastosuvannya. Navchalnij posibnik [Mathematical modeling for metal cutting tools: basic principles and practical application. Tutorial]. Zaporizhzhia: ZNTU, 197.
18. Spiryn, N. A., Lavrov, V. V. (2004). Metody planirovaniya i obrabotki rezultatov inzhenerного eksperimenta: ucheb. pos. [Methods of planning and processing the results of an engineering experiment: Tutorial]. – Yekaterinburg: GOU VPO UGTU – UPY, 257.

УДК 621.891

- Комочкін М. С. провідний інженер-конструктор ТОВ «Пульсар Експо Україна», м. Київ, Україна, e-mail: 011079n@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1838-5442
- Циганов В. В. д-р техн. наук, доцент, професор кафедри металорізальні верстати і інструменти Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: tsyganov705@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5682-7005
- Сахнюк Н. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: nat76sah@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2664-2602
- Лазарева О. О. ст. викладач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309
- Кривих Ю. І. ст. викладач кафедри технології авіаційних двигунів Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: juliya.krivikh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3183-8776

## ФІЗИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЗНОШУВАННЯ БАНДАЖНИХ ПОЛИЦЬ РОБОЧИХ ЛОПАТОК ГТД

**Мета роботи.** Розробка методології прискорених досліджень зносостійкості трибосполучень, які експлуатуються в умовах складного динамічного контактного навантаження та різних температур.

**Методи дослідження.** Розроблено методіку та установку для проведення прискорених досліджень матеріалів на зносостійкість з різними умовами навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках) близьких до експлуатаційних та температур, а також при роздільному впливі кожного з діючих на систему параметрів навантаження. Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків проводиться безпосередньо в ході випробувань за рахунок системи керування кроковими двигунами установки обчислювальною платформою Arduino Uno.

**Отримані результати.** Показано, що збільшення багатокomпонентності динамічного навантаження в контактній трибоспряженні призводить до збільшення інтенсивності зношування жароміцних сплавів. Зміна інтенсивності зношування, залежно від температури випробувань, має складний характер. Визначення закономірностей та розробка умов формування зносостійкого поверхневого шару деталей трибосполучень можливе на основі аналізу величини зносу та стану поверхні з урахуванням реального виду навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках).

**Наукова новизна.** Розглянуто фізичне моделювання процесу зношування бандажних полиць лопаток турбіни ГТД за складним термодинамічним навантаженням.

**Практична цінність.** Представлено установку та методологію проведення прискорених випробувань моделей фрикційних пар в умовах, наближених до реальних умов експлуатації трибосполучень з різними видами навантаження плоских деталей, що дозволяє дати технологічні рекомендації щодо підвищення зносостійкості газотурбінних двигунів. Проведення прискорених випробувань, що програмуються, дозволить вивчити стан трибоз'єднань у процесі циклу навантаження, наближеного до циклу роботи двигуна в льотному режимі.

**Ключові слова:** зношування, установка для випробування, бандажні полиці, лопатка, складне навантаження.

### Вступ

Розвиток газотурбінних двигунів (ГТД) як теплових машин йде шляхом підвищення таких параметрів термодинамічного циклу, як температура та тиск газу перед турбіною.

Основною перешкодою підвищення зазначених параметрів є недостатня міцність робочих лопаток турбін, зокрема і знос їх контактних поверхонь, за умов високотемпературних навантажень. Аналіз факторів, які забезпечують можливість підвищення температури

газу перед турбіною, вказує на пріоритет конструктивно-технологічних рішень перед матеріалознавчими. За останні 40 років покращення матеріалознавчих властивостей матеріалів лопаток турбін дозволило підняти температуру газового потоку перед турбіною на 60...100 градусів, а конструктивно-технологічні рішення на 300...350 градусів. Немає сумнівів у тому, що зазначена тенденція зберігатиметься найближчим часом [1].

При цьому виникає комбінований вплив високих температур, властивостей газового середовища та взаєм-

ного переміщення деталей з наявністю вібрацій, що діють у різних напрямках, у тому числі присутності ударного навантаження. Без урахування всього комплексу факторів навантаження відбувається спотворення результатів дослідження та створення картини процесу зношування, що мало відповідає реальній.

### Аналіз досліджень та публікацій

Встановлено [2, 3], що при роботі двигуна спостерігається істотне розсіювання по колу ротора умов навантаження будь-якої пари полиць по тиску в зоні контакту, амплітуді прослизання, частоті коливань. Тому в одному робочому колесі через неконтрольовані умови навантаження виникають зони підвищеного та зниженого зносу, причому розкид, за даними цієї роботи, може становити  $\pm 650\%$ . Розташування таких зон нині передбачити неможливо. Аналіз літературних джерел дозволив визначитися з приблизними межами параметрів для встановлення подальших випробувань на установці. Температури в області бандажних полиць лопаток:  $800 \dots 1050^\circ\text{C}$ , тиск в зоні контакту досягає 60 МПа на злітно-посадкових режимах і не перевищує 50 МПа при режимі роботи, що встановився.

Одним із найбільш трудомістких є визначення небезпечних резонансних частот. Лопатки коливаються з різними формами, з різною кількістю вузлових діаметрів у діапазоні від десятків Гц до десятків кГц (до 40 кГц). Найменша зміна геометрії конструкції, монтажного та робочого натягу, а також рівень зносу лопаток зсувають ці частоти. Найбільш логічним рішенням є вибір частот з амплітудно-частотної діаграми, одержаної для конкретної лопатки, конкретного двигуна, що досліджується. Прогнозований рівень амплітуд – до 0,1 мм.

Випробування натурного вузла тертя не завжди можливі через тривалість випробувань та велику вартість проведення експерименту по повному циклу. Тому великого значення набувають методи прискорених випробувань пар тертя, при яких необхідний обсяг інформації про зносостійкість виходить у короткий термін [4]. Очевидно, найбільш прийнятним може виявитися метод випробувань, що базується на моделюванні натурних умов на динамічному стенді.

Відомо, що зношування жароміцних сплавів [5-7] може відбуватися за декількома різними механізмами. Різний характер зносу в залежності від температури має місце як для жароміцних сплавів на основі Ni та Co, так і для м'яких сталей на основі Fe. Зміна того чи іншого фактора навантаження та поява нового фактора призводить до зміни механізму зношування, його фізичної картини.

Окремими авторами [8, 9] проводилися дослідження при поєднанні деяких факторів навантаження. Автори цих досліджень приходять до висновків про неможливість охопити закономірності тертя в умовах складного навантаження в рамках єдиної теорії. Обґрунтовується провідна роль експерименту у подібних дослідженнях.

Додаткове навантаження одноразовим або періодичним ударним навантаженням може призвести до власних контактних коливань як у нормальному, так і в тангенціальному напрямках. Це, у свою чергу, може призвести до зниження сили тертя, яке і зазначалося в ряді робіт [9, 10]. При ударі може здійснюватися накладення факторів, що викликають деформування матеріалу, як у зоні контакту, так і в об'ємі. Співвідношення швидкостей удару, розмірів та матеріалів твердих тіл може бути таким, що за час контактування ударна хвиля багаторазово пройде всередині тіл. Амплітуда ударної хвилі може бути достатньою, щоб багаторазове переддеформування матеріалу в об'ємі призвело до підготовки процесу утворення тріщини та її поширення в контактній зоні.

### Мета роботи

Розробка методології прискорених досліджень зносостійкості трибосполучень, які експлуатуються в умовах складного динамічного контактного навантаження та різних температур.

### Матеріал і методика досліджень

Були розроблені методики та ряд установок для проведення прискорених досліджень матеріалів на зносостійкість з різними умовами навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках) [11–13]. Сутність методики досліджень полягає у визначенні закономірностей зношування трибологічних пар як в умовах близьких до експлуатаційних, так і при роздільному впливі кожного з параметрів навантаженості, що діють на систему, що дає можливість виявити внесок кожного з них у процесі пошкоджуваності. Зрештою, це дозволить запропонувати конструктивно-технологічні способи підвищення зносостійкості контактних поверхонь бандажованих лопаток.

Найбільш прийнятною для проведення модельних випробувань зносостійкості в умовах наближених до умов експлуатації більшості трибосполучень є установка, що представлена на рис. 1, так як дозволяє регулювати параметри навантаження за трьома напрямками.

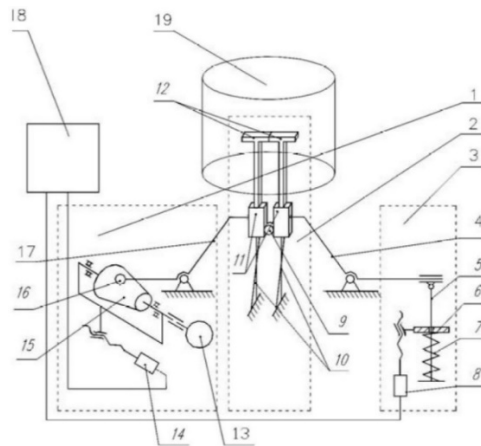


Рисунок 1. Схема установки для дослідження зношування

Окрім того, у разі потреби виділення процесів у «чистому вигляді», є можливість проводити випробування з різним навантаженням зразків з розривом та без розриву контакту, тобто. тільки з коливаннями та проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках. Установка містить: вузол завдання амплітуди коливань 1, вузол кріплення зразків 2, вузол завдання навантаження 3.

Вузол завдання навантаження 3 складається з важеля 4, шарнірно з'єднаного зі штоком 5, на якому розташовується пружина навантаження 7, з'єднана з кроковим двигуном 8 за допомогою упорної шайби 6 через передачу гвинт-гайка.

Вузол кріплення зразків містить 2 консольно закріплені пружинні пластинчасті тримачі 10. Вони мають закрутку і можуть містити змінний по висоті і ширині розмір поперечного перерізу. На тримачах розміщені розділені ролик 9 державки 11, у яких закріплені зразки 12.

Вузол завдання амплітуди поздовжніх коливань 1 складається з кінцевого кулачка 15, який муфтою з'єднаний з електродвигуном постійного струму 13. За допомогою передачі гвинт-гайка кроковий двигун 14, через ролик 16 з'єднаний з вузлом кріплення зразків 2.

Установка також забезпечена електронним блоком 18 і камерою 19 для завдання необхідних температур.

Зразки встановлюються в державки вузла кріплення зразків. Постійна відстань між ними в рухомому та нерухомому станах забезпечується роликом, який також виключає вплив прогину пружинних пластинчастих тримачів на повноту контакту робочих поверхонь зразків. Рух із необхідною амплітудою поздовжніх коливань забезпечується вузлом завдання амплітуди. Обертання кулачка, яке здійснюється електродвигуном, призводить до коливального руху з необхідною амплітудою через важіль-штовхач тримачів, державок і зразків. При цьому відбувається зіткнення та прослизання поверхонь зразків у поздовжньому напрямку.

Необхідний тиск у контакті забезпечується передачею навантаження зразкам через важіль від навантажувальної пружини та регулюється зміною ступеня стиснення останньої переміщенням упорної шайби вздовж штока (вузол завдання навантаження). Для зменшення зносу контакт кулачка 15 та коромислового важеля-штовхача здійснюється за допомогою ролика 16.

Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків безпосередньо в ході випробувань можлива зміною стиснення пружини та переміщення кулачка, за рахунок включення крокових електродвигунів відповідно до програми, що задається пристроєм ЧПК (електронний блок). Для проведення випробувань при відмінних від кімнатної температурах, зразки розташовуються в камері, в якій підтримується необхідна температура.

Наявність закрутки і різної жорсткості перерізів пружинного пластинчастого тримача призводить до виникнення коливань тримачів, а, отже, і прослизання полиць зразків у поперечному напрямку. В результаті

реалізується тривимірний навантажений стан поверхонь зразків: удар з подальшим прослизанням у двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Зміна величини навантаження та амплітуди переміщення зразків можлива безпосередньо в ході випробувань, зміною стиснення пружини та переміщенням кулачка, за рахунок системи керування кроковими двигунами установки обчислювальною платформою Arduino Uno. Платформа побудована на основі мікропроцесора Atmega328. Програмування ведеться повністю через власну програмну оболонку (IDE), що у відкритому доступі на сайті Arduino. Мова програмування Arduino є стандартною C++ (використовується компілятор AVR-GCC) з деякими особливостями, що полегшують новачкам написання першої програми.

Розроблена принципова схема підключення (рис. 2) виконана з урахуванням можливостей керуючої платформи та вимог пристроїв, що підключаються. Реалізацію керування крокових двигунів виконано на драйверах A4988 (може бути замінений на DRV8825, DRV8834). Контролер A4988 дозволяє обмежувати струм, має захист від надто великого струму та перегріву, п'ять різних дозволів для мікрокроку (до 1/16 кроку).

Підключення двигуна, що задає частоту коливань зразків (рис. 1, поз. 13), виконано на базі потужного MOSFET-транзистора. Управління частотою двигуна реалізується через зміну мікропроцесором шпаруватості імпульсів, що відкривають MOSFET-транзистор IRL3705NS. Встановлений на валу двигуна цифровий датчик ходу A3144 реалізує систему зворотного зв'язку. Управління вузлом завдання температури передбачає встановлення двох клапанів на пальник. Перший (з метою безпеки) відкривається вручну, ступінь відкриття другого керується мікроконтролером за допомогою сервоприводу. Систему зворотного зв'язку здійснює термопара, підключена до мікроконтролера через підсилювач MAX31855.

Є блок вибору режимів випробування. Після вибору режиму здійснюється перехід до налаштування величин параметрів навантаження згідно з програмою випробування. Вмикаються до потрібного рівня крокові двигуни. Після налаштування рівнів параметрів, система надає оператору вибір: відредагувати їх, змінити сценарій випробування або запустити випробування.

Вибір матеріалів для досліджень обумовлений, перш за все, частотою застосування їх у трибосполученнях гарячої частини газотурбінних енергетичних установок і, зокрема, авіаційних двигунів. Як правило, для таких сполучень широко застосовуються жароміцні сплави на нікелевій основі, зміцнені дисперсною інтерметалідною фазою Ni<sub>3</sub> (Al, Ti) типу ХН77ТЮР (ЕІ437Б), а також зносостійкі композиційні евтектичні сплави на кобальтовій основі типу ХТН-61. Деталі, що виготовляються з жароміцних сплавів, працюють в найбільш складних умовах навантаження і тому схильні до інтенсивного зношування при динамічних контактних навантаженнях і підвищених температурах.

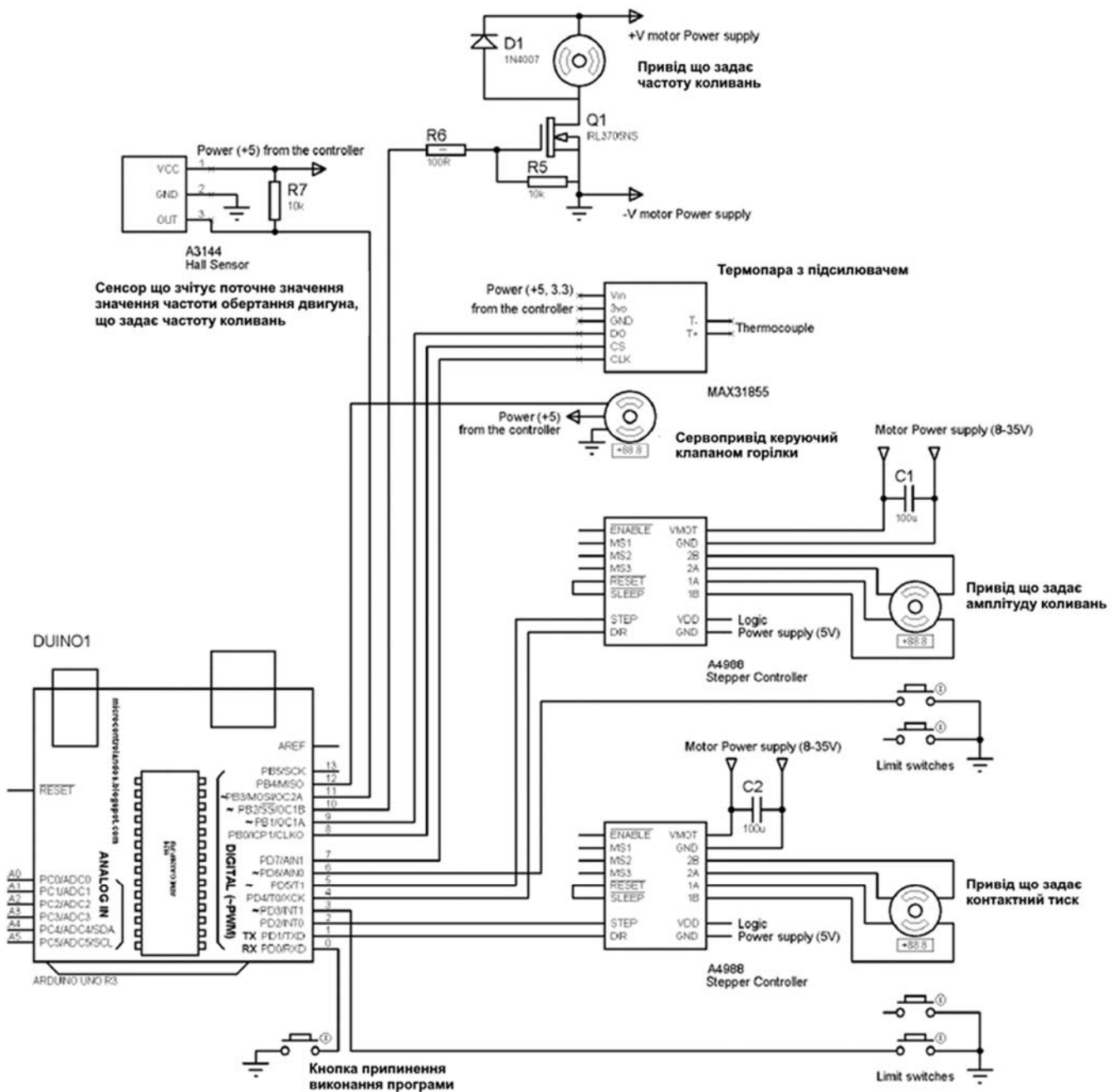


Рисунок 2. Схема підключення системи ЧПК

### Результати досліджень

Дослідження щодо визначення ступеня впливу умов динамічного навантаження на інтенсивність зношування досліджуваних сплавів були при однокомпонентному навантаженні (проковзуванні поздовжньому), двокомпонентному (удар з подальшим поздовжнім проковзуванням) і трикомпонентному (удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках). Випробування, проведені в умовах двокомпонентного та трикомпонентного навантаження, від-

бувалися з розривом контакту, а, отже, контактна взаємодія зразків мала ударний характер. У разі змінного нормального навантаження розрив контакту веде до зміни його значення від нуля за відсутності контактування до дуже великих значень на момент зіткнення.

Умови проведення випробувань: амплітуда поперечних ковзань 0,05 мм; амплітуда поздовжніх ковзань 0,1 мм; частота поперечних ковзань 30 Гц; частота поздовжніх ковзань 66 Гц; нормальне навантаження 20 Н, час випробувань за кімнатної температури до 4 годин. Результати випробувань представлені рис. 3.



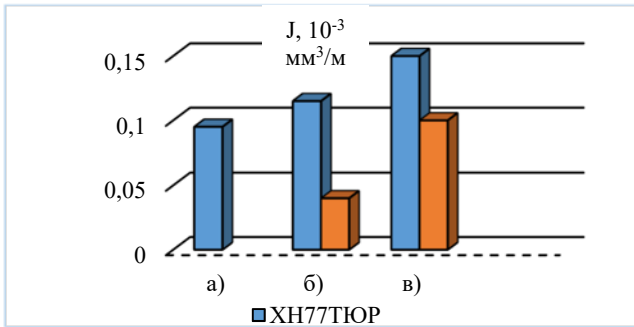


Рисунок 3. Діаграма зміни інтенсивності зношування жароміцних сплавів при:

а – однокомпонентному, б – двокомпонентному, в – трикомпонентному навантаженні

### Обговорення

Як випливає з отриманих результатів, збільшення багатоконтактності динамічного навантаження в контактній трибоспиринженні призводить до збільшення інтенсивності зношування металів, що визначається відношенням обсягу зношеного металу до шляху тертя. Додавання ударного навантаження (двокомпонентне навантаження) в умовах тертя ковзання, що розглядаються, супроводжується підвищенням інтенсивності зношування зразків зі сплаву XH77TiO9 – в 1,2 рази. Додавання до двокомпонентного навантаження додаткового проковзування в напрямку перпендикулярному до початкового проковзування (трикомпонентне навантаження), супроводжується ще більшим збільшенням інтенсивності зношування – для сплаву XH77TiO9 в 1,4 рази, для сплаву ХТН-61 в 2,5.

Враховуючи отримані перспективні показники зносостійкості сплаву ХТН-61, при складному навантаженні доцільно виявлення особливостей його зносу в умовах високих температур. Цей сплав має заевтектичну структуру з первинними зернами карбіду (Ti, Nb)C та евтектикою Co+(Ti, Nb)C, характеризується двофазністю, одна фаза матрична, друга – карбідна. Висока зносостійкість цього сплаву досягається рівномірним розподілом високоміцної матричної фази твердого розчину на основі кобальту, що дозволяє, зокрема, ефективно використовувати його для напайок на бандажні полиці лопаток ГТД. Складний хімічний склад сплаву ХТН-61 передбачає всебічне вивчення його зносостійкості за умов найбільш наближених до експлуатаційних.

Контактна взаємодія двох плоских зразків моделювалася в режимі зіткнення з подальшим проковзуванням при температурах 20, 500, 900 і 1000 °C в повітряному середовищі. Нормальне питоме ударне навантаження становило від 0 до 0,6 Н/мм<sup>2</sup>, взаємне переміщення зразків відбувалося з амплітудою 0,17 мм та частотою 66 Гц, час випробувань – 2 години. Графіки інтенсивності зношування залежно від температури випробувань наведено рис. 4.

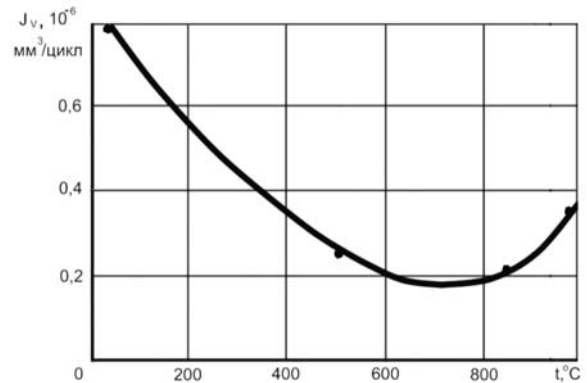


Рисунок 4. Залежність зміни інтенсивності зношування сплаву ХТН-61 від температури випробувань

Зниження зносу при температурах до 600...700 °C пояснюється утворенням міцно зчепленої з металом оксидної плівки, що діє на кшталт твердого мастила [14]. Відбувається тертя оксиду по оксиду і підвищення температури, що сприяє швидшому утворенню оксидної плівки. Подальше підвищення температури супроводжується збільшенням інтенсивності зношування внаслідок втрати несучої здатності поверхневого шару.

Отриманий характер залежностей, може свідчити про зміну механізму деформації в поверхневих шарах матеріалів, що контактуються. При підвищених температурах (понад 0,4...0,5 T<sub>пл</sub>) пластичність дисперсійно-зміцнених нікелевих сплавів швидко зменшується, що у свою чергу пов'язано з переходом характеру руйнування від транскристалітного до інтеркристалітного внаслідок збільшення ступеня зернограничного проковзування [15, 16]. Додаток динамічного навантаження під час контактної взаємодії посилює цей процес.

### Висновки

Складна взаємодія деталей трибосполучень у контактній зоні повинна враховуватися при побудові моделей контактування та прогнозуванні поверхневої міцності матеріалів при динамічних навантаженнях і, відповідно, умови проведення випробувань повинні бути якомога ближче наближені до реальних умов експлуатації. Визначення закономірностей та розробка умов формування зносостійкого поверхневого шару деталей трибосполучень можливе на основі аналізу величини зносу та стану поверхні з урахуванням реального виду навантаження (односпрямоване ковзання, удар з проковзуванням, удар з проковзуванням у двох взаємно перпендикулярних напрямках). Це дасть можливість розглянути фізичні основи пластично-деструкційних явищ у зоні контакту трибосполучень з урахуванням дії продуктів зношування поверхні та розробити рекомендації щодо забезпечення зносостійкого поверхневого шару контактуючих деталей.

Крім того, проведення прискорених випробувань, що програмуються, дозволить вивчити стан зразків у процесі циклу навантаження, наближеного до циклу

роботи двигуна в льотному режимі. Фізичне моделювання процесу та аналіз результатів експериментів дозволить дати технологічні рекомендації щодо рівномірного розподілу зносу бандажних полиць робочих лопаток як найбільш відповідальних деталей ротора турбіни, що згодом стане підставою більш точного прогнозування роботи лопаток у реальних умовах.

#### Список літератури

1. Меркулов В. М. О выборе способа бандажирования рабочих лопаток турбин ГТД / В. М. Меркулов, Ф. Д. Ильющенко // Вестник двигателестроения. – 2005. – № 2. – С. 114–117.
2. Муравченко Ф. М. Актуальные проблемы динамики, прочности и надежности авиадвигателей / Ф. М. Муравченко // Проблемы прочности. – 2008. – № 5. – С. 7–14.
3. Колебания бандажированного рабочего колеса ГТД / Ю. С. Воробьев, К. Ю. Дьяконенко, В. Н. Романенко и др. // Авиационно-космическая техника и технология. – 2006. – № 9. – С. 87–90.
4. Tsyganov V. V. The methodological principles of the engineering of tribocoupling details surface under multicomponent loading / V. V. Tsyganov, L. Y. Ivschenko // Materials Science and Technology. – 2018. – MS and T 2018. – P. 578–584.
5. Wang Dao-Juan. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel / Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. – Wear. – 1987. – P. 101–117.
6. Yurov V. M. The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts / Yurov V. M., Oleshko V. S. // Eurasian Physical Technical Journal. – 2019. – Vol. 16. – No1 (31). – P. 99–108.
7. Iwabuchi A. Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high L vacuum / A. Iwabuchi // Wear. – 1985. – № 1–3. – P. 163–175.

8. Рыжов Э. В. Контактное взаимодействие твердых тел при статических и динамических нагрузках / Э. В. Рыжов. – М. : Машиностроение, 1988. – 250 с.

9. Eremin E. N. Wear resistance and tribological properties of high entropy coatings CrNiTiZrCu / Eremin E. N., Yurov V. M., Guchenko S. A. // Eurasian Physical Technical Journal. – 2020. – No 1. – P. 13–18.

10. Development of a device for determining work electron output / Makeeva O. V., Oleshko V. S., Fedorov A. V., Yurov V. M. // Eurasian Physical Technical Journal. 2020. – No 1. – P. 127–131.

11. Tsyganov V. V., Sheyko S. Features of engineering the wear-resistant surface of parts with the multicomponent dynamic load / Tsyganov V. V., Sheyko S. // Wear. – 2022. – P. 494–495, 204255.

12. Tsyganov V. V. Increasing Wear Resistance of Steel by Optimizing Structural State of Surface Layer / V. V. Tsyganov, R. E. Mokhnach, S. P. Sheiko // Steel in Translation. – 2021. – Vol. 51. – No 2. – P. 144–147.

13. Ivschenko L. Y., Tsyganov V. V., Adjerid S., Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance a l'usure des tribocontacts, Journal Materiaux & Techniques. 4 (2013) 403.1–403.7.

14. Wang Dao-Juan. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel / Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua // Wear. – 1987. – P. 101–117.

15. Application of the protective coating for blade's thermal protection / Frackowiak A., Olejnik A., Wróblewska A., Ciałkowski M. // Energies. – 2021. – 14(1): 50.

16. Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems / Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H. et al. // MS and T 2019. Materials Science and Technology 2019. – 2019. – P. 450–456.

Одержано 15.01.2024

## PHYSICAL MODELING OF WEARING PROCESSES OF THE AIRFOIL SHROUD PLATFORMS OF GAS TURBINE ENGINE

- Komochkin M. Leading design engineer of Pulsar Expo Ukraine LLC, Kyiv, Ukraine, *e-mail*: 011079n@gmail.com, ORCID: 0000-0002-1838-5442
- Tsyganov V. Doctor of Technical Sciences, Assistant Professor, Professor of the Department of Machine-tool Sand Instrument, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: tsyganov705@gmail.com, ORCID: 0000-0001-5682-7005
- Sakhniuk N. Candidate of Technical Sciences, Assistant Professor, Assistant Professor of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: nat76sah@ukr.net, ORCID: 0000-0003-2664-2602
- Lazarieva O. Senior Teacher of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: lazarevaolha@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3417-6309
- Kryvykh Y. Senior Teacher of the Department of Aircraft Engine Technology, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: juliya.krivikh@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3183-8776

**Purpose.** Development of a methodology for accelerated studies on the wear resistance of tribo-combinations operating under complex dynamic contact loading conditions and varying temperatures.

**Research methods.** A methodology and setup have been devised for conducting accelerated studies on the wear resistance of materials under various loading conditions (unidirectional sliding, impact with sliding, impact with sliding in two mutually perpendicular directions) similar to operational conditions and temperatures. Additionally, the separate influence of each parameter affecting the system load is considered. The variation in load magnitude and displacement amplitudes of specimens is carried out directly during the tests using a control system with stepper motors controlled by the Arduino Uno computing platform.

**Results.** It is demonstrated that the increase in the multicomponent nature of dynamic loading in tribo-coupling contact leads to an escalation in the intensity of wear of heat-resistant alloys. The variation in wear intensity, depending on the test temperature, exhibits a complex nature. Determining the regularities and developing the conditions for the formation of a wear-resistant surface layer of parts of tribo-combinations is possible based on the analysis of the amount of wear and the condition of the surface, taking into account the real type of load (unidirectional sliding, impact with sliding, impact with sliding in two mutually perpendicular directions).

**Scientific novelty.** The physical modeling of the process of wear of the bandage shelves of the blades of the gas turbine under a complex thermodynamic load is considered.

**Practical value.** The setup and methodology for conducting accelerated tests of friction pair models under conditions approximating real tribo-combinations operating conditions with various types of loading on flat details are presented. This allows providing technological recommendations for enhancing the wear resistance of gas turbine engines. Conducting accelerated programmable tests will allow to study the condition of the tri-junctions during a load cycle close to the engine duty cycle in flight mode.

**Key words:** wear, testing setup, bandage shelves, blade, complex loading.

## References

1. Merkulov V. M., Ilyushchenko F. D. (2005). O vybore sposoba bandazhivaniya rabochih lopatok turbin GTD [On the choice of a method for banding the working blades of gas turbine engines]. *Aeroenginebuilding*, 2, 114–117.
2. Muravchenko F. M. (2008). Aktualnye problemy dinamiki, prochnosti i nadezhnosti aviadvigatelej [Current problems of dynamics, strength and reliability of aircraft engines]. *Problems of strength*, 5, 7–14.
3. Vorobiev Yu. S., Dyakonenko K. Yu., Romanenko V. N., Kulishov S. B., Skritsky A. N. (2006). Kolebaniya bandazhyrovannogo rabocheho kola HTD [Vibrations of a banded impeller of a gas turbine engine]. *Aerospace engineering and technology*, 9, 87–90.
4. Tsyganov V. V., Ivschenko L. Y. (2018). The methodological principles of the engineering of tribocoupling details surface under multicomponent loading. *Materials Science and Technology 2018, MS and T 2018*, 578–584.
5. Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. (1987). Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel. *Wear*, 101–117.
6. Yurov V. M., Oleshko V. S. (2019). The impact of the environment on the contact potential difference of metal machine parts. *Eurasian Physical Technical Journal*, 16,1 (31), 99–108.
7. Iwabuchi A. (1985). Fretting wear of Inconel 625 at high temperature and high L vacuum. *Wear*, 1–3, 163–175.
8. Ryzhov E. V. (1988). Contacting solid bodies under static and dynamic loads. Moscow : Mechanical engineering, 250.
9. Eremin E. N., Yurov V. M., Guchenko S. A. (2020). Wear resistance and tribological properties of high entropy coatings CrNiTiZrCu. *Eurasian Physical Technical Journal*, 1, 13–18.
10. Makeeva O. V., Oleshko V. S., Fedorov A. V., Yurov V. M. (2020). Development of a device for determining work electron output. *Eurasian Physical Technical Journal*, 1, 127–131.
11. Tsyganov V. V., Sheyko S. (2022). Features of engineering the wear-resistant surface of parts with the multicomponent dynamic load. *Wear*, 494–495, 204255.
12. Tsyganov V. V., Mokhnach R. E., Sheiko S. P. (2021). Increasing Wear Resistance of Steel by Optimizing Structural State of Surface Layer. *Steel in Translation*, 51, 2, 144–147.
13. Ivschenko L. Y., Tsyganov V. V., Adjerid S. (2013). Influence des conditions de chargement dynamique sur la resistance a l'usure des tribocontacts. *Journal Materiaux & Techniques*, 4, 403.1–403.7.
14. Dao-Juan Wang, De-Lin Sku, Xin-Cheng Gua. Effect of microstructure and properties on the high temperature wear characteristics of 3Cr2W8V (H21) steel. *Wear*, 1987, 101–117.
15. Frackowiak A., Olejnik A., Wróblewska A., Ciałkowski M. (2021). Application of the protective coating for blade's thermal protection. *Energies*, 2021, 14(1): 50.
16. Tsyganov V., Ivschenko L., Byalik H., Mokhnach R., Sakhniuk N. (2019). Creation of wearproof eutecticum composition materials for the details of the high temperature dynamic systems, MS and T 2019. *Materials Science and Technology 2019*, 450–456.

Одержано 18.01.2024

УДК 621.43

- Євсєєва Н. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: korskovanat@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3398-6537
- Сухонос Р. Ф. магістр, старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: romevs@zpu.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Крестьянінов С. П. магістр, менеджер по роботі з проблемним вантажем ТОВ «Нова пошта», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: krestyaninov095@gmail.com

## МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ ПРОГРІВУ СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ДВЗ ІЗ ЕЛЕКТРОПРИВОДОМ ВОДЯНОГО НАСОСА

**Мета роботи.** Полягає у визначенні функції залежності температури охолоджуючої рідини від часу прогріву системи охолодження малолітражного двигуна внутрішнього згорання у двох виконаннях – з насосом охолоджуючої рідини, що має постійний механічний привід, та з насосом, який має привід від електродвигуна.

**Методи дослідження.** Використані методи аналізу наукової літератури та теоретичного узагальнення, методи статистичного аналізу, синтезу, спостереження, метод проектної розробки. Графіки оброблялись методом найменших квадратів із знаходженням полінома функції температури від часу. Достовірність результатів оцінено індексом кореляції  $R^2$ .

**Отримані результати.** Розглянуто сучасні системи охолодження двигунів внутрішнього згорання, в тому числі оснащені насосом охолоджуючої рідини з прямим приводом від електродвигуна. Знайдено залежність температури прогріву двигуна від часу його роботи з механічним приводом насоса та приводом від електродвигуна. Проведено аналіз систем охолодження сучасного двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) з безпосереднім приводом насоса охолоджуючої рідини та з керованим електроприводом.

**Наукова новизна.** Аналіз показників системи охолодження бензинового двигуна легкового автомобіля показав їх залежність від часу прогріву двигуна під час холодного запуску. Встановлено, що у двигуна з електроприводом насоса охолоджуючої рідини скорочується час прогріву, у порівнянні з двигуном з механічним приводом насоса, на півтори хвилини, що забезпечує економію палива 3 %, при температурі ввімкнення електродвигуна насоса 130 °С. Встановлено, що використання електропривода насосу скорочує час його роботи майже на 50 %.

**Практична цінність.** Визначено функції залежності температури рідини від часу прогріву бензинового двигуна з безпосереднім приводом насоса охолоджуючої рідини та з керованим електроприводом, що дає змогу модернізувати систему охолодження малолітражних двигунів внутрішнього згорання.

**Ключові слова:** математична модель, метод найменших квадратів, насос, охолоджуюча рідина, прогрів, система охолодження, функція.

### Вступ

При згоранні паливоповітряної суміші в циліндрі двигуна внутрішнього згорання (ДВЗ) температура робочого тіла суттєво підвищується, і короткочасно може сягати 1600...3200 К. За відсутності примусового охолодження стінок камери згорання, наявна теплота здатна призвести до перегріву деталей двигуна, зміни їх геометричних розмірів та руйнування [1–3].

З іншого боку, порушення теплового балансу ДВЗ надмірним зниженням температури робочого тіла за цикл негативно впливає як на надійність двигуна, так і на економічність його роботи. При переохолодженні двигуна збільшуються втрати тепла з охолоджувальною рідиною, не в повному обсязі випаровується й згоряє паливо, в рідкому вигляді воно проникає в піддон картера і розріджує моторну оливу. Це призводить до зниження потужності і економічності двигуна і швидкого зносу деталей.

Охолодження ДВЗ може здійснюватись рідиною, повітрям, а також (частково) моторною оливою (охолодження поршнів) і паливом (охолодження насосфорсунок дизелів, форсунок систем безпосереднього впорскування бензину або газу). Залежно від прийнятого способу охолодження, до складу системи охолодження входять різні пристрої і механізми, які забезпечують підведення охолоджувача до деталей і теплообмінників [4, 5].

При нормальній тривалій роботі, у більшості двигунів температура охолоджуючої рідини повинна бути від 85 °С до 105 °С. Швидко досягнення такої температури під час «холодного» запуску (процес прогріву двигуна) є вкрай бажаним.

На ряді сучасних двигунів температура охолоджуючої рідини може перевищувати 120 °С.

На даний час дослідженню процесів, що відбуваються в системах охолодження ДВЗ, приділяється недостатньо уваги. Зокрема, актуальним питанням є

особливості роботи системи охолодження з насосом охолоджуючої рідини з приводом від електродвигуна. За наявними аналітичними даними, використання таких насосів дозволяє покращити економічність двигуна.

На більшості автомобільних двигунах застосовується примусова система охолодження, в якій рух охолоджуючої рідини здійснюється рідинним насосом [1, 6]. На шляху охолоджуючої рідини з сорочки охолодження в верхньому патрубку встановлюється термостат – клапан, який автоматично, в залежності від температури, змінює напрямок руху охолоджувальної рідини. Якщо рідина холодна, клапан термостата перекриває прохід рідини в радіатор і направляє її відразу до насоса – здійснюється циркуляція по «малому колу» системи охолодження. Клапан термостата починає відкриватися, пропускаючи охолоджуючу рідину в радіатор, при температурі від 70 °C до 90 °C, в залежності від типу двигуна та його особливостей.

Інтенсивному охолодженню охолоджуючої рідини в радіаторі сприяє потік повітря, створюваний нагнітаючим або всмоктуючим вентилятором. Швидкість потоку охолоджуючого повітря залежить від швидкості руху автомобіля. Змінювати швидкість потоку можна кількома способами [7, 8, 15]:

- за допомогою жалюзі, встановлених перед радіатором;
- відключенням одного з вентиляторів;
- роботою гідромфти привода вентилятора.

Контроль над роботою системи охолодження здійснюється за допомогою датчиків і показчика температури, а також сигналізатора аварійної температури охолоджувальної рідини. Датчики встановлюються в системі охолодження двигуна, а показчик і сигналізатор – на приладовій дошці в кабіні водія.

Механічне перекачування рідини по короткому колу охолодження при холодному запуску, як це реалізовано на більшості ДВЗ, вимагає певних витрат енергії і збільшує загальну витрату палива. Хоча термостат і перекриває велике коло з радіатором, але все одно через циркуляцію рідини двигун розігрівається довше [9]. Використання насоса прямого приводу від електродвигуна дозволяє оптимізувати (пришвидшити) процес прогріву охолоджуючої рідини, а значить, двигун швидше вийде на нормальний тепловий режим роботи.

### Мета дослідження

Метою даної роботи є дослідження процесів, які відбуваються при прогріві системи охолодження бензинового ДВЗ з рідинною системою охолодження, у двох виконаннях – з насосом охолоджуючої рідини, що має постійний механічний привід, та з насосом, який має привід від електродвигуна; визначення функцій залежності температури охолоджуючої рідини від часу прогріву.

### Матеріали та методи досліджень

За основу для розрахунків та моделювання роботи системи охолодження були взяті дані фірми ElringKlinger Motortechnik GmbH (ФРН), інженери якої проводили стендові випробування бензинових малолітражних двигунів автомобілів Opel Meriva і Ford Focus на змішаному та міському циклах роботи [9]. В базовому виконанні досліджуваній двигун має механічний привід насоса охолоджуючої рідини.

На рисунку 1 показано характеристики підігріву рідини в системі охолодження бензинового 4-тактного ДВЗ, під час запуску та прогріву, отримані за результатами експериментів [9]. Графік прогріву охолоджуючої рідини можна розбити на 4 етапи, найбільш інтенсивний прогрів відбувається під час другого етапу (позначення  $T_2$ ).

На рисунку 1а показано графік для двигуна із штатною системою охолодження, в якій рух рідини за малим та великим колами розподіляється термостатом, на рисунку 1б – двигуна із електроприводом насоса охолоджуючої рідини. В першому випадку температуру  $T = 130$  °C охолоджуюча рідина набуває за  $t = 200$  с, в другому – майже вдвічі швидше, за  $t = 125$  с. Зменшений час прогріву двигуна з електроприводом насоса охолоджуючої рідини забезпечує швидший вихід двигуна на необхідний робочий тепловий режим, що забезпечує економію палива 3 %.

Температура ввімкнення електродвигуна насоса становить 130 °C. До досягнення цієї температури водяний насос не працює зовсім.

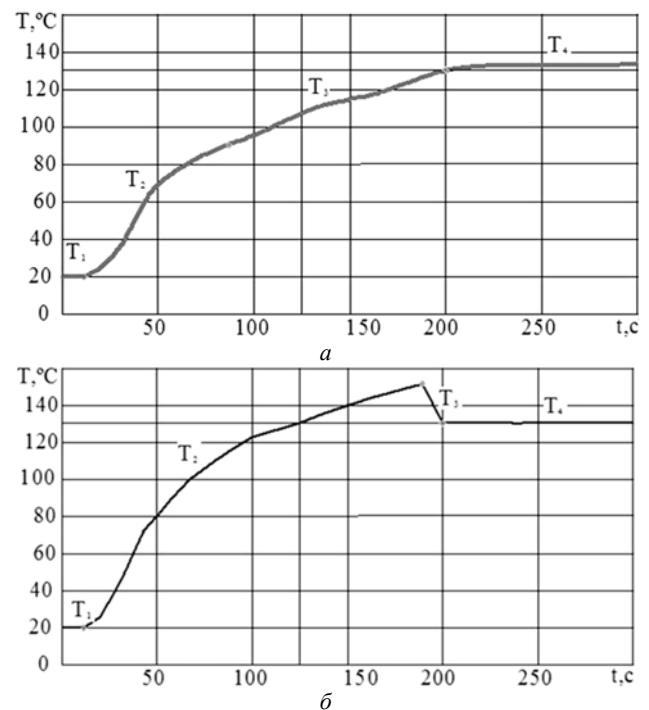


Рисунок 1. Графік залежності прогріву двигуна від часу його роботи:

а – штатна система охолодження; б – модернізована система охолодження

**Виклад основного матеріалу дослідження**

За рекомендаціями [1, 10] для бензинового двигуна робочим об'ємом  $\Sigma V_h = 1,3 \text{ дм}^3$  розраховано параметри системи рідинного охолодження:

- кількість теплоти, що передається охолоджуючому середовищу  $Q_{в} = 60,8 \text{ кДж/с}$ ;
- розрахункова витрата насоса  $G_{ж.р} = 1,84 \text{ дм}^3/\text{с}$ ;
- потужність, що витрачається насосом,  $N_{в.н.} = 0,27 \text{ кВт}$ .

Розрахунок системи охолодження виконано за даними теплового балансу двигуна в комп'ютерній програмі Engine Calculation [11].

Експериментальні дані графіку залежності прогріву модернізованого двигуна від часу його роботи на інтервалі  $T_2$  (рис. 1б), для зручності їх використання в подальших дослідженнях, представляємо у вигляді математичної поліноміальної функції. З огляду на форму графіка, згідно рекомендацій [12, 13], для даної залежності знаходимо математичну поліноміальну функцію другого порядку.

На графіку ділянки найбільш інтенсивного прогріву  $T_2$  ставимо ряд точок, які заносимо до таблиці 1 обчислення найменших квадратів. В цій же таблиці наведено результати подальших розрахунків.

**Таблиця 1** – обчислення методом найменших квадратів

$t^0$	$t$	$t^2$	$t^3$	$t^4$	$T$	$T \cdot t$	$t^2 \cdot T$
1	10	100	1000	10000	20	200	2000
1	20	400	8000	160000	25	500	10000
1	30	900	27000	810000	44	1320	39600
1	40	1600	64000	2560000	66	2640	105600
1	50	2500	125000	6250000	80	4000	200000
1	60	3600	216000	12960000	92	5520	331200
1	70	4900	343000	24010000	102	7140	499800
1	80	6400	512000	40960000	110	8800	704000
1	90	8100	729000	65610000	116	10440	939600
1	100	10000	1000000	100000000	122	12200	1220000
1	110	12100	1331000	146410000	125	13750	1512500
1	120	14400	1728000	207360000	128	15360	1843200
1	130	16900	2197000	285610000	132	17160	2230800
1	140	19600	2744000	384160000	137	19180	2685200
1	150	22500	3375000	504250000	140	21000	3150000
1	160	25600	4096000	655360000	143	22880	3660800
1	170	28900	4913000	835210000	146	24820	4219400
1	180	32400	5832000	1049760000	149	26820	4827600
1	190	36100	6859000	1303210000	150	28500	5415000
19	1900	247000	36100000	5624516000	2027	242230	33596300

Звідси система для знаходження коефіцієнтів поліному  $a_0, a_1, a_2$  має наступний вигляд

$$\begin{cases} 19 \cdot a_0 + 1900 \cdot a_1 + 247000 \cdot a_2 = 2027; \\ 1900 \cdot a_0 + 247000 \cdot a_1 + 36100000 \cdot a_2 = 242230; \\ 247000 \cdot a_0 + 36100000 \cdot a_1 + 5624516000 \cdot a_2 = 33596300. \end{cases}$$

Розв'язання системи лінійних рівнянь методом Крамера

$$\Delta = \begin{vmatrix} 19 & 1900 & 247000 \\ 1900 & 247000 & 36100000 \\ 247000 & 36100000 & 5624516000 \end{vmatrix} = 144597828000000;$$

$$\Delta_1 = \begin{vmatrix} 2027 & 1900 & 247000 \\ 242230 & 247000 & 36100000 \\ 33596300 & 39100000 & 5624516000 \end{vmatrix} = 389552212000000;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 19 & 2027 & 247000 \\ 1900 & 242230 & 36100000 \\ 247000 & 33566300 & 5624516000 \end{vmatrix} = 2433874821200000;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 19 & 1900 & 2027 \\ 1900 & 247000 & 24223 \\ 247000 & 36100000 & 33596300 \end{vmatrix} = -715538100000.$$

Знаходження коефіцієнтів полінома:

$$a_0 = \frac{\Delta_1}{\Delta} = \frac{38955221200000}{14459782800000} = 2,69;$$

$$a_1 = \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{243387482120000}{14459782800000} = 1,68;$$

$$a_2 = \frac{\Delta_3}{\Delta} = \frac{-715538100000}{14459782800000} = -0,0049.$$

Таким чином, шуканий поліном функції  $T(t)$  має вигляд:

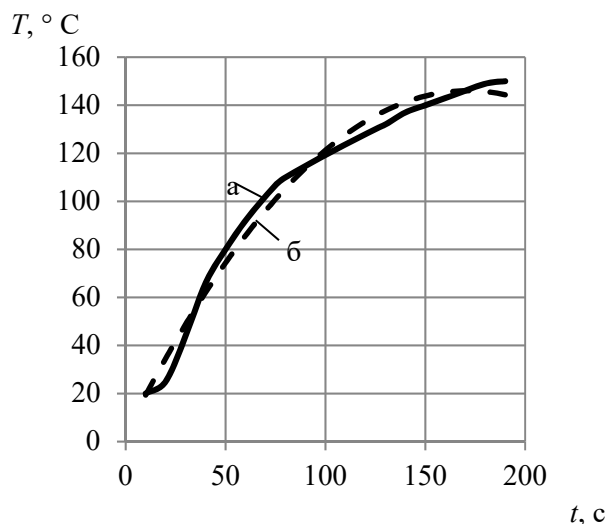
$$T = 2,69 + 1,68 \cdot t - 0,0049 \cdot t^2.$$

За знайденою функцією будуємо графік і порівнюємо із результатами експерименту (див. рис. 2). Розрахований індекс кореляції  $R^2 = 0,987$  підтверджує тотожність експериментальної та отриманої математично характеристики прогріву рідини в системі охолодження бензинового ДВЗ з електроприводом насоса.

Аналогічним чином виконуємо пошук функції  $T(t)$  для двигуна в із системою охолодження в штатному виконанні (див. рис. 1а). Поліном даної функції має вигляд:

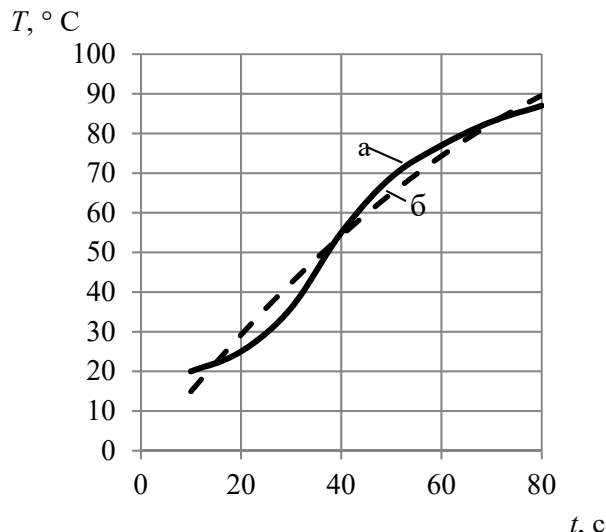
$$T = -1,46 + 1,66 \cdot t - 0,0066 \cdot t^2.$$

Отриманий графік функції температури від часу прогріву наведено на рисунку 3.



**Рисунок 2.** Залежність температури прогріву двигуна з електроприводом насоса охолоджуючої рідини від часу його роботи в інтервалі  $T_2$ :

*a* – експеримент; *б* – графік функції



**Рисунок 3.** Залежність температури прогріву двигуна з прямим приводом насоса від часу його роботи в інтервалі  $T_2$ :

*a* – експеримент; *б* – графік функції

Розрахований індекс кореляції  $R^2 = 0,977$  підтверджує тотожність експериментальної та отриманої математично характеристики прогріву рідини в системі охолодження з механічним приводом насоса та рухом охолоджуючої рідини по великому та малому колах.

### Висновки

Проведено аналіз існуючих систем охолодження двигунів внутрішнього згорання при їх роботі на режимі холодного запуску. Встановлено, що актуальним є забезпечення насоса охолоджуючої рідини прямим приводом від електродвигуна.

Схему системи охолодження досліджуваного двигуна було модернізовано заміною привода насоса охолоджуючої рідини, а саме, ремінний привід через шків замінено на прямий привід від електродвигуна постійного струму моделі SLT42GM20.

Встановлено інтенсивність прогріву бензинового двигуна базової конструкції від часу його роботи, та двигуна з електроприводом насоса охолоджуючої рідини. Здійснено аналіз результатів показників модернізованого ДВЗ, який показав, що час прогріву двигуна з електроприводом насоса охолоджуючої рідини скорочується від часу прогріву з механічним приводом. Реальний час прогріву двигуна скорочується на півтори хвилини, що забезпечує економію палива 3 %. Температура ввімкнення електродвигуна насоса становить 130 °С.

Для 1, 3- літрового бензинового двигуна визначено потрібні параметри насоса: потужність  $N_{в.н} = 0,27$  кВт; частота обертання колінчастого вала двигуна  $n = 5600$  хв<sup>-1</sup>.

### Список літератури

1. Тимченко І. І. Системи ДВЗ: Навчальний посібник / І. І. Тимченко, П. В. Жадан, С. С. Жилін. – За заг. ред. проф. І. І. Тимченко. – Х. : ХНАДУ, 2007. – 204 с.
2. Chastain J. Advanced Engine Cooling – Components, Testing and Observations / J Chastain, J. Wagner, J. Eberth // IFAC Proceedings Volumes. – Vol. 43, Issue 7, July 2010, P. 294-299. doi:10.3182/20100712-3-DE-2013.00007
3. Sureshkumar J. Overview on design of electric coolant pump for automotive application / J. Sureshkumar, R. Sivanantham, A. M. S. Thangappapillai, G. Murali, M. Shariq // SAE Technical Paper, 2019. – 19 p. doi:10.4271/2019-26-0114
4. Толстоногов А. П. Системы охлаждения поршневых ДВС: Учеб. пособие / А. П. Толстоногов. – Самара: Самар. гос. аэрокосм. ун-т, 2002. – 208 с.
5. Active coolant control strategies in automotive engines / K. B. Kim, K. W. Choi, K. H. Lee, K. S. Lee // International Journal of Automotive Technology. – 2010. – Vol. 11(6). – P. 767–772.
6. Balich G. W. The Gasoline 4-Stroke Engine for Automobiles / G. W. Balich, C. R. Aschenbach. – Notre Dame : University of Notre Dame, 2004. – 156 p.
7. Абрамчук Ф. І. Автомобільні двигуни. Підруч. для студентів спец. вищ. навч. Закладів / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов. – К. : Арістей, 2004. – 438 с.
8. Yoon Hyuk Shin. Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption / Yoon Hyuk Shin, Sung Chul Kim, Min Soo Kim // Energy. – Vol. 57, 1 August 2013, P. 624–631. doi:10.1016/j.energy.2013.04.073
9. Суворов О. Электрическая помпа системы охлаждения / О. Суворов. – 2013. – Сайт «suvorov-castom.ru». – Режим доступа : <http://suvorov-castom.ru/elektricheskaya-pompa-sistemy-oxlzhdeniya-legko/>
10. Колчин А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М. : Высш. шк., 2008. – 496 с.
11. 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.
12. Задачин В. М. Чисельні методи : навчальний посібник / В. М. Задачин, І. Г. Конюшенко. – Х. : Вид. ХНЕУ ім. С. Кузнеця, 2014. – 180 с.
13. Лук'яненко І. Г. Економетрика: Підручник / І. Г. Лук'яненко, Л. І. Краснікова. – К. : Товариство «Знання», 1998. – 494 с.
14. Євсєєва Н. О. Підвищення технічних характеристик автомобіля шляхом удосконалення системи охолодження двигуна / Н. О. Євсєєва, С. П. Крест'янінов // Тиждень науки: щоріч. наук.-практ. конф., 16–20 квітня 2018 р.: тези доп. / Редкол.: В. В. Наумик (відпов. ред.) Електрон. дані. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – С. 161–162.
15. Hoon Cho. Application of controllable electric coolant pump for fuel economy and cooling performance improvement / Hoon Cho, Dohoy Jung, Z. S. Filipi, D. N. Assanis, J. Vanderslice, W. Bryzik // Journal of engineering for gas turbines and power. – 2007. – Vol. 129(1). – P. 239–244. doi:10.1115/1.2227035

Одержано 02.02.2024

## MATHEMATICAL MODELING OF HEATING PROCESS THE COOLING SYSTEM OF THE INTERNAL COMBUSTION ENGINE USING WATER PUMP ELECTRIC DRIVE

- Yevsyeyeva N. Ph. D., Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [korskovan-at@ukr.net](mailto:korskovan-at@ukr.net), ORCID: 0000-0002-3398-6537
- Sukhonos R. M. Sc., Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [romevs@zp.edu.ua](mailto:romevs@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Krestjaninov S. M. Sc., manager, PJSC “Nova Poshta”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [krestyaninov095@gmail.com](mailto:krestyaninov095@gmail.com)

**Purpose.** It is to determine the functions of the temperature of the coolant on the time of heating of the cooling system of the small internal combustion engine in two variants – with a coolant pump with a constant mechanical drive, and with an electrical driven pump.

**Research methods.** Methods of analysis of scientific literature and theoretical generalization, methods of statistical analysis, synthesis, observation, method of project development have been used. The graphs were treated with the least squares with the finding a polynomial function of temperature from time. The accuracy of the results is evaluated by the correlation index  $R^2$ .



**Results.** Modern internal combustion engines cooling systems, including the direct driven coolant pump, are considered. The dependence of the engine heating temperature on the time of its operation with a mechanical drive of the pump and a drive from the electric motor was found. Analysis of cooling systems of the modern internal combustion engine with a direct drive of the coolant pump and with a controlled electric drive was carried out.

**Scientific novelty.** Analysis of the cooling system of the car gasoline engine showed their dependence on the time of heating of the engine during cold start. It is established that engine with electrical driven pump has been found to reduce the heating time, compared to the engine with a mechanical drive of the pump, for one and a half minutes. This provides fuel savings 3 %, at the temperature of the pump motor switching on 130 °C. It is established that the use of the electric driven pump reduces its operation time by almost 50 %.

**Practical value.** The functions of the coolant temperature dependence on the time of heating of the gasoline engine with the direct driven coolant pump and with the electrical driven pump are determined. This makes it possible to modernize the cooling system of small internal combustion engines.

**Key words:** mathematical model, method of least squares, pump, coolant, heating, cooling system, function.

## References

1. Timchenko, I. I., Zhadan, P. V., Zhilin, S. S. (2007). *Sistemi DVZ: Navchalnij posibnik [ICE Systems: Study guide]*, Kharkiv (Ukraine): KhNADU, 204.
2. Chastain J., Wagner, J. Eberth (2010). *Advanced Engine Cooling – Components, Testing and Observations*. IFAC Proceedings Volumes 6 43, 7, 294–299. doi:10.3182/20100712-3-DE-2013.00007
3. Sureshkumar, J., Sivanantham, R., Thangappapillai, A. M. S., Murali, G., Shariq, M. (2019). Overview on design of electric coolant pump for automotive application. SAE Technical Paper 2019-26-01146 19. doi:10.4271/2019-26-0114
4. Tolstonogov, A. P. (2002). *Sistemy ohlazhdeniya porshnevnyh DVS: Uchebnoe Posobie [Cooling systems for piston internal combustion engines: Textbook]*, Samara (Russia) : Samara State Aerospace University, 208.
5. Kim, K. B., Choi, K. W., Lee, K. H., Lee, K. S. (2010). Active coolant control strategies in automotive engines. *International Journal of Automotive Technology* 11(6), 767–772.
6. Balich, G. W., Aschenbach, C. R. *The Gasoline 4-Stroke Engine for Automobiles* (2004). Notre Dame (USA): University of Notre Dame 6 156.
7. Abramchuk, F. I., Gutarevich Ju. F., Dolganov, K. E. (2004). *Avtomobil'ni dviguni [Automobile engines]*, Kyiv (Ukraine): Aristej, 438.
8. Yoon Hyuk Shin, Sung Chul Kim, Min Soo Kim (2013). Use of electromagnetic clutch water pumps in vehicle engine cooling systems to reduce fuel consumption. *Energy*, 57, 624–631. doi:10.1016/j.energy.2013.04.073
9. Suvorov, O. Electric pump of the cooling system. Available at : <http://suvorov-castom.ru/elektricheskaya-pompa-sistemy-oxlazhdeniya-legko/>
10. Kolchin, A. I., Demidov V. P. (2008). *Raschet avtomobilnyh i traktornyh dvigatelej: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Calculation of automobile and tractor engines: Textbook for universities]*. 4<sup>th</sup> Edition, Moscow, 496.
11. 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 (Ukraine): National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 130.
12. Zadachyn, V. M., Konyushenko, I. G. (2014). *Chiselni metodi : navchalnij posibnik [Numerical methods: textbook]*. – Kharkiv (Ukraine): Simon Kuznets Kharkiv National University of Economics, 180.
13. Luk'yanenko, I. G., Krasnikova, L. I. (1998). *Ekonometrika: Pidruchnik [Econometrics: Textbook]*, Kyiv (Ukraine): Tovarnistvo “Znannya”, 494.
14. Yevsyeyeva, N. O., Krestjaninov S. P. (2018). *Pidvishhennja tehnicnih charakteristik avtomobilja shljahom udoskonalennja sistemi oholozhennja dviguna [Improving the technical characteristics of a car by improving the engine cooling system]*. Science week-2018 : Annual scientific and practical Conference. Zaporizhzhia (Ukraine), 161–162.
15. Hoon Cho, Dohoy Jung, Filipi, Z. S., Assanis, D. N., Vanderslice, J., Bryzik, W. (2007). Application of controllable electric coolant pump for fuel economy and cooling performance improvement. *Journal of engineering for gas turbines and power*, 129(1), 239–244. doi:10.1115/1.2227035

УДК 621.431

- Слинько Г. І. д-р техн. наук, професор, завідувач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: gslynko@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Рябошапка Н. Є. старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: ryaboshapka.ne@gmail.com, ORCID: 0000-0003-0334-8363
- Сухонос Р. Ф. магістр, старший викладач кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: romevs@zp.edu.ua, ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Євсєєва Н. О. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри двигунів внутрішнього згорання Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, e-mail: korskovanat@ukr.net, ORCID: 0000-0002-3398-6537
- Солдатченков О. Г. магістр, студент групи Т-412м Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна

## ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ПРОПУСКІВ ЗАПАЛЮВАННЯ НА НЕРІВНОМІРНІСТЬ ОБЕРТАННЯ КОЛІНЧАСТОГО ВАЛУ БЕНЗИНОВОГО ДВИГУНА

**Мета роботи.** Дослідити вплив пропусків запалювання на нерівномірність обертального моменту на колінчастому валу бензинового двигуна внутрішнього згорання з іскровим запалюванням.

**Методи дослідження.** Наведено результати термодинамічного розрахунку робочого циклу, динамічного розрахунку параметрів двигуна на номінальному режимі роботи та двигуна із пропуском запалювання одного циліндра. Для виконання дослідження використовувалась комп'ютерна програма Engine Calculation, пакет програм Microsoft Office. Об'єкт дослідження – чотиритактний чотирициліндровий бензиновий двигун MeM3-245. Предмет дослідження – коефіцієнт нерівномірності обертального моменту ДВЗ  $\mu$ .

**Отримані результати.** Вирішено актуальне питання дослідження впливу пропусків запалювання на показники нерівномірності обертання колінчастого валу ДВЗ з іскровим запалюванням. Розраховано коефіцієнт нерівномірності обертального моменту для 4-тактного 4-циліндрового двигуна MeM3-245 при роботі на номінальному режимі  $\mu = 6,164$ . Встановлено, що внаслідок несправності (виключення з роботи одного циліндра) середній ефективний момент двигуна зменшується на 29,4 %. Розраховано значення коефіцієнта нерівномірності обертального моменту несправного двигуна  $\mu = 12,165$ , що вдвічі перевищує значення для справного двигуна. Встановлено, що за рівнем нерівномірності обертального моменту, 4-циліндровий рядний двигун MeM3-245 з пропусками запалювання наближається до одноциліндрових двигунів.

**Наукова новизна.** Вперше теоретично доведено, що внаслідок відсутності запалювання в одному з циліндрів 4-тактного 4-циліндрового двигуна при роботі на номінальному режимі середній ефективний момент двигуна зменшується на 29,4 %. Значення коефіцієнта нерівномірності обертального моменту  $\mu$  двигуна з пропусками запалювання вдвічі перевищує значення для справного двигуна, що наближається до аналогічних значень одноциліндрових двигунів.

**Практична цінність.** Методика розрахунку коефіцієнта нерівномірності обертального моменту ДВЗ може бути використана при проектуванні нових та модернізації існуючих ДВЗ.

**Ключові слова:** 4-тактний двигун внутрішнього згорання, динамічний розрахунок, індикаторна діаграма, коефіцієнт нерівномірності обертального моменту, обертальний момент, пропуски запалювання.

### Вступ

Двигуни внутрішнього згорання (ДВЗ) сьогодні залишаються поза конкуренцією як найбільш універсальні енергетичні машини для приводу автономних силових установок на транспорті й будівництві, в сільському господарстві і для обслуговування військової техніки тощо.

В процесі експлуатації ДВЗ виникають несправності, які можуть призводити до тимчасового або постійного виходу з роботи одного чи кількох циліндрів.

Зокрема, типовою несправністю в ДВЗ з іскровим запалюванням є пропуски запалювання. Основними причинами «троїння» двигуна є [1, 2]:

- несправна свіча запалювання;
- несправний високовольтний провід;

- поганий контакт в системі запалювання;
- несправна катушка запалювання;
- несправна паливна форсунка;
- несправна проводка форсунки;
- низька компресія в циліндрі;
- збіднення паливоповітряної суміші;
- негерметичність циліндра;
- забруднений паливний фільтр;
- низька якість палива.

При роботі двигуна з пропусками запалювання («двигун тріть») спостерігається погіршення його техніко-економічних показників, поява додаткових звуків, поява чорного диму та/або запаху бензину, підвищення вібрацій. Останні інтенсифікуються внаслідок нерівномірності обертання колінчастого валу, і дослідженню цього питання присвячена дана робота

### Аналіз досліджень та публікацій

За результатами аналізу літературних джерел [3–11] встановлено, що пропуски запалювання ДВЗ спричиняють коливання колінчастого валу, які оцінюються коефіцієнтом нерівномірності ходу колінчастого валу  $\delta$  та коефіцієнтом нерівномірності обертального моменту ДВЗ  $\mu$ . Для підвищення довговічності двигуна, покращення комфорту при експлуатації, бажано забезпечувати  $\delta \rightarrow 0$ ,  $\mu \rightarrow 0$ . Найменші значення коефіцієнтів  $\delta$ ,  $\mu$  досягаються у багатциліндрових двигунах, тобто чим більше циліндрів у двигуна, тим нерівномірність обертання колінчастого валу менша (рис. 1).

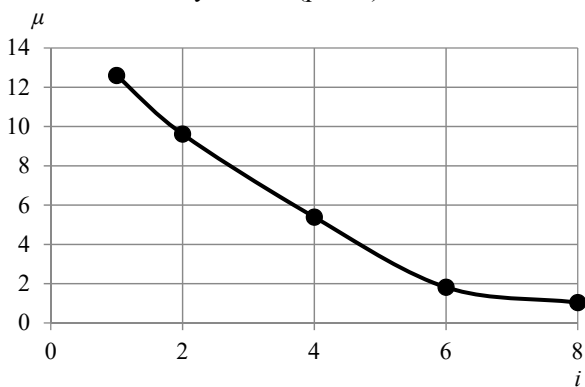


Рисунок 1. Залежність середнього значення коефіцієнта нерівномірності обертального моменту  $\mu$  в залежності від кількості циліндрів двигуна  $i$

Наразі не існує уніфікованих методик розрахунку нерівномірності ходу колінчастого валу та нерівномірності обертального моменту, оскільки ці параметри залежать від великої кількості конструктивних та регулювальних факторів кожного окремого двигуна.

При розрахунках двигунів внутрішнього згорання приймається, що колінчастий вал є абсолютно жорстким і обертається з постійною кутовою швидкістю  $\omega$  [4]. Проте дане припущення не відповідає дійсності [12]. Навіть при сталому режимі роботи ДВЗ, при одиничному обертанні колінчастого валу, кутова швидкість не є незмінною. При нормальній роботі

двигуна основною причиною цього є нерівномірність обертання валу внаслідок процесів, що відбуваються в циліндрі.

З класичних положень динаміки ДВЗ [3–5] відомо, що крутний момент є періодичною функцією кута повороту колінчастого валу. Нерівномірність зміни сумарного обертального моменту обумовлюється особливостями протікання робочого процесу двигуна і кінематичними властивостями його кривошипно-шатунного механізму. Для оцінки ступеня нерівномірності індикаторного обертального моменту ДВЗ використовують коефіцієнт нерівномірності обертального моменту  $\mu$ .

Як вже було сказано, коефіцієнт нерівномірності обертального моменту ДВЗ зменшується зі збільшенням кількості циліндрів. В той же час, для одного і того ж двигуна величина  $\mu$  має різні значення на різних режимах роботи, тому для порівняння двигунів значення коефіцієнта нерівномірності обертального моменту визначають для режиму номінальної потужності [3].

В циліндрі під час згорання паливоповітряної суміші утворюються екстремум значення обертального моменту. Під час наростання тиску в циліндрі кутова швидкість обертання колінчастого валу інтенсивно зростає, від мінімального  $\omega_{min}$  до максимального  $\omega_{max}$  значення. Під час такту впуску та випуску значення обертального моменту найнижчі.

За величиною обертального моменту, більшого за середнє значення, розраховують необхідні параметри маховика.

Рівень коефіцієнта нерівномірності ходу  $\delta$ , який характеризує коливання кутової частоти при встановленому режимі роботи двигуна внаслідок нерівномірності обертального моменту, значно впливає на роботу двигуна (для автомобільних двигунів  $\delta$  приймається  $\delta = 0,01 \dots 0,02$  [3, 5] або  $\delta = 0,02 \dots 0,03$  [4]; для тракторних двигунів  $\delta = 0,003 \dots 0,01$  [3]). Більші значення  $\delta$  посилюють ударні навантаження деталей двигуна та прискорюють їх зношування. Менші значення  $\delta$  вимагають використання маховиків зі збільшеною масою. Це призводить до збільшення габаритів маховика, що ускладнює компоновку двигуна, збільшує масу агрегату.

Нерівномірність обертання колінчастого валу ДВЗ досліджують аналітично або експериментально. Дослідження власне нерівномірності обертання колінчастого валу ДВЗ ускладнюється додатковим впливом неврівноважених сил та моментів від неврівноважених елементів кривошипно-шатунного механізму.

В роботі [5] запропонована аналітично-розрахункова методика теплового розрахунку несправного циліндра ДВЗ, динамічного розрахунку двигуна з несправним циліндром, розрахунку зовнішньої характеристики несправного ДВЗ. Однак, результати теоретичних досліджень не підтверджено порівнянням з експериментальними даними.

В роботі [7] проведено аналіз процесів та представлено розроблений прилад, який дозволяє контро-

лювати нерівномірність обертання колінчастого валу двигуна. Вимірювальна система включає фотоелектронні датчики, один з яких дозволяє зчитувати момент проходження верхньої мертвої точки, а другий контролює кутову швидкість маховика. Прилад перетворює сигнали з цих датчиків в форму, необхідну для візуалізації робочого періодичного процесу на екрані осцилографа. В роботі наведена структурна схема приладу і його амплітудно-частотна характеристика. Однак, не надано результатів експериментального використання приладу.

В роботах [8, 11] наведено огляд методів безрозбірного діагностування тепловозного дизеля та аналіз методу діагностування за нерівномірністю частоти обертання колінчастого валу; виконано моделювання нерівномірності обертання колінчастого валу дизеля. Наведена методика має значний обсяг складних розрахунків і обмежену можливість використання.

Загалом, можна стверджувати, що не існує універсальних методик розрахунку нерівномірності ходу колінчастого валу та нерівномірності обертального моменту для ДВЗ різних типів, оскільки ці параметри залежать від великої кількості конструктивних та регульовальних факторів.

#### Мета роботи

Дослідити вплив пропусків запалювання на нерівномірність обертання колінчастого валу (коефіцієнт нерівномірності обертального моменту ДВЗ  $\mu$ ) бензинового ДВЗ з іскровим запалюванням.

#### Матеріал і методика досліджень

В якості об'єкта дослідження обрано 4-циліндровий бензиновий двигун МеМЗ-245 номінальної потужністю  $N_e = 37,5$  кВт при  $n = 5400$  хв<sup>-1</sup> [13, 14].

Вплив пропусків запалювання на нерівномірність обертання колінчастого валу ДВЗ визначаємо за наступною методикою.

За допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation [15] виконуються розрахунки термодинамічного циклу двигуна внутрішнього згорання, що працює на номінальному режимі та із пропуском запалювання одного циліндра (приймається, що процес згорання в циліндрі не відбувся зовсім). Для обох випадків розраховуються: параметри робочого тіла в циліндрі (тиск, температура, маса і об'єм за цикл); індикаторні та ефективні показники двигуна.

За допомогою методик [3, 15] розраховуються сили та моменти, які діють в кривошипно-шатунному механізмі. Для 4-циліндрового двигуна МеМЗ-245 будується діаграма обертальних моментів, яка враховує конструкцію колінчастого валу та порядок роботи циліндрів 1-3-4-2.

Далі розраховується коефіцієнт нерівномірності обертального моменту двигуна

$$\mu = \frac{M_{кр\max} - M_{кр\min}}{M_{кр\text{ср}}}, \quad (1)$$

де  $M_{кр\max}$ ,  $M_{кр\min}$ ,  $M_{кр\text{ср}}$  – максимальний, мінімальний та середній обертальний момент двигуна відповідно.

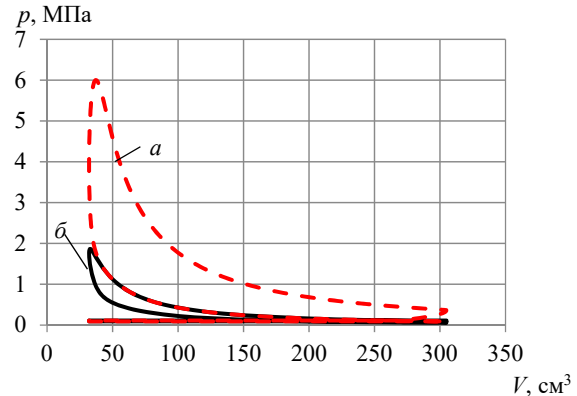
#### Виклад основного матеріалу дослідження

Виконано тепловий розрахунок циклу двигуна МеМЗ-245 на номінальному режимі, розраховані параметри робочого тіла (тиск  $p$ , температура  $T$ , маса  $m$ , об'єм  $V$ ) при різних кутах  $\varphi$  повороту кривошипа колінчастого валу (ПКВ).

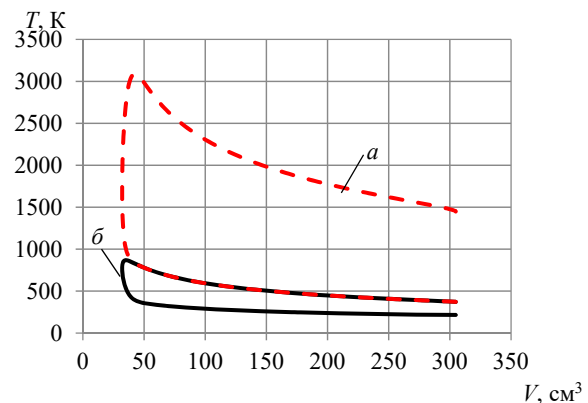
За даними розрахунку побудовано згорнуті індикаторні діаграми тиску  $p(V)$  та температури  $T(V)$  в циліндрі (рис. 2а, рис. 3а).

Основними параметрами, які характеризують механічну і термічну напруженість деталей двигуна, є тиск і температура робочого тіла. Визначені величини максимального тиску  $p_{\max} = 6,003$  МПа (при  $\varphi = 374^\circ$  ПКВ) і максимальної температури  $T_{\max} = 3088,3$  К (при  $\varphi = 380^\circ$  ПКВ) не перевищують максимально допустимих для бензинових ДВЗ  $p_{\text{доп}} = 8 \dots 10$  МПа і  $T_{\text{доп}} = 3000 \dots 3200$  К [15], тобто на номінальному режимі забезпечується надійна довготривала робота двигуна.

Розраховані ефективні показники двигуна відрізняються від вихідних величин не більше, ніж на 3,2 %, що свідчить про правильність виконаного теплового розрахунку.



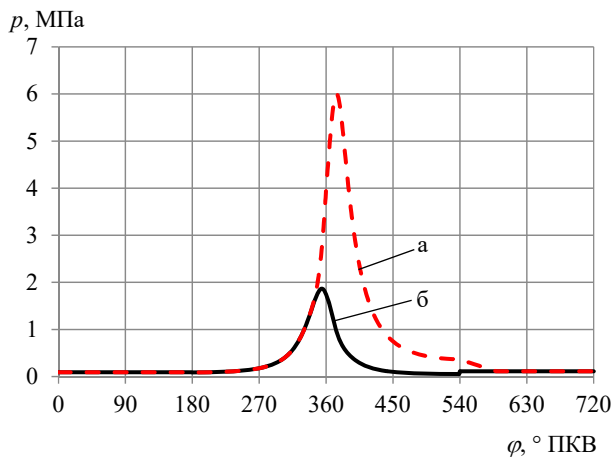
Рисуюнок 2. Індикаторна діаграма тиску:  
 а – справний двигун; б – згорання немає



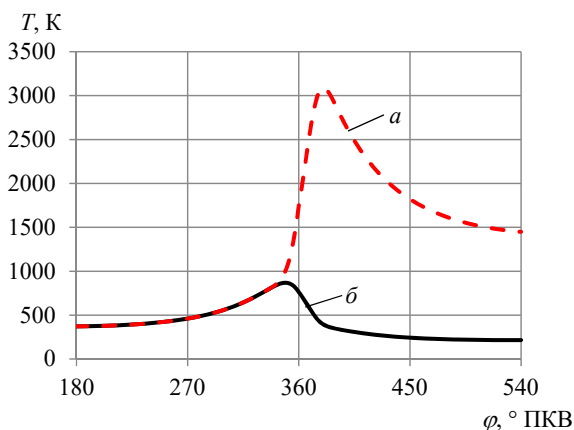
Рисуюнок 3. Індикаторна діаграма температури:  
 а – справний двигун; б – згорання немає

За допомогою комп'ютерної програми Engine Calculation розраховано параметри робочого тіла в циліндрі за цикл при відсутності згорання. Для цього задаємо величину нижчої теплоти згорання  $H_u = 0$ . За результатами розрахунку в програмі будуємо порівняльні індикаторні діаграми тиску та температури справного та несправного (рис. 2б, рис. 3б) двигуна. З діаграм видно, що і тиск, і температура, на такті робочого ходу зменшились. З розгорнутих діаграм тиску та температури (рис. 4б, рис. 5б) видно, що процес згорання в циліндрі дійсно не відбувся.

Тому максимальні значення тиску  $p_{max} = 1,866$  МПа (при  $\varphi = 354^\circ$  ПКВ) та температури  $T_{max} = 869,1$  К (при  $\varphi = 349^\circ$  ПКВ) у несправного двигуна досягаються наприкінці стиснення – значно раніше, ніж у двигуна з нормальним згоранням.



**Рисунок 4.** Розгорнута індикаторна діаграма тиску:  
 а – справний двигун; б – згорання немає



**Рисунок 5.** Розгорнута індикаторна діаграма температури:  
 а – справний двигун; б – згорання немає

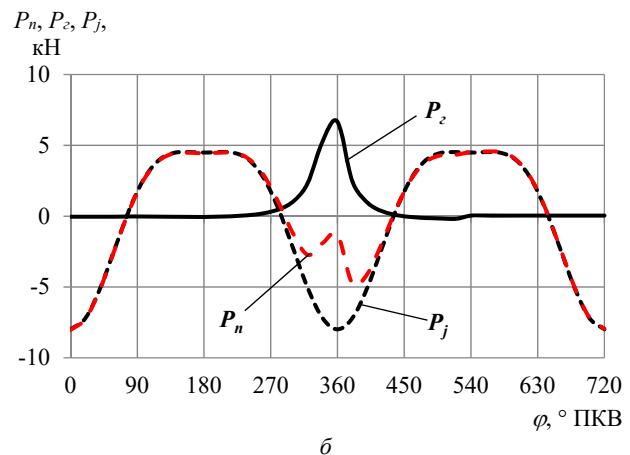
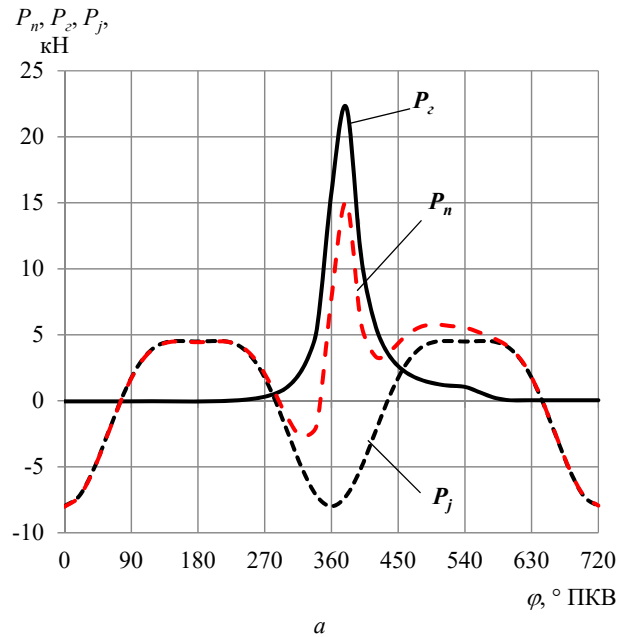
Розраховано сили, що діють на поршень двигуна MeM3-245 при його нормальній роботі (рис. 6):

- сила тиску газів  $P_z$ , діюча на поршень;
- сила інерції зворотно-поступально рухомих мас  $P_j$ ;

- результуюча сила  $P_n$ , що діє на поршень вздовж осі циліндра, розраховується за формулою:

$$P_n = P_z + P_j, \quad (2)$$

За відсутності згорання в циліндрі, сила тиску газів  $P_z$  зменшується. Сила інерції зворотно-поступально рухомих мас  $P_j$  залишається незмінною, отже, результуюча сила  $P_n$ , що діє на поршень вздовж осі циліндра, відповідно до формули (1), зменшується.



**Рисунок 6.** Графіки сил  $P_n, P_z, P_j$  від кута повороту колінчастого валу двигуна MeM3-245:

а – справний двигун; б – несправний двигун

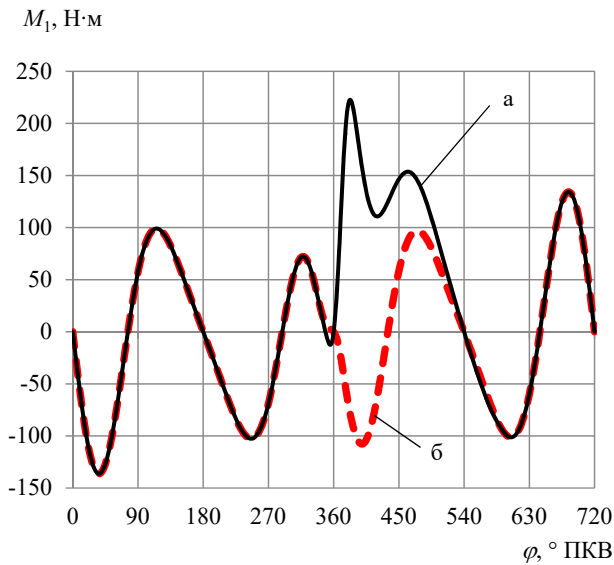
З рисунка 6, б видно, що у несправного двигуна максимальне значення сили  $P_n = 4,57$  кН (практично співпадає з силою інерції), в той час як у справного двигуна  $P_n = 15,05$  кН (рис. 6а).

Після визначення сил, діючих на шатун та кривошип, розраховано індикаторний обертальний момент на кривошипі для одного циліндра (рис. 7). За відсутності згорання в циліндрі середній обертальний момент  $M_1 < 0$ . Це підтверджує той факт, що в циліндрі робота не створюється, а лише витрачається.

Далі знаходимо сумарні індикаторні обертальні моменти справного двигуна

$$M_{\text{сум}i} = M_1 + M_2 + M_3 + M_4. \quad (3)$$

та будуємо діаграму (рис. 8а).



**Рисунок 7.** Обертальний індикаторний момент від одного циліндра:

а – справний двигун; б – несправний двигун

З діаграми сумарного індикаторного обертального моменту двигуна MeM3-245 (рис. 8а) визначаємо:

- максимальний момент  $M_{\text{крmax}} = 388,66$  Н·м;
- мінімальний момент  $M_{\text{крmin}} = -177,71$  Н·м;
- середній момент  $M_{\text{крср}} = 91,88$  Н·м.

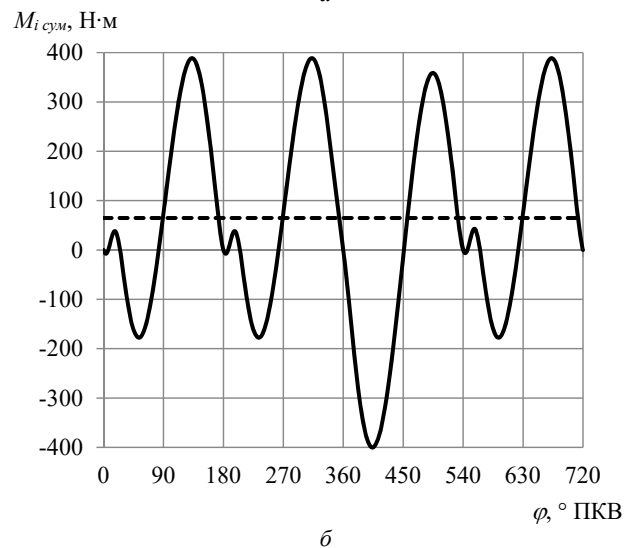
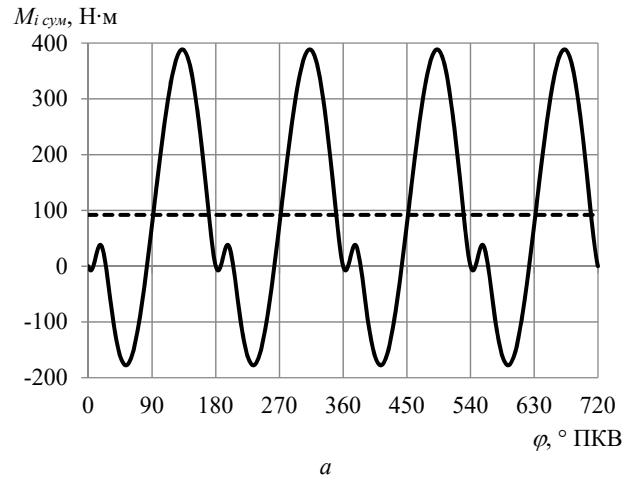
Далі за формулою (1) розраховуємо коефіцієнт нерівномірності обертального моменту справного двигуна MeM3-245  $\mu = 6,164$ . Отриманий результат близький до середнього значення  $\mu$  згідно до літературних даних (рис. 1).

Далі визначаємо індикаторні обертальні моменти двигуна, приймаючи несправним перший циліндр (рис. 8б):

- максимальний момент  $M_{\text{крmax}} = 388,66$  Н·м;
- мінімальний момент  $M_{\text{крmin}} = -400,22$  Н·м;
- середній момент  $M_{\text{крср}} = 64,85$  Н·м.

Очікувано, середній індикаторний момент двигуна зменшився на 29,4 %.

Для оцінки ступеня нерівномірності індикаторного обертального моменту ДВЗ за формулою (1) розраховуємо коефіцієнт нерівномірності обертального моменту несправного двигуна MeM3-245, з пропусками запалювання в 1-му циліндрі  $\mu = 12,165$ .



**Рисунок 8.** Сумарний індикаторний обертальний момент двигуна MeM3-245:

а – справний двигун; б – з пропуском запалювання в першому циліндрі

### Висновки

В роботі вирішено актуальне питання дослідження впливу пропусків запалювання на показники нерівномірності обертання колінчастого валу ДВЗ з іскровим запалюванням. Розраховано коефіцієнт нерівномірності обертального моменту ДВЗ для 4-тактного 4-циліндрового двигуна MeM3-245 при роботі на номінальному режимі  $\mu = 6,164$ .

Внаслідок несправності (при роботі двигуна на 3-х циліндрах) середній ефективний момент двигуна зменшився на 29,4 %.

Розраховано значення коефіцієнта нерівномірності обертального моменту несправного двигуна  $\mu = 12,165$ , що вдвічі перевищує значення для справного двигуна. За рівнем нерівномірності обертального моменту, 4-циліндровий рядний двигун MeM3-245 з пропусками запалювання одного циліндра наближається до одноциліндрових двигунів (рис. 1).

Найкращим способом для усунення нерівномірності обертального моменту і нерівномірності обертання колінчастого валу ДВЗ є використання спеці-

альних демпферів: двомасового маховика та двомасового шків приводу допоміжних агрегатів. У першого ведучий та ведений елементи поєднуються пружинно-демпферним механізмом, у другого – пружним гумовим наповнювачем.

#### Список літератури

1. Дмитриев, А. Как понять что двигатель троит? / А. Дмитриев. – Сайт «<https://japan-cars.com.ua>». – Режим доступу: <https://japan-cars.com.ua/stati/kak-ponjat-chto-dvigatel-troit/>
2. Ревин А. Почему двигатель «троит» и что с этим делать? / А. Ревин, М. Колодочкин. – Сайт «Зарулем». – Режим доступу: <https://www.zr.ru/content/articles/910108-chto-delat-esli-dvigatel-vdr/>
3. Колчин А. И. Расчет автомобильных и тракторных двигателей: Учеб. пособие для вузов / А. И. Колчин, В. П. Демидов. – 4-е изд., стер. – М.: Высш. шк., 2008. – 496 с.
4. Автомобільні двигуни : Підручник / Ф. І. Абрамчук, Ю. Ф. Гутаревич, К. Є. Долганов, І. І. Тимченко. – 3-тє видання. – К. : Арістей, 2006. – 476 с.
5. Гергенов С. М. Проверочный расчет поршневого двигателя внутреннего сгорания : Учебное пособие / С. М. Гергенов // Улан-Удэ : Изд-во ВСГТУ, 2009. – 90 с.
6. Колесникова Т. Н. Определение составляющих неравномерности суммарного крутящего момента при отключении цилиндров / Т. Н. Колесникова, В. Г. Заренбин, О. П. Сакно // Двигуни внутрішнього згорання. – 2021. – № 2. – С. 38–42. DOI: 10.20998/0419-8719.2021.2.05
7. Корнеев А. Е. Устройство для исследования неравномерности вращения коленчатого вала / А. Е. Корнеев // Омский научный вестник. – 2010. – № 5 (173). – С. 40–43.
8. Моделивання нерівномірності обертання колінчатого валу дизеля / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов,

Д. В. Черняев, О. Я. Децюра // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2010. – Вип. 31. – С. 18–25.

9. Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft / M. Desbazeille, R. B. Randall, F. Guillet et al. // Mechanical Systems and Signal Processing. – 2010. – Vol. 24. – P. 1529–1541. DOI:10.1016/j.ymssp.2009.12.004

10. Борщенко, Я. А. Разработка метода диагностирования автомобильных дизелей по неравномерности вращения коленчатого вала : дис. ... канд. техн. наук : 05.22.10 / Борщенко Ярослав Анатольевич. – Тюмень, 2003. – 175 с.

11. Методи нерозбірного діагностування дизелів при експлуатації рухомого складу / Б. Є. Боднар, О. Б. Очкасов, О. Я. Децюра, Д. В. Черняев // Вісник Дніпропетр. нац. ун-ту заліз. трансп. ім. акад. В. Лазаряна. – 2012. – Вип. 2 (41). – С. 56–60.

12. Савастенко Э. А. Снижение степени неравномерности крутящего момента в ДВС // Э. А. Савастенко, И. А. Никишин, С. Н. Девянин // Вестник РУДН. Серия : Инженерные исследования. – 2010. – № 3. – С. 99–106.

13. Руководство по техническому обслуживанию и ремонту автомобилей ЗАЗ-110206/1103/1105 и их модификаций (1102-3902002). / Г. В. Чуйко, Н. В. Колтакова, В. М. Донец, О. В. Пилюпец. – Отв. ред. С. В. Филипенко. – 2-е изд. – Запорожье : ЗАО «ЗАЗ», 2003. – 464 с.

14. Силовой агрегат МЕМЗ-245. – Сайт «ХРП «АвтоЗАЗ-Мотор»». – Режим доступу: <http://tavria-auto.narod.ru/memz245.htm>

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.

Одержано 26.02.2024

## STUDY OF THE INFLUENCE OF MISFIRES ON THE UNEVEN ROTATION OF THE CRANKSHAFT OF A GASOLINE ENGINE

- Slynko G. Dr. Sc., Professor, Head of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [gslynko@zp.edu.ua](mailto:gslynko@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0002-1954-8530
- Ryaboshapka N. Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [ryaboshapka.ne@gmail.com](mailto:ryaboshapka.ne@gmail.com), ORCID: 0000-0003-0334-8363
- Sukhonos R. M. Sc., Senior lecturer of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [romevs@zp.edu.ua](mailto:romevs@zp.edu.ua), ORCID: 0000-0001-9683-3389
- Yevsyeyeva N. Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Internal Combustion Engines, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, e-mail: [korskovanat@ukr.net](mailto:korskovanat@ukr.net), ORCID: 0000-0002-3398-6537
- Soldatchenkov O. Student, National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine

**Purpose.** Investigate the effect of misfires on the unevenness of the torque on the crankshaft of gasoline internal combustion engine with spark ignition.

**Research methods.** The results of the thermodynamic calculation of the operating cycle, the dynamic calculation of the engine parameters at the nominal operating mode of an well engine and an engine with misfiring in one cylinder are presented. The computer program Engine Calculation and Microsoft Office program package were used to perform the research. The object of the study is the MeMZ-245 four-stroke, four-cylinder gasoline engine. The subject of the study is the torque unevenness coefficient of the internal combustion engine  $\mu$ .

**Results.** The topical issue of investigating the impact of misfires on the indicators of unevenness of rotation of the crankshaft of a spark-ignition internal combustion engine has been solved. The torque unevenness coefficient  $\mu = 6.164$  for the MeMZ-245 4-stroke 4-cylinder engine when operating at the nominal mode was calculated. It was established that as a result of a malfunction (disabling one cylinder), the average effective torque of the engine decreases by 29.4%. The value of the torque unevenness coefficient of the faulty engine was calculated as  $\mu = 12.165$ , which is twice the value for the well-worked engine. It was established that level of torque unevenness of MeMZ-245 4-cylinder in-line engine with misfiring approaches to single-cylinder engines.

**Scientific novelty.** For the first time, it was theoretically proven that due to the lack of ignition in one of the cylinders of a 4-stroke 4-cylinder engine, the average effective torque of the engine decreases by 29.4% when operating at the nominal mode. The value of the torque unevenness coefficient  $\mu$  of an engine with misfiring is twice the value for a well-worked engine, which is close to similar values of single-cylinder engines.

**Practical value.** The method of calculating the torque unevenness coefficient of an internal combustion engine can be used in the design of new and modernization of existing internal combustion engines.

**Key words:** 4-stroke internal combustion engine, dynamic calculation, indicator diagram, misfires, torque unevenness coefficient, torque.

## References

1. Dmitriev, A. Kak ponyat chto dvigatel troit [How to understand that the engine is misfiring]. Available at: <https://japan-cars.com.ua/stati/kak-ponjat-chto-dvigatel-troit/>
2. Revin, A., Kolodochkin, M. Pochemu dvigatel «troit» i chto s etim delat? [Why does the engine misfiring and what to do with it?] – Available at: <https://www.zr.ru/content/articles/910108-chto-delat-esli-dvigatel-vdr/>
3. Kolchin, A. I., Demidov V. P. (2008). Raschet avtomobilnyh i traktornyh dvigatelej: Uchebnoe posobie dlya vuzov [Calculation of automobile and tractor engines: Textbook for universities]. – 4th Edition. – Moscow (Russia), 496.
4. Abramchuk, F. I., Gutarevich Ju. F., Dolganov, K. E. (2006). Avtomobil'ni dviguni [Automobile engines]. – Kyiv (Ukraine): Aristej, 476.
5. Gergenov, S. M. (2009). Proverochnyj raschet porshnevoego dvigatelya vnutrennego sgoraniya : Uchebnoe posobie [Test calculation of a piston internal combustion engine: Textbook]. – Ulan-Ude (Russia) : VSGTU Publishing, 90.
6. T. N. Kolesnikova, V. G. Zarenbin, O. P. Sakno (2021). Opredelenie sostavlyayushih neravnomernosti summarnogo krutyashego momenta pri otklyuchenii cilindrov [Determination of the components of unevenness of the total torque when the cylinders are turned off] // Dviguni vnutrishnego zgorannya, 2, 38–42. DOI: 10.20998/0419-8719.2021.2.05
7. Korneev, A. E. (2010). Ustrojstvo dlya issledovaniya neravnomernosti vrasheniya kolenchatogo vala [Device for studying the uneven rotation of the crankshaft]. Omskij nauchnyj vestnik, 5 (173), 40–43.
8. B. Ye. Bodnar, O. B. Ochkasov, D. V. Chernyayev, O. Ya. Decyura (2010). Modelyuvannya nerivnomirnosti obertannya kolinchatogo valu dizelya [Modeling of uneven rotation of the crankshaft of a diesel engine. Visnik Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 31, 18–25.
9. M. Desbazeille, R.B. Randall, F. Guillet, M. El Badaoui, C. Hoisnard. (2010). Model-based diagnosis of large diesel engines based on angular speed variations of the crankshaft. Mechanical Systems and Signal Processing, 24, 1529–1541. DOI:10.1016/j.ymsp.2009.12.004
10. Borshenko, Ya. A. (2003). Razrabotka metoda diagnostirovaniya avtomobilnyh dizelej po neravnomernosti vrasheniya kolenchatogo vala [Development of a method of diagnosing automobile diesel engines for irregular crankshaft rotation] : PhD dissertation. – Tyumen (Russia), 175.
11. B. Ye. Bodnar, O. B. Ochkasov, O. Ya. Decyura, D. V. Chernyayev (2012). Metodi nerozbiernogo diagnostuvannya dizeliv pri ekspluatatsiyi ruhomogo skladu [Methods of non-disassemble diagnostics of diesel engines during operation of rolling stock]. Visnik Dnipropetr. nac. un-tu zalizn. transp. im. akad. V. Lazaryana, 2 (41), 56–60.
12. E. A. Savastenko, I. A. Nikishin, S. N. Devyanin (2010). Snizhenie stepeni neravnomenosti krutyashego momenta v DVS [Reducing the degree of torque unevenness in internal combustion engines]. Vestnik RUDN. Seriya: Inzhenernye issledovaniya, 3, 99–106.
13. G. V. Chujko, N. V. Koltakova, V. M. Donec, O. V. Pilipec (2003). Rukovodstvo po tehničeskomu obsluzhivaniyu i remontu avtomobilej ZAZ-110206/1103/1105 i ih modifikacij (1102-3902002) [Manual for maintenance and repair of ZAZ-110206/1103/1105 vehicles and their modifications (1102-3902002)]. Zaporozhe (Ukraine): ZAO “ZAZ”, 464.
14. Silovoj agregat MEMZ-245 [MEMZ-245 power unit]. – Available at: <http://tavria-auto.narod.ru/memz245.htm>
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 (Ukraine): National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, 130.



## НАУКОВО-ТЕХНІЧНА ІНФОРМАЦІЯ

### SCIENTIFIC AND TECHNICAL INFORMATION

УДК 669.546.3

- Ольшанецький В. Ю. д-р техн. наук, професор, зав. кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: olshanolshan@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Кононенко Ю. І. старший викладач кафедри фізичного матеріалознавства Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: juliakon7335@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-0676-4015
- Кононенко А. В. аспірант кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: andrju3952@gmail.com*
- Скребцов А. А. канд. техн. наук, доцент кафедри механіки Національного університету «Запорізька політехніка», м. Запоріжжя, Україна, *e-mail: nic\_tz@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-4669-9625

### ПРО ВЗАЄМОДІЮ ЧАСТИНОК ДОВІЛЬНОЇ ФОРМИ МІЖ СОБОЮ ТА З РОБОЧОЮ ПОВЕРХНЕЮ

**Ключові слова:** активована поверхня, частинки порошку, спечення, питома поверхнева енергія, адгезія.

Розглянемо деякі питання щодо стану активованої поверхні у вигляді пластини при формуванні на ній послідовних шарів відповідної речовини, що складаються з частинок довільної форми, які торкаються не тільки поверхні пластини, але й контактують між собою.

При нагріві завдяки ефекту сублимації відбувається адгезія окремих наноплощин частинок з поверхнею (в залежності від того, якою площиною торкається частинка цієї поверхні) та їх взаємодія між собою. При цьому величина адгезії буде різною в залежності від того, саме якою площиною активованої поверхні торкається частинка.

Якщо знехтувати тим матеріалом, який переходить від частинки до частинки завдяки ефекту сублимації, то в такому спрощеному варіанті можна розглядати взаємодію окремих частинок без обміну матеріалом між собою.

Зазначимо, що виходячи з тенденцій зміни поверхні кожної частинки, відбувається ефект зростання поверхні контакту при незначному збільшенні об'єму частинки. При цьому в такий процес активно втручається надлишкова частина об'єму, що значно збільшує поверхню контакту. В результаті отримується «хвилястий» шар речовини частинок, який по мірі збільшення часу спечення поступово зменшує таку «хвилястість», тобто локальну різницю по висоті.

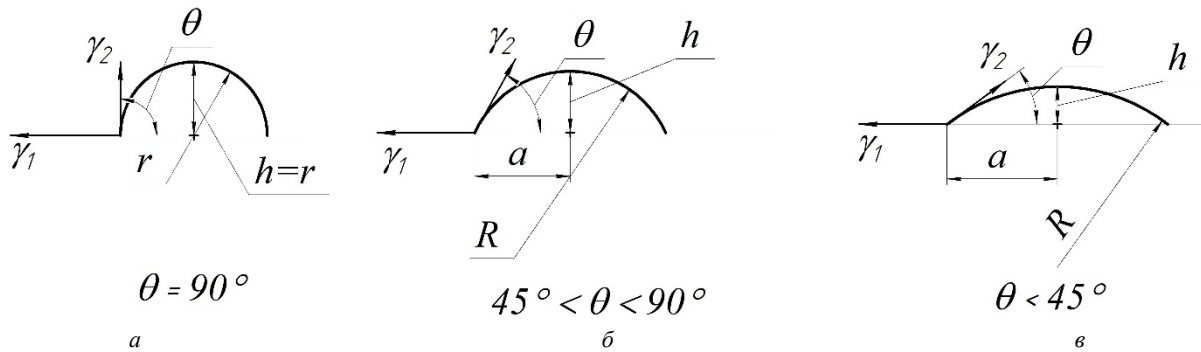
При цьому збільшення поверхні контакту частинок відбувається передусім у тих з них, які мають кращу адгезію з поверхнею («фактор адгезії»). Якщо після певного за часом спечення залишаються якісь внутрішні пори, то в залежності від їх розміру вони перетворюються або на малорухомі (напівсидячі) дислокації, або буде відбуватися процес їх виклинювання.

Як вже зазначено, взаємодія частинок неправильної форми однієї фракції між собою та поверхнею розташування є дуже складним явищем, оскільки вони мають грані наноконтакту різної кристалографії. Будемо вважати, що система, яка розглядається, дещо впорядкована, що суттєво спрощує ситуацію та полегшує розуміння подій, які в ній відбуваються. Для того, щоб з'ясувати поверхневий рух такого роду частинок, необхідно враховувати не тільки грані контакту, але і інші грані, які мають просторовий дотик, що також може впливати певним чином на кінцевий стан контакту з робочою поверхнею.

В решті решт прийдеться обійтися дуже спрощеною картиною, аби якось врахувати зовнішній вплив (який не пов'язаний з контактною поверхнею), прийнявши, що всі частинки належать одній фракції, тобто вони майже однакові за формою, яка наближена до половинки сфери, та мають усереднену поверхневу енергію. При цьому кожна частинка торкається пластини своєю плоскою частиною поверхні та при її «розповзанні» площа кожного контакту постійно залишається майже круглою; цей круг лише збільшує свій радіус. Тоді середній зсув кожної частинки буде відбуватися до появи контакту на робочій поверхні з іншими частинками, які теж прагнуть набути іншого розміру в зонах адгезійного зв'язку з робочою контактною поверхнею.

На рис. 1а схематично зображена частинка у вигляді половинки сфери, яка розташована на плоскій робочій поверхні. Тут  $\gamma_1$  – питома поверхнева енергія на межі поділу поверхня/пора;  $\gamma_2$  – питома поверхнева енергія на

межі поділу частинка/пора;  $\theta$  – кут контакту частинки з робочою поверхнею;  $r$  – початковий радіус напівсферичної частинки,  $R$  – радіус напівсферичної частинки після розповзання. На рис. 1б, в показано частинку, яка через деякий час змінила свою форму шляхом «розповзання» (її об’єм при цьому не змінюється).



**Рисунок 1.** Розташування частинки у вигляді напівсфери на робочій поверхні: в початковий момент часу (а) та після «розповзання» (б) та (в)

Зі схем, наведених на рис. 1б, в можна побачити, що «розповзання» частинки, що супроводжується збільшенням її радіуса кривини  $R$  та радіуса поверхні контакту  $r$ , буде відбуватися при виконанні такої умови:

$$\gamma_1 - \gamma_2 \cos \theta > 0. \quad (1)$$

Раніше нами в роботі [1] було розглянуто модель поведінки сферичної частинки, яка при потраплянні на межу поділу «розповзалася», перетворюючись на два сферичні сегменти і не змінювала при цьому свого об’єму. З урахуванням виразів, наведених в роботі [1], можна знайти термодинамічний вигравш завдяки зменшенню вільної поверхневої енергії. Він буде дорівнювати різниці поверхневої енергії сфероїдальної поверхні частинки  $F_{кін.сф.}$  та її круглої поверхні  $F_{кр.}$  після «розповзання» і вільної енергії сферичної поверхні початкової частинки  $F_{поч.сф.}$ :

$$\Delta F = (F_{кін.сф.} - F_{кр.}) - F_{поч.сф.} = (2\pi R h \gamma_2 - \pi a^2 \gamma_1) - 2\pi r^2 \gamma_2, \quad (2)$$

де  $a$  – радіус плоскої поверхні частинки, який дорівнює  $a = R \sin \theta$ ;  
 $h$  – висота сфероїдального сегмента,  $h = R(1 - \cos \theta)$ .

Співвідношення між радіусами вихідної напівсферичної частинки  $r$  та частинки після «розповзання»  $R$  (згідно рис. 1 та [1]):

$$r = R \sqrt{\frac{1}{2}(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta)}. \quad (3)$$

Тоді термодинамічний вигравш (або результуюче зменшення вільної поверхневої енергії), який при цьому отримується, при певних крайових кутах контакту може бути оцінений за допомогою залежності виду

$$\frac{\Delta F}{F_{сф.}} = \frac{(2\pi R_{сф.} h \gamma_1 - \pi a^2 \gamma_1) - 2\pi r^2 \gamma_2}{2\pi r^2 \gamma_2} = \frac{1 - \cos \theta - \frac{1}{2} \cdot \frac{\gamma_1 \sin^2 \theta}{\gamma_2}}{\left[ \frac{1}{2}(1 - \cos \theta)^2 (2 + \cos \theta) \right]^{\frac{2}{3}}} - 1. \quad (4)$$

З урахуванням отриманого рівняння були проведені відповідні розрахунки щодо відносної зміни вільної поверхневої енергії, які зведені в таблицю 1.

Такі зміни вільної поверхневої енергії показують, що спрощена процедура, яка враховує рівність круглих зон адгезійного контакту (відстань між центрами обох контактуючих зон дорівнює їхнім двом радіусам) дає можливість оцінити енергетичний вигравш, який залежить від цієї відстані і певним чином пов’язаний величиною адгезійного фактора на активованій в той чи інший спосіб поверхні контакту між напівсферичними частинками порошкової фракції.

**Таблиця 1** – Розрахункові значення результуючої зміни поверхневої вільної енергії

№	$\theta$	$\gamma_1/\gamma_2$	$\Delta F/F_{\text{напієсф}}$
1	90°	0	0
2	60°	0,5	-0,321
3	45°	0,787	-0,512
4	30°	0,867	-0,705
5	20°	0,940	-0,975

### Висновки

Отже, незважаючи на спрощений підхід до вирішення проблеми, в роботі доведена можливість обговорювати питання контакту між порошинками однієї фракції та активованою поверхнею з позиції зміни фактора адгезії.

### Список літератури

1. Ольшанецкий В. Е. О термодинамике взаимодействия сферических включений с движущимися границами зерен / Ольшанецкий В. Е., Кононенко Ю. И. // Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні. – 2016. – № 2. – С. 128–130.

Одержано 12.02.2024

## ABOUT PARTICLE INTERACTION OF ARBITRARY FORM BETWEEN THEMSELVES AND THE WORKING SURFACE

- Ol'shanetskii V. Dr. Tech. of Sciences, Professor, Head of the Department of Physical Materials Science, National University "Zaporizhzhia Polytechnic", Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: olshan@zpu.edu.ua*, ORCID: 0000-0002-9485-4896
- Kononenko J. Senior Lecturer of the Department of Physical Materials Science of National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: juliakon7335@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-0676-4015
- Kononenko A. A Postgraduate Student of the Department of Mechanics of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: andrju3952@gmail.com*
- Skrebtsov A. Candidate of technical Sciences, Associate Professor of the Department of Mechanics of the National University Zaporizhzhia Polytechnic, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail: nic\_tz@ukr.net*, ORCID: 0000-0002-4669-9625

**Key words:** *activated surface, powder particles, sintering, specific surface energy, adhesion.*

### References

1. Ol'shanetskii V. E., Kononenko Yu. I. (2016). O termodynamike vzaymodeistviya sferycheskykh vkluchenyi s dvyzhushchymysia hranytsamyi zeren [On the thermodynamics of the interaction of spherical inclusions with moving grain boundaries]. *New materials and technologies in metallurgy and mechanical engineering*, 2, 128–130.

УДК 669.14.018.252.3

- Нестеров О. В. канд. техн. наук, доцент, доцент кафедри охорони праці і навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, *e-mail: voretzen1206@gmail.com*, ORCID: 0000-0002-7637-7707
- Рубан В. Т. асистент кафедри охорони праці і навколишнього середовища Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, *e-mail: rubanopns@gmail.com*, ORCID: 0000-0003-2339-1035
- Повзло В. М. старший викладач кафедри композиційних матеріалів, хімії та технологій Національного університету «Запорізька політехніка», Запоріжжя, *e-mail: pan431@ukr.net*, ORCID: 0000-0003-3458-9821

## ДОСЛІДЖЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ВИБУХОПОЖЕЖОБЕЗПЕЧНОЇ ЗАХИСНОЇ АТМОСФЕРИ ПРИ ВИКОНАННІ ОПЕРАЦІЙ ЦЕМЕНТАЦІЇ

*Ключові слова:* вибух, пожежа, цементация, вибухопожежонебезпечні складові атмосфери.

### Вступ

Умови експлуатації деталей більшості виробів сучасного машинобудування потребують проведення низки спеціальних технологічних процесів, метою яких є підвищення рівня механічних та експлуатаційних властивостей. Зокрема, деталі механізмів, які зазнають значні контактні навантаження, потребують збільшення твердості поверхні для забезпечення достатньої зносостійкості. Зазвичай використовують азотування або цементацию.

Цементация – один з видів хіміко-термічної обробки, сутність якої полягає в отриманні поверхневих шарів з підвищеним вмістом вуглецю, що при подальшій термічній обробці дає змогу змінити структуру металу, суттєво підвищити твердість та зносостійкість поверхні.

Цементация піддають низьковуглецеві сталі, у складі яких міститься не більше 0,2 % вуглецю, наприклад, сталі 20X, 20X2H4A, 12XH3A.

Класична схема цементация передбачає підготовку поверхні деталей, створення насичувального середовища в залежності від обраного виду цементация, нагрів деталей до температур 920–960 °С, витримка деталей в атмосфері насичувального середовища при цій температурі впродовж часу, необхідного для проходження процесу дифузії атомів вуглецю в поверхневий шар металу на визначену глибину з подальшим виконанням операцій гартування та відпускання.

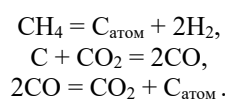
Вид цементация обирається в залежності від технологічних спроможностей підприємства та об'єму виробництва. Найбільш розповсюдженими є цементация в твердому карбюризаторі, газове та вакуумне цементування. Аналіз досліджень та публікацій.

У разі використання газової цементация постає необхідність обов'язкового виконання усього комплексу противибухових та протипожежних заходів, що пов'язано з використанням вибухопожежонебезпечних складових насичувального середовища.

В роботі запропоновано технічне рішення щодо зниження ризику вибухів та пожеж при газовій цементация зі збереженням насичувальної спроможності пічної атмосфери завдяки зниженню концентрації вибухопожежонебезпечних складових на початкових та прикінцевих операціях.

### Результати досліджень

Максимальна ефективність процесу газової цементация може бути досягнута шляхом застосування ендотермічної атмосфери, яку, в класичному уявленні, отримують в ендогенераторах на нікелевому каталізаторі при конверсії природного газу та повітря у співвідношенні 1 : 3 при температурі 950–1000 °С. При такій температурі за хімізмом процесу складові газової суміші дисоціюють з виділенням атомарного вуглецю. До складу газової суміші входять: оксид вуглецю (CO), азот (N<sub>2</sub>), водень (H<sub>2</sub>), кисень O<sub>2</sub> і водяна пара (H<sub>2</sub>O). Атомарний вуглець утворюється за реакціями:



Газова фаза в результаті цих реакцій збагачується активними відновниками CO і H<sub>2</sub>.

Кількісний склад ендотермічної атмосфери, отриманої на основі метану або пропану є таким: 36,5–44 %

$H_2$ ; 1,5–4,0 %  $CO_2$ ; 17,5–25 %  $CO$ ; 1,0–2,0 %  $CH_4$ ; ост.  $N_2$ . Використання суто ендотермічної атмосфери, в якості насичувальної, може забезпечити значення вуглецевого потенціалу, тобто рівноважної концентрації вуглецю на границі розділу середовищ газ–метал, не більше 0,6 % по вуглецю. В той час як найбільш прийнятними умовами для проведення цементації є значення вуглецевого потенціалу 1 – 1,4 % по вуглецю. У разі необхідності отримання глибини цементованого шару більш як 0,25 мм або для збільшення концентрації вуглецю в цементованому шарі використовують контрольовану ендотермічну атмосферу завдяки додаванню природного газу, об'ємна доля якого визначається експериментально.

Основні переваги ендотермічних атмосфер полягають у можливості автоматизації управління обладнанням, стабільності складу ендотермічної атмосфери на протязі довгого періоду, універсальності в отриманні атмосфер різного складу для термічної або хіміко-термічної обробки деталей з різних марок сталей.

Однак головним недоліком ендотермічних атмосфер є їх вибухопожежонебезпечність, що обумовлює застосування підвищених заходів безпеки.

Апробація результатів дослідження проводилась в реальних умовах термічного цеху АТ «Мотор Січ». Роботи проводились на печі для хіміко-термічної обробки фірми «УНИТЕРМ». Конструкція печі передбачає проведення безпосередньо цементації в робочій камері, а завантаження та видача садки відбувається через форкамеру. Як насичувальне середовище використовувалась ендотермічна атмосфера з додаванням природного газу для підвищення вуглецевого потенціалу від 0,6 % до 1,2 % по вуглецю, що задовольняє отриманню глибини цементованого шару до 1 мм, а його насиченість забезпечить після подальшої термічної обробки деталей твердість поверхні HRC 59–61 од. Значення вуглецевого потенціалу визначали по газоаналізатору TG5420S фірми «Dewkler», Германія [1].

В реальних умовах цементації повна дисоціація метану в робочій камері не відбувається, тому в складі насичувальної атмосфери завжди є його залишки. За хімічним аналізом, застосовуючи фотокolorиметричний оптичний метод, попередньо проводили кольорову реакцію контрольованих компонентів відповідним реагентом в газовій фазі, а саме вибухопожежонебезпечних  $H_2$ ,  $CO$ ,  $CH_4$ . При цьому вміст залишкового метану склав 5,0 %. Відомо, що вибухонебезпечна концентрація метану в газових сумішах складає від 4,4 до 17 %, а найбільш вибухонебезпечна концентрація 9,5 % [2].

По закінченню стадії дифузійного насичення садка переміщується з робочої камери у форкамеру. Основною небезпекою при цьому є виток залишків насичувального середовища у форкамеру, де присутні не тільки залишки метану, а і водень та оксид вуглецю, що за умови потрапляння до цієї камери зовнішнього повітря може призвести до вибуху. Для попередження цієї небезпеки на зовнішньому отворі печі влаштована система вогневої зависи, функцією якої є допалювання небезпечних складових. Однак такий спосіб попередження вибуху не є надійним у зв'язку з можливістю неспрацювання автоматичної системи допалу. Наприклад, не спрацювання вогневої зависи на зовнішньому отворі печі «УНИТЕРМ» може відбутися внаслідок програмної помилки або механічного забруднення форсунок.

В якості додаткового заходу попередження вибуху запропоновано продувку форкамери мережевим азотом. Об'єм азоту на продувку залежить від прохідного перерізу вхідного патрубку та часу продувки. Планом експерименту було передбачено продувку на протязі 20, 40 та 60 хвилин. По закінченню кожного з періодів відбиралася проба та проводився хімічний аналіз на вміст складових газового середовища. Результати хімічного аналізу представлені на рис. 1.

Отримані результати аналізу складу газового середовища у форкамері свідчать, що концентрація вибухонебезпечних складових значно зменшується. Порівнюючи з тим, що залишковий вміст метану в насичувальному середовищі дорівнював 5 %, то після продувки азотом через 20 хвилин він зменшився до 0,065 %, через 40 хвилин були виявлені лише незначні залишки метану, кількість якого аналізом не визначалась, а при продувці протягом 60 хвилин залишки метану відсутні. Вміст оксиду вуглецю складав 2,0%, решта складових це безпечні азот, оксиди азоту і двоокис вуглецю [3].

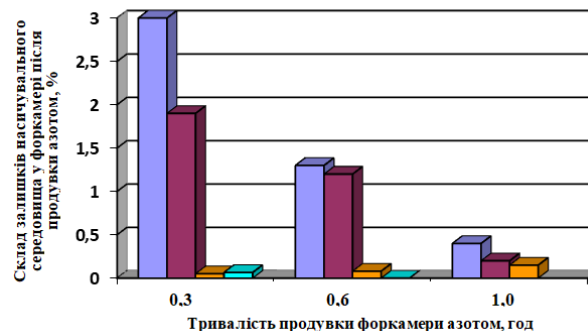


Рисунок 1. Залежність вмісту вибухонебезпечних складових газового середовища у форкамері від тривалості продувки азотом

Таким чином, гарантування безпеки може бути здійснено тільки через обов'язковим є виконання усіх нормативних вимог до виробничих дільниць, де відбуваються процеси хіміко-термічної обробки та впровадження додаткових технічних заходів.

Основним нормативно-правовим актом, який визначає планування та втілення організаційних заходів з вибухопожежної безпеки є НАПБ А. 01.001-2014 Правила пожежної безпеки України [4].

У відповідності до ДСТУ-Б-В.1.1-36-2016 «Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою» виробничим приміщенням, де використовуються або приготавливаються газоповітряні суміші, в складі яких присутній метан, інші горючі гази, легкозаймисті, горючі і/або важко горючі рідини, а також речовини і/або матеріали, які здатні вибухати і горіти або тільки горіти під час взаємодії з водою, киснем повітря і/або один з одним, за умови, що приміщення, в яких вони знаходяться (зберігаються, переробляються, транспортуються), та не відносяться до категорій А або Б, присвоюється категорія В [5].

За вимогами до приміщень категорії В та класу вибухонебезпечної зони – простору, в якому є або можуть з'явитися вибухонебезпечні суміші – за НПА ОП 40.1-1.21-98 клас зони визначається як В-1а, в котрих вибухонебезпечна концентрація газу і пари можлива лише в наслідок аварії або несправності, або класу В-1б зонам приміщень, де при аваріях можливе утворення лише місцевої вибухонебезпечної концентрації, яка поширюється на об'єм, не більший 5 % загального об'єму приміщення [6].

Вимоги цих правових актів передбачають такі основні організаційні та технічні заходи. До організаційних заходів відносяться:

- в конструкції печей для цементації обов'язково передбачають випускні клапани для скидання надлишкового тиску робочої атмосфери з можливістю допалу. Технологічні отвори печей повинні бути облаштовані пристроями для створення вогневої завіси для попередження потрапляння повітря в робочий простір печі;

- робочий простір печі має бути герметичним, що виключає ежескційний тиск. Контроль параметрів як ендогенераторів, так і печей повинен відбуватися автоматизованими системами з функціями сигналізації та блокування. В аварійних ситуаціях має бути передбачена можливість подачі в робочий простір інертних газів;

- улаштування систем вентиляції з установкою декількох вентиляційних агрегатів з забезпеченням достатньої продуктивності та рівномірності в усьому об'ємі приміщення;

- улаштування автоматичної сигналізації, що діє на відключення електроживлення обладнання в разі виникнення концентрації горючих газів, яка перевищує гранично допустимі значення. Кількість сигнальних приладів та їх розташування повинно забезпечувати безвідмовну дію сигналізації;

- електрообладнання має бути вибухозахищеним, а ступень захисту ізолюючих оболонок не нижче IP44 [7].

До додаткових технічних заходів запропоновано впровадження технічного рішення щодо можливості зниження концентрації вибухонебезпечних складових у залишках насичувального середовища до безпечних значень шляхом подачі у форкамеру печі азоту в необхідних об'ємах.

### Висновки

Проведені дослідження підтвердили можливість зниження концентрації вибухонебезпечних складових у залишках насичувального середовища до безпечних значень шляхом подачі у форкамеру печі азоту в необхідних об'ємах. Подача азоту у форкамеру печі для хіміко-термічної обробки фірми «УНИТЕРМ» не викликає будь-яких технічних складнощів, а, зважаючи на те, що азот є інертним газом додаткові вимоги безпеки не висувуються.

Таким чином, запропоновано технічне рішення щодо зниження ризику вибухів та пожеж при газовій цементації зі збереженням насичувальної спроможності пічної атмосфери завдяки зниженню концентрації вибухопожежонебезпечних складових на початкових та прикінцевих стадіях операції. Крім вирішення надважливого завдання щодо підвищення рівня вибухопожежної безпеки підтверджено позитивний вплив на екологічність процесу цементації.

### Список літератури

1. Зміна технологічного процесу термічної обробки ланок пиляльного ланцюга. Посвідчення на раціоналізаторську пропозицію № 040001 від 16 березня 2004 р. [Текст] / Нестеров О. В. – 2004.

2. Мельник О. В. Методи газового аналізу: особливості та перспективи [Електронний ресурс] / О. В. Мельник, М. М. Морозова// Тридцять друга всеукраїнська практично-пізнавальна інтернет-конференція. – Режим доступу : <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konferentsiji/63-tridtsyat-druga-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/800-metodi-gazovogo-analizu-osoblivosti-ta-perspektivi>

3. Нестеров А. В. Безопасная печная атмосфера для защиты от окисления при высокотемпературной термической обработке [Текст] : сб. науч. тр. Новые решения в современных технологиях / А. В. Нестеров. – Харьков : НТУ ХПИ, 2009. – № 16. – С. 18–20.

4. НАПБ А. 01.001-2014 Правила пожежної безпеки України [[Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541)
5. ДСТУ-Б-В.1.1-36-2016 Визначення категорій приміщень, будинків та зовнішніх установок за вибухопожежною та пожежною небезпекою [Електронний ресурс]. – Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=65419](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419)
6. НПАОП 40.1-1.21-98. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів (2029) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://dnaop.com/html/2029/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_40.1-1.21-98](https://dnaop.com/html/2029/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_40.1-1.21-98)
7. ПУЕ - 2017 Правила улаштування електроустановок [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=72758](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758)

Одержано 15.11.2023

## INVESTIGATION OF THE EFFECTIVENESS OF AN EXPLOSION AND FIRE-PROOF PROTECTIVE ATMOSPHERE DURING CEMENTING

- Nesterov O. Candidate of Technical Sciences, Associate professor, Associate professor of the Department of Occupational and Environmental Safety of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [voretzen1206@gmail.com](mailto:voretzen1206@gmail.com), ORCID: 0000-0002-7637-7707
- Ruban V. Assistant of the Department of Occupational and Environmental Safety of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [rubanopns@gmail.com](mailto:rubanopns@gmail.com), ORCID:0000-0003-2339-1035
- Povzlo V. Senior teacher of the Department Composite Materials, Chemistry and Technologies of the National University “Zaporizhzhia Polytechnic”, Zaporizhzhia, Ukraine, *e-mail*: [pan431@ukr.net](mailto:pan431@ukr.net), ORCID: 0000-0003-3458-9821

**Key words:** *explosion, fire, cementation, fire-hazardous components of atmospheres.*

### References

1. Nesterov O. V. Zmina tekhnologichnogo procesu termichnoyi obrobky lanok pylialnogo lanciuga. Posvidchenia na racionalizators'ku propozycyu, declared 16.03.2004 [Ukrainian].
2. Melnyk O. V. Morozova M. M. Metody gazovogo analizu: osoblyvosti ta perspektyvy. Available at : <https://naukam.triada.in.ua/index.php/konferentsiji/63-tridtsyat-druga-vseukrajinska-praktichno-piznavalna-internet-konferentsiya/800-metodi-gazovogo-analizu-osoblivosti-ta-perspektivi>.
3. Nesterov O. V. (2009). Bezopasnaya pechnaya atmocfera dlja zaschity ot okisleniya pri vysokotemperaturnoj termicheskoj obrabotke [Safe furnace atmosphere to protect against oxidation during high temperature heat treatment]. Har'kov, NTU HPI, 16, 18–20.
4. NAPB А. 01.001-2014. Pravyla pogzhezhnoyi bezpeky Ukrayiny [Fire safety rules of Ukraine]. Available at : [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=60541](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60541).
5. DSTU-Б-В.1.1-36-2016. Vyznachennja kategorij prymischen', budynkiv ta zovnishnikh ustanovok za vybuhopozhezhnoju ta pozhezhnoju nebezpekoyu [Designated categories of premises, buildings and external installations for vibration and fire hazards]. Available at : [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=65419](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=65419).
6. NPAOP 40.1-1.21-98. Pravyla bezpechnoji ekspluataciji elektroustanovok spozhyvachiv [Rules for the safe operation of consumer electrical installations]. Available at : [https://dnaop.com/html/2029/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F\\_40.1-1.21-98](https://dnaop.com/html/2029/doc-%D0%9D%D0%9F%D0%90%D0%9E%D0%9F_40.1-1.21-98).
7. PUE - 2017 Pravyla ulashtuvannja elektroustanovok [Rules for arranging electrical installations]. Available at : [https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id\\_doc=72758](https://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=72758).

*Наукове видання*

**Нові матеріали і технології  
в металургії та машинобудуванні № 1/2024**

Науковий журнал

Головний редактор:

д-р техн. наук, професор С. Б. Беліков

Заступники гол. редактора:

д-р техн. наук, професор В. Ю. Ольшанецький

д-р техн. наук, професор В. В. Наумик

---

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

Комп'ютерний дизайн та верстання:

Н. О. Савчук

Свідоцтво про державну реєстрацію  
КВ № 24298-14138 ПР від 16.12.2019

Підписано до друку 04.03.2024. Формат 60×84/8  
Папір офс. ризогр. Ум. др. арк. 8  
Тираж 300 прим. Зам. № 201

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

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
ДК № 6952 від 22.10.2019