

Міністерство освіти і науки України

Державний вищий навчальний заклад  
«Приазовський державний технічний університет»  
(ДВНЗ «ПДТУ»)

## **НАУКА ТА ВИРОБНИЦТВО**

Міжвузівський тематичний збірник наукових праць

Маріуполь – Краматорськ – Харків – Запоріжжя –  
Київ – Дніпро

**Випуск 31**

**Дніпро**

**2026**

**Наука та виробництво:** міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 31 / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2026. – 223 с.

**Редакційна колегія чинна до 01 червня 2026 року.**

**Angeliki G. Lekatou:** Dr., PhD (Chemical Metallurgy), Professor, Director of the Applied Metallurgy Laboratory, University of Ioannina (UOI), Greece, h-індекс: 20

**Hossam Ahmed Mohamed Halfa:** Dr., PhD (Metallurgy), Associate professor, Central Metallurgical Research & Development Institute, Cairo, Egypt, h-індекс: 4

**Sergey Edward Lyshevski:** Dr., PhD (Electrical Engineering), Professor of electrical engineering department of electrical and microelectronic engineering, Rochester Institute of Technology, New York, USA, h-індекс: 18

**Бєлоконь К. В.:** кандидат технічних наук (21.06.01 – Екологічна безпека; 183 Технології захисту навколишнього середовища), доцент, доцент кафедри прикладної екології та охорони праці, Запорізька державна інженерна академія, Україна, h-індекс: 3

**Білоусов С. В.:** кандидат технічних наук (05.08.05 – Суднові енергетичні установки; 142 Енергетичне машинобудування), доцент, декан факультету суднової енергетики, Херсонська державна морська академія, Україна, h-індекс: 1

**Щетиніна В.І.:** доктор технічних наук (05.03.06 – Зварювання та споріднені процеси і технології; 132 Матеріалознавство), професор кафедри зварювання та споріднені технології, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

**Бялобржеський О. В.:** кандидат технічних наук (05.09.01 - Електричні машини й апарати; 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), В. О. завідувач кафедри систем електроспоживання та енергетичного менеджменту, Кременчуцький національний університет імені Михайла Остроградського, Україна, h-індекс: 2

**Володарець М. В.:** кандидат технічних наук (05.22.07 – Рухомий склад залізниць та тяга поїздів; 273 Залізничний транспорт), старший викладач кафедри теплотехніки, теплових двигунів та енергетичного менеджменту, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

**Гришук І. В.:** доктор технічних наук (05.22.20 – Експлуатація та ремонт засобів транспорту; 271 Річковий та морський транспорт, 272 Авіаційний транспорт, 275 Транспортні технології (за видами), професор, Херсонська державна морська академія, професор кафедри експлуатації суднових енергетичних установок, Україна, h-індекс: 5

**Губинський М. В.:** доктор технічних наук (05.14.06 – Технічна теплофізика та промислова теплоенергетика; 144 Теплоенергетика), професор, Національна металургійна академія України, професор кафедри промислової теплоенергетики, Україна, h-індекс: 1

**Ковалевська О. С.:** кандидат технічних наук (05.02.08 - Технологія машинобудування; 131 Прикладна механіка), доцент, доцент кафедри технології машинобудування, Донбаська державна машинобудівна академія, Україна, h-індекс: 1

**Грибков Е. П.:** доктор технічних наук (05.03.05 – Процеси та машини обробки тиском; 132 Матеріалознавство), професор, професор кафедри комп'ютерних та інформаційних технологій, ДДМА, Україна, h-індекс: 7

**Лук'яненко А. О.:** кандидат технічних наук (05.26.01 – Охорона праці; 263 Цивільна безпека), доцент, завідувач відділу проблем охорони праці і екології в зварювальному виробництві, Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона Національної академії наук України, Україна, h-індекс: 1

**Мазур В. О.:** кандидат технічних наук (05.03.07 – Процеси фізико-технічної обробки; 132 Матеріалознавство), доцент, доцент кафедри наноінженерії в галузевому машинобудуванні, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 2

**Парфененко Ю. В.:** кандидат технічних наук (05.13.06 – Інформаційні технології; 122 Комп'ютерні науки та інформаційні технології), доцент, старший викладач кафедри комп'ютерних наук, Сумський державний університет, Україна, h-індекс: 3

**Петренко Т. Г.:** кандидат технічних наук (05.13.03 – Системи та машини обробки керування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології), доцент, доцент кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

**Плахтій О. А.:** кандидат технічних наук (05.09.12 – Напівпровідникові перетворювачі електроенергії; 171 Електроніка), доцент, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Український державний університет залізничного транспорту, Україна, h-індекс: 2

**Лаврік В.П.:** кандидат технічних наук (05.05.05 – Підйомно-транспортні машини; 133 Галузеве машинобудування), доцент, кафедри підйомно-транспортних машин і деталей машин, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

**Саснюк Ю. Л.:** доктор технічних наук (05.09.05 – Теоретична електротехніка; 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка), професор, декан енергетичного факультету, професор кафедри електротехнічних систем електроспоживання, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 2

**Азархов О.Ю.:** доктор медичних наук (05.11.17 – Біологічні та медичні прилади і системи; 152 Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка, 163 Біомедична інженерія), професор, завідувач кафедри біомедичної інженерії, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 3

**Ткачов В. В.:** доктор технічних наук (05.13.07 – Автоматизація процесів керування; 151 Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології), професор, завідувач кафедри автоматизації та комп'ютерних систем, Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Україна, h-індекс: 2

**Єфременко В.Г.:** доктор технічних наук (05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів; 132 Матеріалознавство, 136 Металургія), професор, завідувач кафедри фізики, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 21

**Чабак Ю.Г.:** кандидат технічних наук (05.16.01 – Металознавство та термічна обробка металів; 132 Матеріалознавство, 136 Металургія), доцент кафедри фізики, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 15

**Ачкасова С. А.:** кандидат економічних наук (08.00.08 – Гроші, фінанси і кредит; 051 Економіка, 072 Фінанси, банківська справа та страхування, 073 Менеджмент) доцент, доцент кафедри банківської справи і фінансових послуг, Харківський національний економічний університет імені Семена Кузнеця, Україна, h-індекс: 2

**Мягких І. М.:** доктор економічних наук (08.00.04 – Економіка та управління підприємствами; 051 Економіка, 073 Менеджмент, 075 Маркетинг, 076 Підприємництво, торгівля та біржова діяльність) професор, завідувач кафедри підприємництва та бізнесу, Київський національний університет технологій та дизайну, Україна, h-індекс: 7

**Симонов С. І.:** кандидат технічних наук (05.23.01 – Будівельні конструкції, будівлі та споруди), доцент, завідувача кафедри архітектурного проектування та інженерної графіки, ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет», Україна, h-індекс: 1

## Редакційна колегія з 1 червня 2026 року

**Чупринов Євген Валерійович:** Основне місце роботи: Державний університет економіки і технологій; Посада: в.о. проректора з наукової роботи, доцент кафедри металургійних технологій; Науковий ступінь: кандидат технічних наук; Вчене звання: доцент; Країна: Україна; Scopus Author ID: 56769874600; ORCID: 0000-0001-8605-3434

**Захарова Ірина В'ячеславівна:** Основне місце роботи: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»; Посада: зав кафедри зварювання та споріднені процеси; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: доцент; Країна: Україна; Scopus Author ID: 58618704300; ORCID: 0000-0002-3492-0134

**Чабак Юлія Генадіївна:** Основне місце роботи: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»; Посада: професор кафедри фізики; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Україна; Scopus Author ID: 55499289800; ORCID: 0000-0003-3743-7428

**Єфременко Василь Георгійович:** Основне місце роботи: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»; Посада: завідувач кафедри фізики; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Україна; Scopus Author ID: 7005748111; ORCID: 0000-0002-4537-6939

**Robert Böhm:** Основне місце роботи: Лейпцігський університет прикладних наук, економіки і культури; Посада: зав кафедри легких конструкційних матеріалів; Науковий ступінь: PhD; Вчене звання: професор; Країна: Німеччина; ORCID: 0000-0001-7768-4592

**Білодіденко Сергій Валентинович:** Основне місце роботи: Український державний університет науки і технологій; Посада: зав кафедри галузевого машинобудування; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Україна; Scopus Author ID: 6508015367; ORCID: 0000-0002-5768-594X

**Іщенко Анатолій Олексійович:** Основне місце роботи: ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет»; Посада: професор кафедри галузевого машинобудування; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Україна; Scopus Author ID: 7102919266; ORCID: 0000-0002-6189-7830

**Максимов Сергій Юрійович:** Основне місце роботи: Інститут електрозварювання ім. Є.О. Патона; Посада: Член-кореспондент НАН України Відділення матеріалознавства НАН України; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Україна; Scopus Author ID: 7101767808; ORCID: 0000-0002-5788-0753

**Окіпний Ігор Богданович:** Основне місце роботи: ТНТУ(Тернопіль) імені Івана Пулюя; Посада: завідувач кафедри інжинірингу машинобудівних технологій; Науковий ступінь: кандидат технічних наук; Вчене звання: доцент; Країна: Україна; Scopus Author ID: 15521025800; ORCID: 0000-0003-1059-3375

**Petryshynets Ivan:** Основне місце роботи: Інститут матеріалознавства Словацької академії наук (м. Кошице, Словаччина); Institute of Materials Research Slovak, Academy of Science (Kosice, Slovakia); Посада: старший науковий співробітник; Науковий ступінь: PhD; Вчене звання: старший дослідник; Країна: Slovakia; Scopus Author ID: 24280834700; ORCID: 0000-0001-8001-5349

**Kovalevsky Aleksey:** Основне місце роботи: Technion, R&D foundation; Посада: Senior researcher, head of welding and laser lab.; Науковий ступінь: PhD; Вчене звання: старший дослідник; Країна: Israel; Scopus Author ID: 57204237212; ORCID: 0000-0001-6422-129X

**Nizami Yusubov:** Основне місце роботи: Azerbaijan Technical University; Посада: Mechanical Engineering Technology; Науковий ступінь: доктор технічних наук; Вчене звання: професор; Країна: Azerbaijan; Scopus Author ID: 26636765900; ORCID: 0000-0002-6009-9909

**Галузь науки,  
код (шифр) спеціальності або галузь знань, що відповідає категорії «Б» Переліку  
наукових фахових видань України**

Спеціальності:

- 131 – Прикладна механіка (02.07.2020)
- 132 – Матеріалознавство (02.07.2020)
- 133 – Галузеве машинобудування (02.07.2020)
- 136 – Металургія (02.07.2020)
- 271 – Річковий та морський транспорт (02.07.2020)
- 272 – Авіаційний транспорт (02.07.2020)
- 273 – Залізничний транспорт (02.07.2020)
- 274 – Автомобільний транспорт (02.07.2020)
- 275 – Транспортні технології (за видами) (02.07.2020)
- 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка (24.09.2020)
- 142 – Енергетичне машинобудування (24.09.2020)
- 144 – Теплоенергетика (24.09.2020)
- 163 – Біомедична інженерія (24.09.2020)
- 171 – Електроніка (24.09.2020)
- 183 – Технології захисту навколишнього середовища (24.09.2020)
- 263 – Цивільна безпека (24.09.2020)

**З 01.06.2026 р кластери:**

G8 – Матеріалознавство; G9 – Прикладна механіка; G10 – Металургія; G11 –  
Машинобудування (за спеціалізаціями)

Головний редактор: **Щетинін С. В.** Відповідальний секретар редакції: **Зусін А. М.**  
*Адреса редакції збірника юридична:* 87500, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7,  
ДВНЗ «ПДТУ». *Фактичне місце розміщення:* Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, ауд. 314.  
Перереєстрований Державною реєстраційною службою України 26.12.2016. Свідоцтво про  
державну реєстрацію – серія КВ № 22493-12393ПР. Збірник входить до Переліку наукових  
фахових видань України та включений до категорії «Б», в якому можуть публікуватися  
основні результати дисертаційних робіт (Наказ Міністерства освіти і науки України  
24.09.2020 № 1188). Друкується згідно рішення Вченої Ради ДВНЗ «ПДТУ» (протокол №10  
від 30.04.2026р.). Видається 2 рази на рік.

© Приазовський державний технічний університет (ПДТУ), 2026

## ЗМІСТ

<b>Лаврик В.П., Суглобов В.В., Шишкін В.В., Горячун В.В.</b>	
Порівняльний аналіз магнітних та вакуумних захватних пристроїв у технології виготовлення коробчастих балок кранів.....	9
<b>Сарахман А.В.</b>	
Аналіз експлуатаційних навантажень та оцінка їх впливу на зварні з'єднання рефрижераторного напівпричепа.....	17
<b>Зусін А.М., Оліфіренко М.В.</b>	
Метастабільний аустеніт у наплавлених металах: природа, механізми зміцнення та застосування.....	24
<b>Щетинін С.В., Десятський С.П.</b>	
Регулювання енергії що вводиться у зварювальну ванну при односторонньому зварюванні.....	30
<b>Захарова І.В., Спесівцев Я.І</b>	
Підвищення надійності деталей тепловозних дизелів шляхом удосконалення технологій відновлення в умовах відбудови України.....	38
<b>Щетиніна В.І., Воленко І.В.</b>	
Фреттінг-корозія опорного валка і втулки-цапфи.....	45
<b>Аришин О.В., Макаров О.В., Михайлів Ю.В., Трофуненко І.С.</b>	
Природа утворення гарячих та холодних тріщин при високошвидкісному зварюванні та наплавленні.....	54
<b>Ніколаєв Р.В., Мінін Д.І., Плешаков А.О.</b>	
Вплив форми виробу на магнітне поле при зварюванні та наплавленні.....	60
<b>Заболотній О.М.</b>	
Складові до створення технології виробництва холодногнутих швелерів з сталей підвищеної міцності, що зварюються.....	69
<b>Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Піщенко К.А.</b>	
Синергія штучного інтелекту та матеріалознавства при створенні зображень наноарт: перспективи, проблеми та можливості.....	76
<b>Білодіденко С.В., Іщенко А.О., Кравченко В.М., Капустін С.В.</b>	
Підвищення довговічності ремінних передач роторних пил гарячої різки.....	93
<b>Лещенко О. І</b>	
Порівняльний аналіз напружено-деформованого стану зубів зубчастої передачі методами, аналітичним і кінцевих елементів.....	99
<b>Єлістратова Н.Ю.</b>	
Комплексна оцінка ефективності сонячних теплових та фотоелектрично-теплових систем.....	109
<b>Клецька О.В., Іванченко Д.А., Фалендиш А.П., Васильніченко О.С., Шикаловський Д.Г.</b>	
Методика визначення транспортного засобу для перевезення заданої кількості пасажирів.....	116
<b>Кулагін Д.О., Маслов І.З., Дєвочкін В.Ф.</b>	
Нормативно-технічні особливості врахування взаємного впливу елементів електромеханічної системи мобільної енергетичної установки з автономним джерелом електроживлення.....	128
<b>Молоштан Д. В., Загорянський В. Г.</b>	
Моделювання аварійних ситуацій дорожнього руху при наїзді легкового автомобіля на водія електросамоката.....	144

<b>Хара М.В., Ніколаєнко І.В., Маслак Г.В., Семченко Н.О.</b> Ризик-орієнтоване управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів в умовах невизначеності.....	152
<b>Турпак С.М., Лямзін А.О., Острогляд О.О., Васильєва Л.О., Олениця О.О.</b> Удосконалення наукового підходу до прогнозування та побудови моделей транспортних потоків.....	159
<b>Чорнобородова Н. П., Чорнобородов М. П., Бугрова Т. І., Логачова Л. М., Морщавка С. В., Сметанін І. М.</b> Розбіжність теорії й практики спіральних антен.....	166
<b>Лещенко В. О., Заболотна Н. І.</b> Аналіз сучасних методів та біотехнічних систем для діагностики онкопатологій за цитологічними зображеннями.....	177
<b>Матеуш В. С.</b> Структурно-алгоритмічний метод аналізу екг-сигналів для раннього виявлення аритмії на основі машинного навчання.....	187
<b>Бєлоконь К.В.</b> Дослідження дезактивації та регенерації інтерметалідних каталізаторів у системах очищення газових викидів.....	197
<b>Нестеров О.В., Капустян О.Є., Рубан В.Т.</b> Підтримання стабільності роботи підприємств критичної інфраструктури під час воєнного стану.....	211
<b>Новини України та світу.....</b>	219
<b>Вимоги до публікацій.....</b>	221

## CONTENTS

<b>Lavryk V.P., Suhlobov V.V., Shishkin V.V., Horiachun V.V.</b> Comparative analysis of magnetic and vacuum gripping devices in the technology of manufacturing box-type crane girders.....	9
<b>Sarakhman A.V.</b> Analysis of operational loads and assessment of their impact on welded joints of a refrigerated semi-trailer.....	17
<b>Zusin A.M., Olifirenko M.V.</b> Metastable austenite in weld deposits: nature, hardening mechanisms and application.....	24
<b>Shchetynin S.V., Desyatskyi S.P.</b> Regulation of energy input into the weld pool during one-sided welding.....	30
<b>Zakharova I.V., Spesivtsev Ya.I.</b> Enhancing the reliability of locomotive diesel engine components through the improvement of restoration technologies under the conditions of Ukraine's reconstruction.....	38
<b>Shchetynina V.I., Volenko I.V.</b> Fretting corrosion of the support roll and journal bushing.....	45
<b>Aryshyn O.V., Makarov O.V., Mykhailiv Y.V., Trofunenko I.S.</b> Nature of hot and cold cracking in high-speed with high-speed welding and surfacing.....	54
<b>Nikolaev R.V., Minin D.I., Pleshakov A.A.</b> Effect of product shape on magnetic field during welding and surfacing.....	60
<b>Zabolotnii O.M.</b> Components for creating a technology for manufacturing cold-bent channels from welded steels of high strength.....	69
<b>Vodennikova O.S., Vodennikov S.A., Pishchenko K.A.</b> Synergy of artificial intelligence and materials science in the creation of nanoart images: prospects, challenges, and opportunities.....	76
<b>Belodedenko S.V., Ishchenko A.O., Kravchenko V.M., Kapustin S.V.</b> Reliability issues of belt transmissions of hot cutting rotary saws.....	93
<b>Leshenko O. I.</b> Comparative analysis of stress-strain stand of gear teeth by analytical and end elements methods.....	99
<b>Yelistratova N.Y.</b> Comprehensive evaluation of the efficiency of solar thermal and photothermal systems.....	109
<b>Kletska O.V., Ivanchenko D.A., Falendysh A.P., Vasylnichenko O.S., Shykalovskyi D.G.</b> Method of determining a vehicle for carrying a given number of passengers.....	116
<b>Kulagin D.O., Maslov I.Z., Dievochkin V.F.</b> Regulatory and technical aspects of accounting for the mutual influence of electromechanical system elements in mobile power units with autonomous power sources.....	128
<b>Moloshtan D. V., Zahorianskyi V.G.</b> Modeling of traffic emergency situations in the case of a car riding on an electric scooter driver	144
<b>Khara M., Nikolaienko I., Maslak G., Semchenko N.</b> Risk-oriented management of railway car component and parts inventories in uncertain conditions.....	152
<b>Turpak S.M., Liamziin A.O., Ostrohliad O.O., Vasylieva L.O., Olenytsia O.O.</b> Improving the scientific approach to forecasting and modeling traffic flows.....	159
<b>Chornoborodova N. P., Chornoborodov M. P., Bugrova T. I., Logacheva L. M., Morshchavka S. V., Smetanin I. M.</b> Discrepancy between theory and practice of helix antennas.....	166

<b>Leshchenko V. O., Zabolotna N. I.</b> Analysis of modern methods and biotechnical systems for diagnosing oncopathologies using cytological images.....	177
<b>Mateush V.S.</b> Structural-algorithmic method for ecg signal analysis for early arrhythmia detection based on machine learning.....	187
<b>Belokon K.V.</b> Study of deactivation and regeneration of intermetallic catalysts in gas emission purification systems.....	197
<b>Nesterov O.V., Kapustian O.Ye., Ruban V.T.</b> Maintaining the stability of the operation of critical infrastructure enterprises during martial arts.....	211
<b>News of Ukraine and the world</b> .....	219
<b>Requirements for publications</b> .....	221

Лаврик В.П., Суглобов В.В., Шишкін В.В., Горячун В.В.

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ МАГНІТНИХ ТА ВАКУУМНИХ ЗАХВАТНИХ ПРИБОРІВ У ТЕХНОЛОГІЇ ВИГОТОВЛЕННЯ КОРОБЧАСТИХ БАЛОК КРАНІВ

У статті розглянуто актуальні питання транспортування листового прокату під час виготовлення металокопункцій мостових кранів коробчастого типу, зокрема на етапах заготівельних і складально-зварювальних операцій. Показано, що ефективність і якість формування елементів металокопункцій значною мірою залежать від обраного способу захоплення та переміщення листового матеріалу. Проведено аналіз існуючих методів транспортування листів, зосереджуючи увагу на особливостях застосування електромагнітних захоплювачів у виробничих умовах. Встановлено експлуатаційні обмеження використання магнітних хватних пристроїв при роботі з листовим прокатом товщиною 10-14 мм, що зумовлено зниженням жорсткості листів та нерівномірністю розподілу магнітного поля.

Визначено основні дефекти, які виникають під час транспортування листів магнітним способом, а саме: залишкова намагніченість матеріалу, що негативно впливає на стабільність процесу зварювання та якість зварних з'єднань; «ефект провисання» листів, який призводить до появи пластичних деформацій і відхилень від геометричних розмірів; а також злипання окремих листів між собою, що ускладнює подальші технологічні операції та знижує продуктивність виробництва. Показано, що зазначені недоліки можуть спричинити додаткові витрати на виправлення дефектів і погіршувати якість поверхні та геометрії заготівель.

Обґрунтовано доцільність впровадження вакуумних хватних пристроїв як альтернативного способу транспортування тонколистового прокату. Запропоновано використання вакуумних захоплювачів з деталями овальної форми, які забезпечують рівномірний розподіл навантаження по поверхні листа, зменшують локальні напруження та виключають намагнічування матеріалу. Застосування таких захоплювачів сприяє підвищенню якості заготівельних операцій, збереженню геометричної точності деталей та підвищенню надійності зварних з'єднань у металокопункціях мостових кранів.

**Ключові слова:** мостовий кран, коробчаста балка, листовий метал, магнітний захват, вакуумний захват, залишкова намагніченість, локальні напруження.

**Постановка проблеми.** Сучасне кранобудування розвивається у напрямку зниження металоємності конструкцій при збереженні їхньої вантажопідйомності та надійності. Для мостових кранів це досягається широким використанням коробчастих прогонових балок, стінки яких виготовляються з листового прокату. Тенденція до оптимізації ваги змушує конструкторів застосовувати листи меншої товщини, що створює нові технологічні виклики на етапі заготівельних та складальних операцій.

Традиційним засобом механізації транспортування листів на машинобудівних підприємствах є електромагнітні захоплювачі. Вони ефективні для товсто листового прокату, однак при роботі з листами товщиною до 10-14 мм виявляють низку критичних недоліків. Залишкова намагніченість крайок металу негативно впливає на стабільність зварювальної дуги («магнітне дуття») і якості з'єднання, а недостатня жорсткість тонкого листа призводить до його провисання та залишкових деформацій під час переміщення. Це зумовлює

## Машинобудування і зварювальне виробництво

необхідність пошуку альтернативних методів фіксації, які забезпечили б делікатне транспортування без пошкодження геометрії та фізичних властивостей металу.

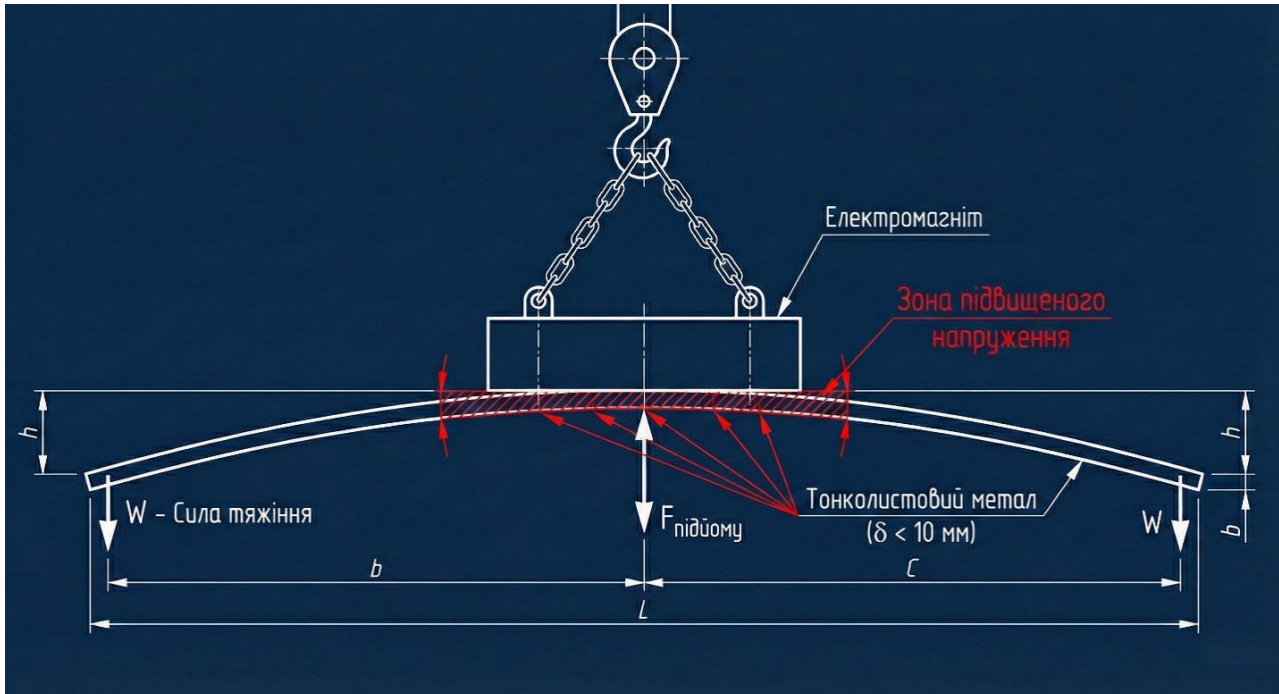


Рисунок 1 – Схема прогину тонкого листа при використанні центрального магнітного захвату

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фундаментальні питання проектування та розрахунку вантажозахоплювальних органів підійомно-транспортних машин висвітлено у працях [1-3]. У цих роботах детально описано методика розрахунку електромагнітних та вакуумних систем, проте основний акцент зроблено на забезпеченні вантажопідйомності та коефіцієнтів запасу міцності для товсто листового прокату, що був характерним для металокопункцій минулих десятиліть.

Сучасні аспекти автоматизації захватних операцій розглядаються у дослідженнях [4- 5], які проводили порівняльну оцінку ефективності різних типів захватів для рулонних вантажів. Проте ці дослідження не враховують специфіку довгомірних плоских елементів із низькою власною жорсткістю.

Значний обсяг практичних даних міститься у технічній документації провідних світових виробників кранового обладнання – Demag Cranes & Components, Koncranes та Tigrip (Yale) [6]. У їхніх каталогах широко представлені магнітні траверси, однак виробники вказують на технологічні обмеження при роботі з листами малої товщини (менше 10 мм) через ризик неповного магнітного насичення та провисання країв вантажу.

Таким чином, попри наявності широкої теоретичної бази, питання впливу методу транспортування на геометричну точність тонкостінних заготовель для коробчастих балок та подальшу якість їх зварювання залишається недостатньо вивченими, що й зумовлює актуальність даної роботи.

**Мета дослідження.** Метою роботи є проведення порівняльного аналізу експлуатаційних характеристик магнітних та вакуумних захватних пристроїв для визначення раціональної області їх застосування при виготовленні елементів металокопункцій кранів коробчастої форми.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

**Основний матеріал дослідження.** У сучасному кранобудуванні електромагнітні та постійні магнітні захоплювачі є домінуючим видом вантажозахоплювальних органів для переміщення феромагнітних матеріалів. Їхня популярність зумовлена швидкістю стропування (відсутність ручної праці стропальників) та високою вантажопідйомністю при роботі з сортовим прокатом та слябами. Однак специфіка виготовлення коробчастих балок мостових кранів висуває підвищені вимоги до якості поверхні та геометрії заготовель, що виявляє низку суттєвих недоліків магнітного способу. Тому необхідно провести аналіз технологічних особливостей та обмежень використання магнітних захоплювачів

Ефективність роботи електромагніту базується на замиканні магнітного потоку через тіло вантажу. Сила притягання прямо пропорційна квадрату магнітної індукції та площі контакту. Для реалізації номінальної вантажопідйомності магнітний потік повинен повністю «вміститися» у поперечному перерізі листа. При роботі з тонколистовим металом (за даними промислового досвіду підприємств, таких як ТОВ «Завод Кранкомплект» та ТОВ НВК «Технологія підйому», критичною є товщина менша за 10-14 мм) настає явище магнітного насичення сталі. Переріз листа стає недостатнім для проходження всього магнітного потоку, що призводить до різкого падіння сили утримання. Як наслідок, для надійного утримання тонких листів необхідно зменшувати крок розстановки магнітів на траверсі, що значно здорожує конструкцію та збільшує власну вагу захватного пристрою.

Найбільш критичним дефектом, на який вказують технологи зварювального виробництва, є залишкова намагніченість заготовель після транспортування. Сталі, що використовуються для металоконструкцій кранів (наприклад, 09Г2С), мають певну коерцитивну силу, зберігаючи магнітний потенціал після вимкнення електромагніту.

При подальшому автоматичному зварюванні поясних швів коробчастої балки виникає явище «магнітного дуття» – відхилення зварювальної дуги під дією власного магнітного поля та залишкового поля деталі. Це призводить до таких дефектів зварного шва:

- непровари кореня шва;
- бризки розплавленого металу;
- порушення геометрії катета шва.

Усунення цього недоліку вимагає додаткової технологічної операції — розмагнічування, що збільшує час виробничого циклу.

Крім магнітних ефектів, використання жорстких металевих поверхонь магнітів призводить до механічних пошкоджень:

- дряпання та наклеп: при позиціюванні магніту на поверхню листа виникає ударне навантаження. Якщо поверхня металу або магніту забруднена (стружка, окалина), виникають подряпини та вм'ятини, які є концентраторами напружень.

- захоплення «пакету»: при роботі з листами товщиною 4-6 мм магнітне поле може проникати крізь верхній лист і захоплювати наступний. Це створює аварійну ситуацію, коли нижній лист може відірватися під час транспортування на висоті.

- деформація провисання: як було показано на рис. 1, точкова фіксація магнітами не забезпечує рівномірного розподілу навантаження, що для довгих листів (стінок балок довжиною до 20-30 м) призводить до пружних та пластичних деформацій. До недоліків магнітного захвату слід віднести:

- зниження надійності за наявності зазорів і забруднень;
- ризик падіння вантажу при відключенні живлення (для електромагнітів без резервного живлення).

Аналіз недоліків магнітних систем, дозволяє сформулювати основні вимоги до альтернативного способу захоплення: відсутність впливу на кристалічну решітку металу, рівномірний розподіл навантаження та здатність працювати з тонкими (до 10 мм) листами без

## Машинобудування і зварювальне виробництво

деформацій. Цим вимогам повною мірою відповідають вакуумні захватні пристрої з еластомірними елементами.

На відміну від магнітного поля, яке пронизує структуру металу, вакуумний захват взаємодіє виключно з поверхнею. Принцип дії та технологічні переваги вакуумного захвату полягають у наступному. Утримання вантажу відбувається за рахунок різниці тисків: атмосферного зовні та розрідження (вакууму) всередині камери присоски (рис. 2).

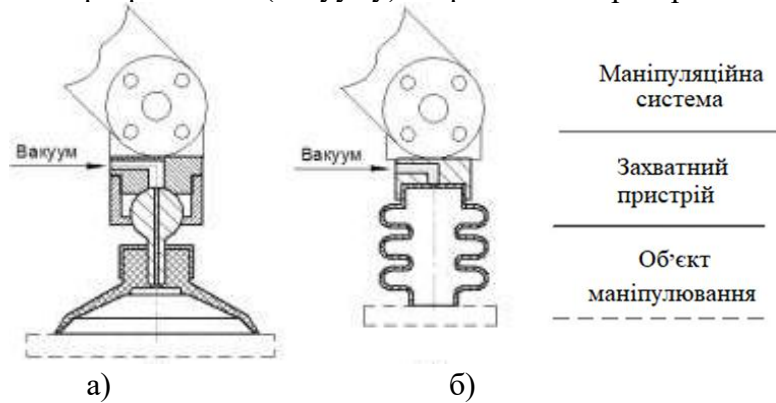


Рисунок 2 – Принципова схема дії вакуумного захватного пристрою  
а – пристрій з еластичною вакуумною камерою; б – пристрій з сільфонною камерою

Ключова перевага для технології зварювання полягає у фізичній нейтральності методу. Вакуум не створює електромагнітних полів, тому явище «магнітного дуття» при подальшому зварюванні повністю виключається. Це дозволяє відмовитися від операції розмагнічування та гарантує стабільність зварювальної дуги (рис. 3).



Рисунок 3 – Вакуумна підвісна система для транспортування сталевих листів

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Ефективність вакуумного захвату критично залежить від матеріалу ущільнення (присоски). При використанні технології вакуумного захвату необхідно виконати обґрунтування матеріалу контактних елементів. У промислових умовах кранобудування, де можлива наявність масляної плівки на металі та абразивних частинок, стандартна гума (NBR) швидко втрачає еластичність і зношується.

Проведений порівняльний аналіз матеріалів показує переваги використання поліуретанових еластомерів (PU):

- зносостійкість: у 3-5 разів вища, ніж у гуми, що критично важливо при інтенсивних циклах «захоплення - відпускання»;
- відновлення форми: поліуретан має низьку залишкову деформацію, швидко повертаючись до початкової геометрії після зняття навантаження;
- коефіцієнт тертя: високий коефіцієнт тертя поліуретану забезпечує надійну фіксацію листа від бокового зміщення (зсуву) під час динамічних навантажень (розгін та гальмування крана).

Специфікою коробчастих балок є використання довгих вузьких листів (смуг) для стінок та поясів. Тому необхідно провести геометричну оптимізацію контактних елементів. Використання традиційних круглих присосок у цьому випадку є неефективним, оскільки їх діаметр обмежений шириною заготівель. Застосування овальних присосок дозволяє вирішити цю проблему завдяки анізотропії їхньої форми (рис. 4).

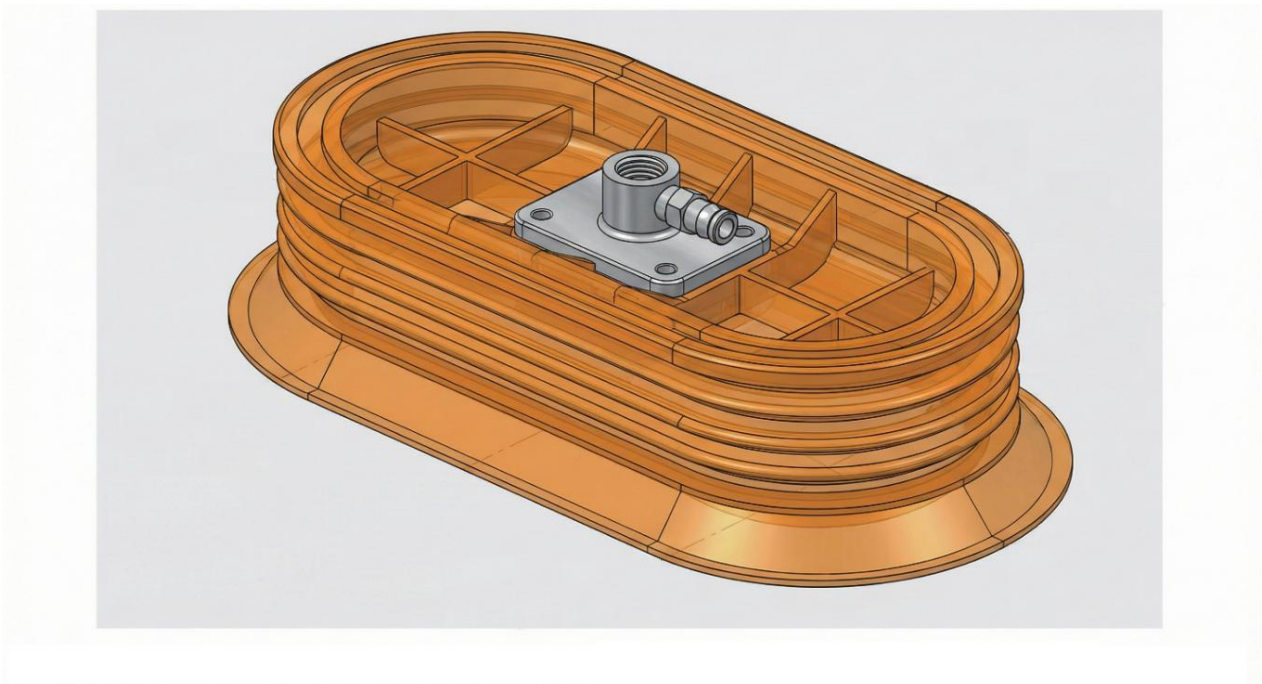


Рисунок 4 – Загальний вигляд овальної вакуумної присоски для довгомірних вантажів

Така геометрія дозволяє:

1. Максимізувати площу контакту: овальні присоски, орієнтовані довгою віссю вздовж листа, забезпечують більшу вантажопідйомність на вузькій смужі металу.
2. Зменшити прогин: овальна форма дозволяє «розтягнути» зону захоплення, зменшуючи локальні напруження в точці контакту.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Таким чином, комбінація вакуумного принципу дії, зносостійкого поліуретану та овальної геометрії створює систему, що нівелює недоліки магнітних захоплювачів при роботі з тонколистовим прокатом [6].

Для визначення доцільності впровадження вакуумних захватних пристроїв на ділянках заготівлі та складання металоконструкцій проведено порівняльний аналіз із традиційними електромагнітними системами. Порівняння виконувалось за двома групами критеріїв: технологічними (вплив на якість продукції) та економічними (витрати на експлуатацію).

Результати зведеного аналізу наведено в таблиці 1.

Таблиця 1 – Порівняльний техніко-економічний аналіз\*

Критерій порівняння	Електромагнітний захват	Вакуумний захват (овальні PU-присоски)
<b>1. Надійність утримання тонкого листа</b>	<b>Низька.</b> При $\delta < 10$ мм магнітний потік насичується, сила притягання падає на 30 - 50%.	<b>Висока.</b> Сила утримання залежить лише від площі присоски і вакууму, не залежить від товщини листа.
<b>2. Деформація заготовки (провисання)</b>	<b>Значна.</b> Точкове прикладання сили по центру викликає прогин країв під власною вагою.	<b>Відсутня / Мінімальна.</b> Багатоточкова система присосок рівномірно розподіляє навантаження по площині.
<b>3. Вплив на зварювання</b>	<b>Негативний.</b> Залишкова намагніченість викликає «магнітне дуття», пористість швів, розбрикування металу.	<b>Нейтральний.</b> Вакуум є діелектриком і не створює магнітних полів. Зварювальна дуга стабільна.
<b>4. Вимоги до поверхні</b>	Чутливий до іржі, окалини (повітряний зазор різко знижує силу). Нечутливий до мастила.	Чутливий до грубої іржі, але PU-еластомери компенсують мікронерівності. Допускається робота по замасленій поверхні (зі спеціальним протектором).
<b>5. Експлуатаційні витрати</b>	<b>Низькі.</b> Робоча поверхня металева, зношується повільно. Основні витрати – електроенергія.	<b>Середні.</b> Потребує періодичної заміни еластичних ущільнень (присосок). Однак PU служить у 3-5 разів довше гуми.
<b>6. Безпека праці</b>	При зникненні живлення вантаж падає (потрібні джерела безперебійного живлення).	Більш безпечний. При зникненні живлення вакуум у ресивері утримує вантаж протягом 15-20 хв.

\*Порівняльна характеристика захватних пристроїв для листового металу ( $\delta < 10-14$  мм)

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Аналізуючи економічну ефективність застосування цих двох способів захоплення та транспортування металевих листів, слід зазначити, що хоча прямі експлуатаційні витрати на обслуговування магнітних захоплювачів є нижчими (відсутність змінних гумових елементів), прихована «вартість якості» робить їх використання збитковим для тонколистових конструкцій. Впровадження вакуумних захоплювачів дозволяє виключити з технологічного процесу такі витратні операції: розмагнічування заготівель; правку (рихтування) листів після деформації при транспортуванні; ремонт зварних швів, дефектних через магнітне дуття.

### ВИСНОВКИ

1. Встановлено, що використання традиційних електромагнітних захоплювачів при виготовленні коробчастих балок мостових кранів має критичні обмеження при роботі з листовим прокатом товщиною менше 10 мм. Основними проблемами є фізичне явище магнітного насичення, що знижує надійність утримання, та виникнення залишкової намагніченості, яка негативно впливає на якість зварювальних робіт.

2. Обґрунтовано доцільність переходу на вакуумні хватні системи як альтернативу, що забезпечує делікатне транспортування без деформацій та магнітного впливу, ризик падіння вантажу при відключенні живлення (для електромагнітів без резервного живлення).

3. На основі порівняльного аналізу доведено перевагу використання овальних присосок із поліуретанових еластомерів. Овальна форма дозволяє ефективно використовувати площу вузьких довгомірних листів, а поліуретан забезпечує високу зносостійкість (у 3-5 разів вищу за гуму) та надійну фіксацію за рахунок високого коефіцієнта тертя.

4. Впровадження запропонованого способу транспортування дозволяє підвищити надійність виготовлення металоконструкцій шляхом ліквідації дефектів зварних з'єднань, викликаних магнітним дуттям, та збереження геометричної точності заготівель.

### Список використаних джерел

1. Analysis of various approaches to modeling of dynamics of lifting-transport vehicles / O. Grigorov, E. Druzhynin, G. Anishchenko, M. Strizhak, V. Strizhak // International Journal of Engineering & Technology. – 2018. – Vol. 7. – No. 4.3. – pp. 64-70. doi: 10.14419/ijet.v7i4.3.19553

2. М. П. Ремарчук. Рішення задач на основі використання системного аналізу і знань про закон зміни стану об'єкта дослідження // Збірник наукових праць «Підйомно-транспортні, будівельні та вантажно-розвантажувальні машини». – 2014. – Вип. 148. С. 86-94. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.148.2014.72770>

3. B. Zhang, Y. Xie, J. Zhou, K. Wang, Z. Zhang. State-of-the-art robotic grippers, grasping and control strategies, as well as their applications in agricultural robots: A review. Computers and Electronics in Agriculture. – 2020. – P. 177-191, art. no. 105694. doi.org/10.1016/j.compag.2020.105694

4. Р. П. Погребняк. Рациональний кінематичний синтез і структурний аналіз центрального прямолінійно-напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювального пристрою. Підйомно-транспортна техніка. - 2023. - № 1(68). - С. 56–70. doi.org/10.15276/pidtt.1.68.2023.05

5. Дослідження умов експлуатації фронтальних навантажувачів / І.О.Нефьодов, В. П. Лаврик, В. В. Суглобов. Наука та виробництво: міжвуз. темат. зб. наук. пр. Вип. 29 /

ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро, ПДТУ, 2025. с. 116-122. <https://doi.org/10.31498/2522-9990292025330264>

6. R. W Clough, C. P. Johnson A finite element approximation for the analysis of thin shells. International Journal of Solids and Structures. 1968. Vol. 4, Issue 1. P. 43–60. DOI:10.1016/0020-7683(68)90032-2.

**Lavryk V.P., Suhlobov V.V., Shishkin V.V., Horiachun V.V.**

## **COMPARATIVE ANALYSIS OF MAGNETIC AND VACUUM GRIPPING DEVICES IN THE TECHNOLOGY OF MANUFACTURING BOX-TYPE CRANE GIRDERS**

*The article addresses current issues of transporting sheet metal during the manufacture of metal structures for box-type bridge cranes, particularly at the stages of blank preparation and assembly-welding operations. It is shown that the efficiency and quality of forming metal structure elements largely depend on the selected method of gripping and moving the sheet material. An analysis of existing sheet-transport methods is carried out, with a focus on the specific features of using electromagnetic gripping devices under production conditions. Operational limitations of magnetic gripping devices when handling sheet metal with a thickness of 10-14 mm are identified, which are caused by reduced sheet stiffness and uneven distribution of the magnetic field.*

*The main defects that occur during magnetic transportation of sheets are determined, namely: residual magnetization of the material, which negatively affects the stability of the welding process and the quality of welded joints; the “sagging effect” of sheets, which leads to plastic deformations and deviations from geometric dimensions; as well as the sticking of individual sheets to each other, which complicates subsequent technological operations and reduces production productivity. It is shown that these disadvantages may cause additional costs for defect correction and deteriorate the surface quality and geometry of the blanks.*

*The feasibility of implementing vacuum gripping devices as an alternative method for transporting thin sheet metal is substantiated. The use of vacuum grippers with oval-shaped elements is proposed, ensuring uniform load distribution over the sheet surface, reducing local stresses, and eliminating material magnetization. The application of such grippers contributes to improved quality of blank-preparation operations, preservation of geometric accuracy of parts, and increased reliability of welded joints in bridge crane metal structures.*

**Keywords:** bridge crane, box girder, sheet metal, magnetic gripper, vacuum gripper, residual magnetization, local stresses.

*Стаття надійшла 20.02.2026р.*

*Стаття прийнята 25.02.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## АНАЛІЗ ЕКСПЛУАТАЦІЙНИХ НАВАНТАЖЕНЬ ТА ОЦІНКА ЇХ ВПЛИВУ НА ЗВАРНІ З'ЄДНАННЯ РЕФРИЖЕРАТОРНОГО НАПІВПРИЧЕПА

У даній роботі розглянуто вплив експлуатаційних навантажень на конструкцію рефрижераторного напівпричепи в умовах реальної роботи на міжнародних маршрутах. Об'єктом дослідження є рефрижераторний напівпричіп Krone Cool Liner. Було проаналізовано конструктивні особливості силової рами, ізотермічного кузова та найбільш навантажених зварних вузлів. Показано, що в процесі експлуатації на конструкцію одночасно діють динамічні, вібраційні та температурні навантаження, які формують змінний напружений стан у зонах зварних з'єднань. Також показано те, що вони можуть спричиняти накопичення втомних пошкоджень.

Для оцінювання рівня експлуатаційної навантаженості причепа використано дані телеметрії, отримані впродовж одного місяця роботи транспортного засобу під час виконання міжнародних перевезень температурних вантажів, зокрема відомості про пробіг, швидкість руху, цикли старт-стоп, повну масу автопоїзда, характер дорожнього покриття та температурний режим. На основі цих даних було запропоновано новий підхід до непрямого оцінювання навантаженості конструкції без застосування спеціалізованої тензометричної апаратури. Для інтегрального урахування впливу динамічних подій, фоновієї вібрації та температурних циклів використано запропонований показник  $D_{exp}$ , який є відносним безрозмірним індексом накопиченої експлуатаційної навантаженості всієї конструкції.

Розрахунки показали, що найбільший внесок у загальний рівень експлуатаційного впливу формують саме циклічні вібраційні навантаження, тоді як динамічні події гальмування і прискорення та температурні цикли мають меншу, але також суттєву роль у формуванні сумарної деградаційної дії. Отримані результати було порівняно з характерними зонами пошкоджень зварних з'єднань, що спостерігаються в процесі експлуатації напівпричепів. Цей підхід дозволив підтвердити зв'язок між розрахунковими показниками навантаженості та фактичними проявами втомних дефектів. Додатково було проаналізовано конструктивну схему напівпричепи з виділенням найбільш навантажених елементів та потенційно критичних зон, у яких формується підвищена концентрація напружень. Отримані результати підтверджують доцільність використання стандартних телеметричних параметрів для порівняльного аналізу режимів експлуатації, а також оцінювання навантаженості конструкції рефрижераторних напівпричепів у реальних умовах перевезень.

**Ключові слова:** рефрижераторний напівпричіп, експлуатаційні навантаження, зварні з'єднання, вібраційні навантаження, температурні цикли, телеметричні дані, втомні пошкодження, інтегральний показник навантаженості.

**Постановка проблеми.** Рефрижераторні напівпричепи працюють в умовах комбінованих навантажень, що включають динамічні впливи від дорожнього покриття, інерційні сили при гальмуванні та прискоренні, а також термічні впливи, зумовлені температурними перепадами. Конструкція таких напівпричепів характеризується поєднанням жорсткої рами та тонкостінних елементів кузова з великою кількістю зварних з'єднань. Сукупна дія навантажень формує змінний напружений стан, що є найбільш небезпечний для зварних вузлів, де відбувається накопичення втомних пошкоджень. У зв'язку з цим

## Машинобудування і зварювальне виробництво

актуальним є оцінювання експлуатаційної навантаженості конструкції на основі реальних даних роботи транспортного засобу.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз сучасних досліджень показує, що визначальний вплив на напружений стан конструкцій транспортних засобів мають динамічні навантаження, зумовлені взаємодією коліс із нерівностями дорожнього покриття. У роботах, присвячених динаміці транспортних засобів, встановлено, що саме ці впливи формують основні амплітуди змінних напружень у несучих елементах конструкції [1].

Оцінювання довговічності конструкцій базується на підходах втомного аналізу, що враховують циклічний характер навантаження. Зокрема, показано, що окремі фрагменти випадкового багатовісного навантаження можуть мати визначальний вплив на накопичення пошкоджень та ресурс елементів машин [2]. Узагальнені положення теорії втоми свідчать, що навіть при відносно невеликих напруженнях значна кількість циклів навантаження призводить до розвитку втомних тріщин, особливо у зонах концентрації напружень, характерних для зварних з'єднань [3].

Числові методи, зокрема метод скінчених елементів у поєднанні зі спектральним аналізом випадкових навантажень, широко застосовуються для оцінювання довговічності конструкцій транспортних засобів. Для напівпричепів показано ефективність такого підходу при моделюванні накопичення втомних пошкоджень у реальних умовах експлуатації [4]. При цьому форма кривих втоми у високочастотній області суттєво впливає на результати оцінювання ресурсу конструкцій [5].

Разом із механічними навантаженнями, для рефрижераторних напівпричепів важливу роль відіграють температурні режими експлуатації, що визначаються умовами перевезення швидкопсувних вантажів відповідно до нормативних вимог [6]. Конструктивні особливості таких напівпричепів, зокрема наявність ізотермічного кузова та специфічна схема силової рами, впливають на характер розподілу навантажень і напружень у зонах зварних з'єднань [7].

Таким чином, існуючі підходи до оцінювання навантаженості конструкцій транспортних засобів базуються переважно на експериментальних або числових методах. Водночас використання телеметричних даних реальної експлуатації для інтегрального оцінювання навантаженості конструкції залишається недостатньо дослідженим і потребує подальшого розвитку.

**Мета дослідження.** Оцінювання експлуатаційної навантаженості конструкції рефрижераторного напівпричепа на основі телеметричних даних із використанням інтегрального показника  $D_{exp}$ .

**Основний матеріал дослідження.** Об'єктом дослідження є рефрижераторний напівпричіп типу Krone Cool Liner, що використовується у міжнародних перевезеннях харчової продукції. Конструкція напівпричепа відповідає типовій схемі ізотермічних транспортних засобів і включає силову раму, ходову частину та ізотермічний кузов із сендвіч-панелей [7] (рис. 1).

Поєднання жорсткої рами та тонкостінних елементів кузова зумовлює підвищену чутливість зварних з'єднань до дії циклічних навантажень. Наведена схема відображає типову конструкцію напівпричепів даного типу та використовується для ідентифікації найбільш навантажених елементів конструкції.

Вихідні параметри розрахунку сформовано на основі телеметричних даних експлуатації напівпричепа за лютий 2026 року. Узагальнені параметри наведено в табл. 1.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

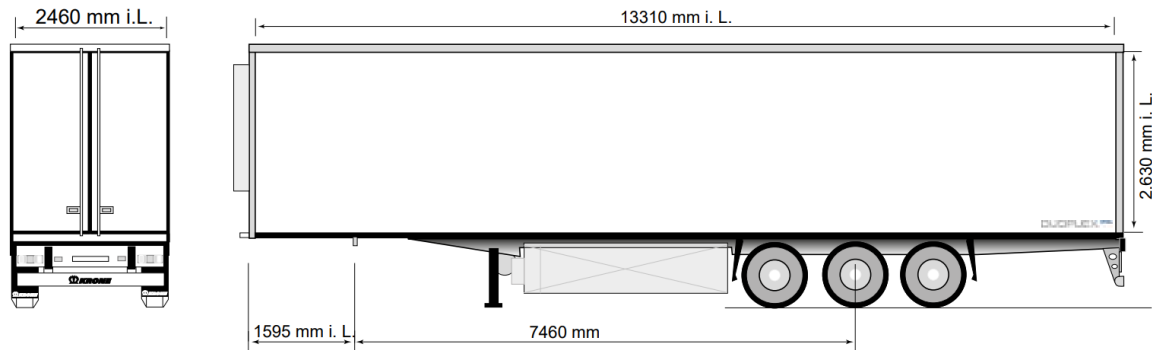


Рисунок 1 - Типова конструктивна схема рефрижераторного напівпричепа типу Krone Cool Liner (на основі технічних креслень виробника).

Таблиця 1 – Вихідні параметри розрахунку

Параметр	Позначення	Значення	Одиниці
Технічно допустима повна маса	$m_{ref}$	39.0	т
Середня повна маса під час руху	$m_{avg,move}$	31.468	т
Середня повна маса в динамічних режимах	$m_{avg,dyn}$	31.339	т
Загальний пробіг за період	$L_{run}$	2627.15	км
Частка пробігу по національних трасах	$P_{nat}$	0.86	-
Частка пробігу по інших дорогах	$P_{oth}$	0.14	-
Середній температурний перепад	$\Delta T$	12.68	°C
Кількість темп. циклів > 10 °C/год	$N_{temp}$	24	шт
Довжина вібр. циклу (нац. траси)	$\lambda_{nat}$	0.50	км
Довжина вібр. циклу (інші дороги)	$\lambda_{oth}$	0.25	км
Кількість різких прискорень у завантаженому стані	$N_{acc,loaded}$	380	шт
Кількість різких прискорень у порожньому стані	$N_{acc,empty}$	128	шт
Кількість різких гальмувань у завантаженому стані	$N_{br,loaded}$	408	шт
Кількість різких гальмувань у порожньому стані	$N_{br,empty}$	144	шт

Різкі прискорення та гальмування визначалися за критерієм зміни швидкості транспортного засобу у часі ( $\Delta v/\Delta t$ ) із використанням порогового значення, що дозволяє ідентифікувати динамічні події, які супроводжуються підвищеними інерційними навантаженнями на конструкцію.

Для інтегральної оцінки впливу експлуатаційних факторів на конструкцію напівпричепа використано індекс накопиченої експлуатаційної деградації  $D_{exp}$ , який інтегрально враховує внесок динамічних подій, фонові вібрації та температурних циклів.

Розрахунок показника виконується за залежністю:

$$D_{exp} = k_1 * k_m * N_{dyn} + k_2 * k_{mv} * N_{vib} + k_3 * (\Delta T * N_{temp})$$

## Машинобудування і зварювальне виробництво

де:  $k_1, k_2, k_3$  - коефіцієнти вагомості динамічної, вібраційної та температурної складових;

$k_m, k_{mv}$  - коефіцієнти масової навантаженості;

$N_{dyn}$  - кількість динамічних подій;

$N_{vib}$  - кількість приведених вібраційних циклів;

$\Delta T$  - характерний температурний перепад;

$N_{temp}$  - кількість температурних циклів.

Кількість динамічних подій визначається:

$$N_{dyn} = N_{acc,loaded} + N_{acc,empty} + N_{br,loaded} + N_{br,empty} = 1060$$

Оцінювання кількості вібраційних циклів виконано з урахуванням того, що при русі транспортного засобу по нерівностях дорожнього покриття формується квазіперіодичний процес навантаження:

$$N_{vib} = \frac{(P_{nat} * L_{run})}{\lambda_{nat}} + \frac{(P_{oth} * L_{run})}{\lambda_{oth}} \approx 5990$$

Значення довжини вібраційного циклу  $\lambda_{nat}$  та  $\lambda_{oth}$  прийнято на основі узагальнених літературних даних та інженерних оцінок, що враховують характер нерівностей дорожнього покриття для відповідних типів доріг. Прийняті значення відображають середню відстань між характерними збуреннями, які формують циклічні навантаження на конструкцію напівпричепи.

Коефіцієнти масової навантаженості визначено відносно допустимої маси напівпричепи:

$$k_m = \frac{31.339}{39} \approx 0.8, \quad k_{mv} = \max\left(\frac{m_{avg,move}}{m_{ref}}, 0.4\right) \approx 0.81$$

Обмеження  $k_{mv} \geq 0.4$  враховує підвищення інтенсивності вібраційних навантажень при зменшенні маси транспортного засобу, що зумовлено зростанням прискорень і амплітуди коливань при проходженні нерівностей дорожнього покриття.

Коефіцієнти вагомості прийнято на основі узагальнення результатів досліджень динаміки та втомної міцності конструкцій транспортних засобів [1–5]. При цьому найбільше значення коефіцієнта  $k_1=0.5$  відповідає динамічним навантаженням, які формують максимальні рівні напружень, тоді як коефіцієнт  $k_2=0.25$  характеризує вплив фонові вібрації, що має меншу амплітуду, але значну кількість циклів. Коефіцієнт  $k_3=0.2$  враховує температурні впливи, які мають допоміжний характер у формуванні напруженого стану конструкції.

У розрахунку прийнято лінійну залежність впливу температурних циклів, що є спрощеним інженерним припущенням і відображає пропорційний зв'язок між величиною температурного перепаду та рівнем термічних напружень у конструкції.

За результатами розрахунку отримано:

- динамічна складова: 424;

- вібраційна складова:  $\approx 1213$ ;

- температурна складова:  $\approx 61$ .

Загальне значення індексу:

$$D_{exp} \approx 1698$$

Отримане значення показника  $D_{exp}$  має безрозмірний характер і відображає інтегральний рівень експлуатаційної навантаженості конструкції за розглянутий період. Зазначений показник не має прямої фізичної інтерпретації у вигляді сили або напруження та використовується як відносний критерій для порівняння різних режимів експлуатації,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

маршрутів або транспортних засобів. Збільшення значення  $D_{exp}$  відповідає зростанню інтенсивності накопичення втомних пошкоджень у конструкції.

Отриманий результат свідчить, що визначальний внесок у експлуатаційну навантаженість конструкції формує фонова вібрація. Тоді як динамічні події та температурні впливи мають менший, але суттєвий вплив.

Для підтвердження отриманих результатів було проаналізовано фактичні пошкодження конструкції напівпричепа, що виникають у процесі експлуатації. Характерні приклади втомних дефектів зварних з'єднань (тріщин) та деформацій елементів кузова наведено на рис. 2.

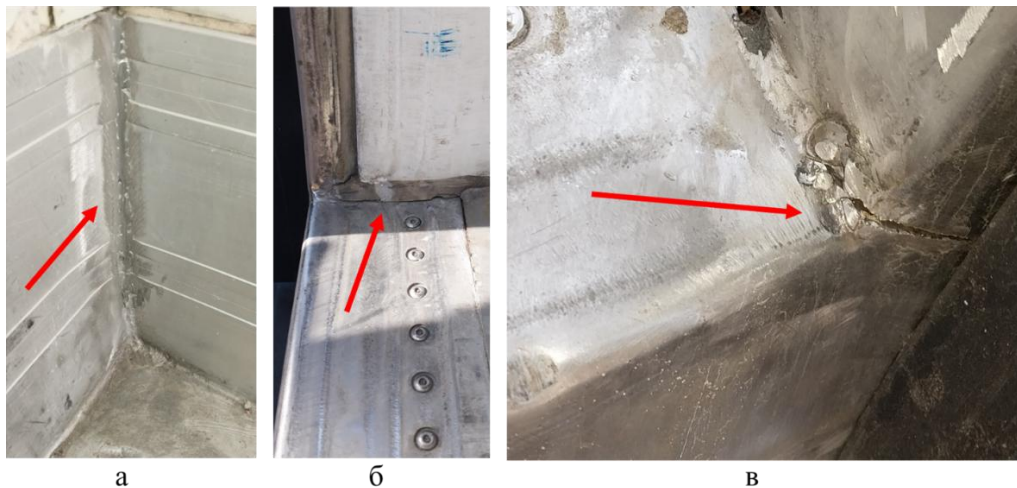


Рисунок 2 – Характерні пошкодження конструкції рефрижераторного напівпричепа: а - ділянка стику сендвіч-панелей із ознаками експлуатаційної деформації та відновлення; б - відшарування зварного шва горизонтального елемента дверної рами; в - тріщина у зварному з'єднанні кутового вузла дверної рами.

Аналіз показує, що пошкодження локалізуються у зонах концентрації напружень та у місцях дії циклічних навантажень, зокрема в елементах дверної рами та стиках конструктивних панелей. Це узгоджується з результатами розрахунку, згідно з якими визначальний внесок у навантаженість конструкції формують вібраційні впливи, що мають високий рівень циклічності.

Для узагальнення отриманих результатів та просторової інтерпретації зон навантаженості конструкції на рис. 3 наведено схему напівпричепа з виділенням характерних зон впливу експлуатаційних навантажень червоним кольором.

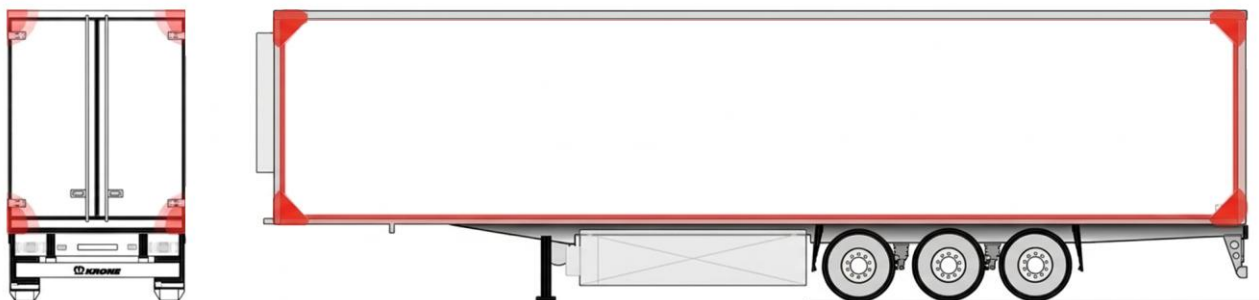


Рисунок 3 – Схема характерних зон підвищеної експлуатаційної навантаженості конструкції рефрижераторного напівпричепа

Виділені зони відображають як локальні області концентрації напружень (кутові вузли та елементи дверної рами), так і протяжні ділянки, що зазнають впливу тривалих вібраційних навантажень (стики сендвіч-панелей кузова). Хоча основні динамічні навантаження генеруються в зоні ходової частини, їх передача на тонкостінні елементи конструкції зумовлює накопичення втомних пошкоджень саме у зварних з'єднаннях та елементах кузова.

## ВИСНОВКИ

Проведене дослідження дозволило виконати комплексну оцінку експлуатаційної навантаженості несучих елементів рефрижераторного напівпричепа, спираючись на масив телеметричних даних реальних рейсів. Ключовим результатом роботи стало обґрунтування та апробація методики інтегрального врахування різнорідних впливів - від динамічних поштовхів до температурних коливань за допомогою розрахункового безрозмірного показника  $D_{exp}$ . Такий підхід продемонстрував свою ефективність як інструмент непрямого моніторингу стану конструкції, що не потребує розгортання дороговартісних тензометричних систем у польових умовах.

Аналіз отриманих розрахункових значень показав доволі неочікуваний розподіл факторів впливу: в умовах типових міжнародних перевезень домінуючий внесок у деградацію конструкції (понад 70%) формують саме циклічні вібраційні процеси. Хоча разові динамічні події, такі як різке гальмування чи прискорення, є більш амплітудними, їхня сумарна частка в накопиченні втомних пошкоджень виявилася меншою. Температурна ж складова за досліджуваний період відіграє скоріше фонову роль, створюючи передумови для подальшої дії механічних напружень у зварних вузлах.

Особливу увагу варто приділити тому, що отримані теоретичні результати цілком узгоджуються з картиною реальних пошкоджень, зафіксованих під час технічних оглядів напівпричепів. Найбільш вразливими до виявленого спектра навантажень виявилися зварні з'єднання дверної рами, кутові вузли та зони стику сендвіч-панелей. Те, що виявлені в експлуатації тріщини зварних швів локалізовані саме в зонах, які модель ідентифікувала як критичні, підтверджує адекватність запропонованого методу.

Підсумовуючи, можна стверджувати, що вібраційна навантаженість, яка передається від ходової частини на тонкостінний кузов, є визначальним чинником передчасного виходу з ладу зварних елементів. Запропонована методика використання стандартних параметрів телеметрії відкриває шлях до створення систем предиктивного обслуговування, дозволяючи кількісно оцінювати ресурс напівпричепів у реальному часі без втручання в їхню конструктивну схему.

## Список використаних джерел

1. Jacobson B. Vehicle dynamics and road load analysis. Royal Institute of Technology. 2012. URL: <https://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/244369/244369.pdf> .
2. Niesłony A. Determination of fragments of multiaxial service loading strongly influencing the fatigue of machine components. Mechanical Systems and Signal Processing. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2009.05.010> .
3. Stephens R.I., Fatemi A., Stephens R.R., Fuchs H.O. Metal Fatigue in Engineering. 2000. URL: [https://www.researchgate.net/publication/310302257\\_Metal\\_Fatigue\\_in\\_Engineering](https://www.researchgate.net/publication/310302257_Metal_Fatigue_in_Engineering) .
4. Cesário A.A., Mattos C., Lima L. Fatigue assessment of a semi-trailer using FE spectral analysis combined with random fatigue calculation. Proceedings of the 10th World Congress on Computational Mechanics. 2014. DOI:10.5151/meceng-wccm2012-19309.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

5. Sonsino C.M. Course of SN-curves especially in the high-cycle fatigue regime with regard to component design and safety. *International Journal of Fatigue*. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2006.11.015> .

6. UNECE. Agreement on the International Carriage of Perishable Foodstuffs (ATP). URL:[https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP\\_publication/ATP-2016e\\_def-web.pdf](https://unece.org/DAM/trans/main/wp11/ATP_publication/ATP-2016e_def-web.pdf) .

7. Krone. Box semi-trailers (Cool Liner). Technical documentation. URL:[https://www.krone-fleet.com/fileadmin/media/dokumente/koffer-sattelauflieger/koffersattelauflieger\\_de.pdf](https://www.krone-fleet.com/fileadmin/media/dokumente/koffer-sattelauflieger/koffersattelauflieger_de.pdf) .

Sarakhman A.V.

### ANALYSIS OF OPERATIONAL LOADS AND ASSESSMENT OF THEIR IMPACT ON WELDED JOINTS OF A REFRIGERATED SEMI-TRAILER

*The paper considers the impact of operational loads on the structure of a refrigerated semi-trailer under real operating conditions on international routes. The object of the study is a Krone Cool Liner refrigerated semi-trailer. The structural features of the load-bearing frame, insulated body, and the most highly loaded welded joints were analyzed. It is shown that during operation the structure is simultaneously subjected to dynamic, vibration, and thermal loads, which form a variable stress state in welded joint areas. It is also shown that they may lead to the accumulation of fatigue damage.*

*To assess the level of operational loading of the trailer, telematics data obtained over one month of vehicle operation during international temperature-controlled transport were used, including information on mileage, vehicle speed, start-stop cycles, total vehicle mass, road conditions, and temperature regime. Based on these data, a new approach to indirect assessment of structural loading without the use of specialized strain measurement equipment was proposed. For the integrated consideration of dynamic events, background vibration, and temperature cycles, the proposed indicator  $D_{exp}$  is used, which is a relative dimensionless index of accumulated operational loading of the entire structure.*

*The calculations showed that the dominant contribution to the overall level of operational impact is formed by cyclic vibration loads, while dynamic events such as braking and acceleration, as well as temperature cycles, have a smaller but still significant role in the formation of the overall degradation effect. The obtained results were compared with characteristic damage zones of welded joints observed during semi-trailer operation. This approach made it possible to confirm the relationship between the calculated loading indicators and the actual manifestations of fatigue defects. In addition, the structural scheme of the semi-trailer was analyzed with identification of the most highly loaded elements and potentially critical zones where increased stress concentration occurs. The obtained results confirm the feasibility of using standard telematics parameters for comparative analysis of operating conditions, as well as for assessing the structural loading of refrigerated semi-trailers under real transport conditions.*

**Keywords:** *refrigerated semi-trailer, operational loads, welded joints, vibration loads, temperature cycles, telematics data, fatigue damage, integrated load index.*

*Стаття надійшла 10.03.2026р.*

*Стаття прийнята 15.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

**МЕТАСТАБІЛЬНИЙ АУСТЕНІТ У НАПЛАВЛЕНИХ МЕТАЛАХ: ПРИРОДА,  
МЕХАНІЗМИ ЗМІЦНЕННЯ ТА ЗАСТОСУВАННЯ**

Викладено сучасні уявлення про природу метастабільного аустеніту в наплавлених металах та механізм його деформаційного мартенситного перетворення — TRIP-ефекту (Transformation-Induced Plasticity). Детально пояснено фізичний зміст понять метастабільності: температури початку мартенситного перетворення  $M_s$ , температури деформаційного перетворення  $M_d30$  та енергії дефектів пакування (SFE), що визначає легкість зародження мартенситних кристалів під дією напружень. Показано, чому структура метастабільного аустеніту є більш енергоємною порівняно з мартенситними або перлітними структурами тієї ж твердості, та як це безпосередньо пов'язано з підвищеною зносостійкістю відновлених деталей завдяки одночасному зміцненню поверхні, релаксації мікронапружень і поглинанню енергії зовнішнього впливу в зоні контакту. Систематизовано вплив основних легуючих елементів — хрому, марганцю, вуглецю, нікелю та азоту — на стабільність аустеніту, положення мартенситних точок  $M_s$  та  $M_d30$ , а також на інтенсивність деформаційного мартенситного перетворення при навантаженні. Окремо розглянуто роль азоту як особливо ефективного легуючого елементу, що одночасно стабілізує аустеніт, знижує SFE та при відпуску утворює дисперсні карбонітриди Ti, V, Al розміром 50–200 нм, забезпечуючи дисперсійне зміцнення матриці і подрібнення зерна аустеніту. Показано, що введення 0,075–0,15% азоту дозволяє знизити вміст дефіцитного нікелю в три рази при збереженні або підвищенні рівня зносостійкості наплавленого металу. Описано номенклатуру та порівняльні характеристики промислових наплавочних матеріалів із метастабільним аустенітом на Fe–Cr–Mn основі. Показано, як режими термічної обробки — відпуск при 400°C для ударно-абразивного зношування та при 650°C для абразивного зношування і сухого тертя — впливають на фазовий склад і визначають оптимальний баланс між кількістю метастабільного аустеніту та його здатністю перетворюватися на мартенсит деформації в процесі експлуатації. Визначено актуальні відкриті наукові питання напрямку та перспективи подальших досліджень. Стаття забезпечує читача необхідним понятійним апаратом і розумінням ключових закономірностей для самостійної наукової роботи у даній галузі.

**Ключові слова:** метастабільний аустеніт, TRIP-ефект, деформаційне мартенситне перетворення, наплавлений метал, зносостійкість, Fe–Cr–Mn сталі, порошковий дріт, термічна обробка, азот, карбонітриди.

**Постановка проблеми.** Деталі машин, що зазнають абразивного та ударно-абразивного зношування, виходять з ладу набагато швидше, ніж того вимагає конструкція в цілому. Кранові колеса, ролики правильних машин, зуби ковшів екскаваторів — усе це замінюють роками, витрачаючи при цьому значні кошти і час на простої. Електродугове наплавлення порошковими дротами залишається одним з найбільш доступних і ефективних способів відновлення таких деталей [1, 2]. Серед різних класів наплавочних матеріалів особливе місце посідають склади на основі системи Fe–Cr–Mn, у яких в наплавленому шарі формується метастабільний аустеніт. Їхня принципова відмінність від решти полягає в тому, що такий метал зміцнюється безпосередньо під час роботи деталі, а не тільки на стадії виготовлення.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Цей огляд покликаний пояснити, чому так відбувається та що саме потрібно знати, щоб правильно досліджувати та застосовувати подібні матеріали.

**Аналіз останніх досліджень.** Ідея використання деформаційного мартенситного перетворення для підвищення зносостійкості сягає корінням у роботи Разікова 1960-х років [3], де кавітаційностійка сталь 30X10Г10 стала прообразом цілого класу наплавочних матеріалів. Надалі школа Малинова [4] розвинула цей напрямок, показавши, що регулюванням хімічного складу і режимів термообробки можна цілеспрямовано управляти активністю мартенситного перетворення і тим самим адаптувати матеріал до конкретного виду зношування. Паралельно концепцію TRIP-ефекту (Transformation-Induced Plasticity) активно розробляли стосовно конструкційних сталей [5, 6], що дало розуміння фізики процесу на рівні кристалічної решітки. Разом з тим питання легування азотом, оптимізації відпуску і практичного застосування у наплавленні потребують систематизації, особливо для дослідника-початківця.

**Мета статті** — у доступній формі викласти природу метастабільного аустеніту, механізми його зміцнюючої дії та вплив ключових технологічних чинників на властивості наплавленого металу.

**Поняття метастабільного аустеніту.** Аустеніт — це  $\gamma$ -модифікація заліза з гранецентрованою кубічною решіткою. У чистому залізі він стабільний лише вище  $727^\circ\text{C}$ . У легованих сталях аустенізуючі елементи (Mn, Ni, N) розширюють  $\gamma$ -область і дозволяють зберегти аустеніт при кімнатній температурі. Якщо при цьому перетворення на мартенсит термодинамічно вигідне, але кінетично заблоковане, аустеніт називають метастабільним.

Для практики важливі дві характеристичні температури. Перша —  $M_s$  (Martensite start): якщо  $M_s$  нижче нуля, аустеніт у стані спокою не перетворюється сам по собі. Друга —  $M_d30$ : температура, при якій 50 % аустеніту перетворюється на мартенсит після деформації на 30 %. Якщо  $M_d30$  вище кімнатної температури, значить при механічному навантаженні аустеніт активно реагуватиме — саме цього і потрібно досягти. Для хромомарганцевих наплавлених металів типові значення:  $M_s \approx -50 \dots +20^\circ\text{C}$ ,  $M_d30 \approx +50 \dots +150^\circ\text{C}$  [4, 7].

Третя важлива характеристика — енергія дефектів пакування (SFE, stacking fault energy). Чим нижча SFE, тим важче часткові дислокації рекомбінують, і тим легше утворюються зародки мартенситу під дією напружень. Марганець, хром і особливо азот знижують SFE, що робить хромомарганцево-азотисті склади особливо схильними до деформаційного мартенситного перетворення [6, 8].

**TRIP-ефект і механізми зміцнення при зношуванні.** Коли абразивна частинка або контртіло взаємодіє з поверхнею наплавленого металу, у локальних мікрооб'ємах виникають концентровані напруження. Саме в цих точках — там, де найвірогідніше зародження мікротріщини — спрацьовує мартенситне перетворення. Це TRIP-ефект (Transformation-Induced Plasticity), вперше систематично описаний Зекелем [5] у 1967 р. Стосовно наплавлених покриттів його детально дослідив Малинов [4].

Механізм підвищення зносостійкості складається з трьох складових. По-перше, зміцнення поверхні в зоні контакту: мартенсит деформації значно твердіший за вихідний аустеніт, тому твердість поверхневого шару після навантаження зростає з 22–27 до 38–44 HRC. По-друге, релаксація напружень і гальмування тріщин: мартенситне перетворення супроводжується збільшенням об'єму на  $\sim 3\text{--}4\%$ , що компенсує концентрацію напружень і фактично «закриває» зароджувану тріщину. По-третє, поглинання енергії удару: значна частина енергії абразивного або ударного впливу витрачається на перебудову кристалічної решітки, а не на руйнування. Структура метастабільного аустеніту є суттєво енергоємнішою, ніж мартенситна сталь тієї ж твердості [4].

**Вплив легуючих елементів.** Хром (10–19 %) — феритоутворювач, що знижує  $M_s$  і утворює при відпуску карбіди  $(\text{Cr,Fe})_7\text{C}_3$  та  $\text{Cr}_{23}\text{C}_6$ . Ці карбіди вилучають вуглець із твердого

## Машинобудування і зварювальне виробництво

розчину, дестабілізуючи аустеніт і підсилюючи TRIP-ефект. Крім того, хром надає корозійну стійкість. При вмісті понад 15–16% і малому Mn структура переходить у ферито-мартенситну, що небажано для цього класу матеріалів.

**Марганець** (10–16 %) — головний замітник нікелю у хромомарганцевих складах. Аустенітна структура формується лише при >15 % Mn і <15 % Cr. Марганець знижує SFE, але при надто великому вмісті (>17–18 %) аустеніт стає надто стабільним і перестає реагувати на деформацію — зносостійкість падає. Тому вміст марганцю підбирають залежно від коефіцієнта динамічності умов роботи деталі [4, 9].

**Вуглець** (0,10–0,35 %) відіграє подвійну роль. У твердому розчині він стабілізує  $\gamma$ -фазу. При відпуску 600–650°C виділяється у вигляді карбідів, що дестабілізує аустеніт і робить його чутливим до ДМП. При вмісті понад 0,5 % виникає ризик утворення карбідних сіток по межах зерен, що різко знижує пластичність і ударну в'язкість [9, 10].

**Азот** (0,075–0,15 %) — найбільш ефективний легуючий елемент цього класу. Його аустенізуючий вплив у 25–30 разів сильніший, ніж у нікелю в перерахунку на одиницю маси, що дозволяє знизити вміст нікелю в три рази. Азот знижує SFE, активуючи ДМП. При відпуску він утворює дрібні карбонітриди Ti, V, Al розміром 50–200 нм, що є ефективними дисперсійними зміцнювачами і одночасно інгібіторами росту зерна. Вводять азот через азотований феромарганець у шихту порошкового дроту; коефіцієнт засвоєння при наплавленні під флюсом складає 0,35–0,45 [8, 11].

**Нікель** (мінімум 3 %) потрібен для запобігання утворенню  $\delta$ -фериту при підвищеному вмісті Mn та N. У традиційних складах його було 8–10 %, але завдяки азоту вдається обійтись трьома відсотками без погіршення зносостійкості [4].

**Титан і ванадій** (Ti 0,04–0,2 %, V 0,02–0,5 %) утворюють стійкі нітриди TiN і VN, нерозчинні в аустеніті до 1050–1200°C. Вони слугують бар'єрами для міграції меж зерен, подрібнюючи структуру наплавленого металу. Дрібні вторинні карбонітриди (Ti,V)(C,N), що виділяються при відпуску, додатково зміцнюють матрицю [11, 12].

**Промислові наплавочні матеріали.** Перші матеріали цього класу з'явилися у 1960-х роках на базі сталі 30X10Г10 [3]. Нині номенклатура включає дроти суцільного перерізу, порошкові дроти та порошкові стрічки. Основні представники наведено в таблиці 1. Матеріали поділяються на дві групи: з вмістом C 0,20–0,35 % (аустенітно-мартенситна структура, твердість 200–260 HB) і низьковуглецеві з C  $\leq$  0,14–0,20 % (переважно аустенітна структура, твердість 22–27 HRC після наплавлення, що дозволяє механічну обробку різанням).

Таблиця 1 – Наплавочні матеріали з метастабільним аустенітом

Марка матеріалу	C	Mn	Cr	Ni	Ti/V	N	Клас структури	Твердість
Нп-30X10Г10Т	0,25–0,35	10–12	10–12	0,6	Ti 0,15–0,30	–	Аустен.–март.	200–220 HB
ПП-Нп-14X12Г12СТ	$\leq$ 0,14	12	12	–	Ti 0,08	–	Аустенітний	22–27 HRC
ПЛ-Нп-10X14Г10МДАФ	$\leq$ 0,20	8–11	9–13	–	V 0,1–1,0	$\leq$ 0,15	Аустенітний	250–350 HB
ПП-Нп-12X12Г12СФ	$\leq$ 0,20	10–15	12–14	–	V 0,6–1,5	0,08–0,15	Аустенітний	250–350 HB

Головна вимога до всіх матеріалів цього класу: низька твердість після наплавлення (200–255 HB) для забезпечення обробки різанням і відсутність тріщин при наплавленні без попереднього підігріву — та значне зміцнення поверхні (до 400–500 HB) безпосередньо в процесі експлуатації за рахунок TRIP-ефекту [4, 9].

## Машинобудування і зварювальне виробництво

**Вплив термічної обробки.** Термічна обробка — другий за значущістю інструмент після хімічного складу. У наплавленому стані метал містить 85–90 % аустеніту і лише 5–10 % мартенситу; твердість не перевищує 27 HRC. Відпуск змінює цю картину суттєво — залежно від температури.

Відпуск при 400°C частково виділяє карбіди і дестабілізує аустеніт, але залишає його в достатній кількості (70–78 %). Приріст мартенситу деформації при механічному навантаженні сягає 30–50 % — максимум серед усіх режимів. Саме тому 400°C є оптимальним для умов ударно-абразивного зношування з підвищеними ударними навантаженнями.

Відпуск при 650°C забезпечує інтенсивне виділення карбідів  $(Cr,Fe)_7C_3$  і карбонітридів  $(Ti,V)(C,N)$  розміром 50–200 нм. Вміст вуглецю в твердому розчині знижується, аустеніт дестабілізується до рівня 60–70 %, твердість зростає до 34–38 HRC. Такий аустеніт охоче перетворюється на мартенсит при навантаженні ( $\Delta M = 35\text{--}45\%$ ). Цей режим є оптимальним для сухого тертя та абразивного зношування. При підвищенні температури до 750°C карбіди укрупнюються, зміцнювальний ефект знижується [4, 9].

Дані щодо впливу температури відпуску на властивості наплавленого металу Fe–Cr–Mn–Ni–N наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Вплив відпуску на фазовий склад і зносостійкість наплавленого металу

Т відпуску, °C	HRC	$\gamma$ , %	$\alpha'$ вих., %	$\Delta M$ при деф., %	$\epsilon$ (сухе тертя)	$\epsilon_a$ (абразив)
Без відпуску	23–27	85–90	5–10	15–20	1,70	1,65
400 *	28–33	70–78	18–25	30–50	2,10	1,95
650 **	34–38	60–70	25–32	35–45	2,65	2,38
750	30–33	68–75	20–28	22–30	2,20	2,05

Примітки: \* — оптимум для ударно-абразивного зношування; \*\* — оптимум для сухого тертя та абразивного зношування;  $\epsilon$  — відносна зносостійкість щодо еталону (сталь 45, 200 HB);  $\Delta M$  — приріст мартенситу деформації після навантаження.

**Практичне застосування та відкриті питання.** Матеріали з метастабільним аустенітом мають конкретну промислову «прописку». Найбільш поширені об'єкти відновлення — ходові колеса мостових і козлових кранів, що зношуються по поверхні кочення, ролики правильних машин і зуби ковшів екскаваторів. Наплавлення порошковими дротами типу ПП-Нп-14X12Г12СТ під флюсом забезпечує твердість 22–27 HRC після наплавлення, що дозволяє обробити деталь різанням до потрібного розміру, а в процесі роботи поверхня зміцнюється до 38–44 HRC за рахунок TRIP-ефекту [4, 12]. При відновленні зубів екскаваторів оптимальний склад зміщується в бік вищого вуглецю і меншої стабільності аустеніту, щоб максимально задіяти ДМП саме при ударних навантаженнях.

Важливий практичний аспект — зниження собівартості. Традиційні аустенітні матеріали типу X20Ni10G6 містять 8–10 % нікелю. Заміна нікелю марганцем і азотом у складах типу 10X19Ni3G10AT знижує вміст Ni до 3 % без погіршення, а нерідко і з підвищенням зносостійкості за рахунок більш інтенсивного TRIP-ефекту [9]. Додатково, застосування змішаного флюсу (Record SK + AN-26П, 50:50) замість дорогого чистого Record SK не впливає на якість наплавленого металу, але знижує витрати на флюс приблизно на 40 %.

Серед відкритих питань, що є перспективними для подальшої роботи, варто виділити три. По-перше, кількісне моделювання: надійних моделей, здатних прогнозувати фазовий склад і зносостійкість за хімічним складом і режимом відпуску, поки що бракує — це вдячне поле для регресійного аналізу та машинного навчання. По-друге, контроль азоту при

## Машинобудування і зварювальне виробництво

наплавленні: часткові втрати N у дузі і зварювальній ванні ускладнюють стабільне отримання заданого складу, і технологічні рішення тут ще не вичерпані. По-третє, поведінка при підвищених температурах: ролики нагрівальних печей і подібні деталі працюють при 200–400°C, де термічна стабільність карбонітридів і самого аустеніту досліджена ще недостатньо.

### ВИСНОВКИ

Метастабільний аустеніт у наплавлених металах Fe–Cr–Mn–Ni–N реалізує принцип самозміцнення матеріалу при навантаженні — TRIP-ефект. Його суть у тому, що механічна енергія зношування перетворюється на енергію фазового перетворення, зміцнюючи поверхню там і тоді, де це найбільш потрібно.

Стабільність аустеніту і активність TRIP-ефекту контролюються хімічним складом (Cr, Mn, C, N, Ni) і режимом відпуску. Азот є найбільш перспективним елементом: він стабілізує аустеніт, знижує SFE і утворює зміцнюючі карбонітриди при відпуску, дозволяючи суттєво скоротити вміст нікелю.

Відпуск при 650°C оптимальний для абразивного зношування і сухого тертя, при 400°C — для ударно-абразивного зношування. Промислова практика підтверджує підвищення ресурсу відновлених деталей у 2–3 рази порівняно зі звичайними наплавочними матеріалами.

### *Список використаних джерел*

1. Рябцев І.А. Наплавка деталей машин і механізмів / І.А. Рябцев. – К.: Екотехнологія, 2004. – 160 с.
2. Лившиц Л.С. Основы легирования наплавленного металла / Л.С. Лившиц, Н.А. Гринберг, Э.Г. Куркумелли. – М.: Машиностроение, 1984. – 103 с.
3. Разиков М.И. О выборе наплавочного материала, стойкого при кавитационном нагружении / М.И. Разиков, Б.А. Кулишенко // Сварочное производство. – 1967. – №7. – С. 10–12.
4. Малинов Л.С. Ресурсосберегающие экономнолегированные сплавы и упрочняющие технологии, обеспечивающие эффект самозакалки / Л.С. Малинов, В.Л. Малинов. – Мариуполь: изд. «Рената», 2009. – 568 с.
5. Zackay V.F. The enhancement of ductility in high-strength steels / V.F. Zackay [et al.] // ASM Transactions Quarterly. – 1967. – Vol. 60. – P. 252–259.
6. De Cooman B.C. State-of-the-knowledge on TWIP steel / B.C. De Cooman, Y. Estrin, S.K. Kim // Acta Materialia. – 2018. – Vol. 142. – P. 283–362.
7. Olson G.B. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation / G.B. Olson, M. Cohen // Metallurgical Transactions A. – 1975. – Vol. 6A. – P. 791–795.
8. Gavriljuk V.G. Nitrogen in Iron and Steel / V.G. Gavriljuk, H. Berns // ISIJ International. – 1999. – Vol. 39, No. 8. – P. 807–815.
9. Зусін А.М. Розробка наплавочних матеріалів і технології наплавлення металу з метастабільним аустенітом: дис. ... канд. техн. наук: 05.03.06 / ДВНЗ «ПДТУ». – Мариуполь, 2015. – 168 с.
10. Малинов Л.С. Упрочнение нестабильных аустенитных Cr–Mn–N сталей / Л.С. Малинов, Т.Д. Эйсмонт // Известия АН СССР. Металлы. – 1969. – №2. – С. 114–120.
11. Simmons J.W. Overview: high-nitrogen alloying of stainless steels / J.W. Simmons // Materials Science and Engineering A. – 1996. – Vol. 207. – P. 159–169.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

12. Малинов Л.С. Разработка и исследование новой порошковой ленты для наплавки колес мостовых кранов / Л.С. Малинов, А.П. Чейлях, Е.А. Харланова // Сварочное производство. – 1995. – №10. – С. 22–25.

Zusin A.M., Olifirenko M.V.

### METASTABLE AUSTENITE IN WELD DEPOSITS: NATURE, HARDENING MECHANISMS AND APPLICATION

*The current understanding of the nature of metastable austenite in deposited metals and the mechanism of its deformation martensitic transformation — the TRIP effect (Transformation-Induced Plasticity) are presented. The physical meaning of the concepts of metastability is explained in detail: the temperature of the onset of martensitic transformation  $M_s$ , the deformation transformation temperature  $M_d30$ , and the packing defect energy (SFE), which determines the ease of nucleation of martensitic crystals under the action of stresses. It is shown why the structure of metastable austenite is more energy-intensive compared to martensitic or pearlitic structures of the same hardness, and how this is directly related to the increased wear resistance of restored parts due to simultaneous surface strengthening, relaxation of microstresses, and absorption of energy from external influences in the contact zone. The influence of the main alloying elements — chromium, manganese, carbon, nickel and nitrogen — on the stability of austenite, the position of the martensite points  $M_s$  and  $M_d30$ , as well as on the intensity of the deformation martensitic transformation under load is systematized. The role of nitrogen as a particularly effective alloying element that simultaneously stabilizes austenite, reduces SFE and, upon tempering, forms dispersed carbonitrides of Ti, V, Al with a size of 50–200 nm, ensuring dispersion strengthening of the matrix and grinding of austenite grains is separately considered. It is shown that the introduction of 0.075–0.15% nitrogen allows reducing the content of deficient nickel by three times while maintaining or increasing the level of wear resistance of the deposited metal. The nomenclature and comparative characteristics of industrial surfacing materials with metastable austenite on the Fe–Cr–Mn basis are described. It is shown how the heat treatment modes — tempering at 400°C for impact-abrasive wear and at 650°C for abrasive wear and dry friction — affect the phase composition and determine the optimal balance between the amount of metastable austenite and its ability to transform into deformation martensite during operation. Relevant open scientific questions of the direction and prospects for further research are identified. The article provides the reader with the necessary conceptual apparatus and understanding of key patterns for independent scientific work in this field.*

**Keywords:** metastable austenite, TRIP effect, deformation martensitic transformation, weld metal, wear resistance, Fe–Cr–Mn steels, flux-cored wire, heat treatment, nitrogen, carbonitrides.

Стаття надійшла 02.03.2026р.

Стаття прийнята 05.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

Щетинін С.В., Десятський С.П.

## РЕГУЛЮВАННЯ ЕНЕРГІЇ ЩО ВВОДИТЬСЯ У ЗВАРЮВАЛЬНУ ВАННУ ПРИ ОДНОСТОРОННЬОМУ ЗВАРЮВАННІ

Енергія, яка вводиться дугою у зварювальну ванну, визначає тепловкладення, електричний опір, розтікання струму, магнітне поле і тиск, формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. Дуга збуджується при закороченні чи в місці меншої відстані між електродами. Дуга прагне горіти при низькій напрузі, тому переміщається торцем електрода. Струм тече шляхом найменшого опору. При закороченні електрода на виріб дуга збуджується в результаті емісії електронів з поверхні катода, який забезпечує регенерацію зарядів.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле дуги створює пінч-ефект, що зменшує діаметр дуги до  $10^{-6}$  м, підвищує щільність струму до  $10^{11}$  А/м<sup>2</sup> і стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює поперечне магнітне поле, під дією електромагнітної сили якого дуга відхиляється у бік меншого поля, протилежну струмопідводу, до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням підрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм, через бокові кромки ванни. В результаті, зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів. На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, за рахунок регулювання енергії та магнітного поля, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання. На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщається торцем електрода попереду дроту, вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і попереджує утворення підрізів. Розроблено математичну модель джерела тепла, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв, є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який, за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом, запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається. Площа,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, одностороннє зварювання на флюсовій подушці, незалежно від зазора в стику, збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань у 2 – 2,5 рази.*

**Ключові слова:** енергія, одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом, математична модель джерела тепла, підрізи, ударна в'язкість зварних з'єднань.

**Постановка проблеми.** Одностороннє високошвидкісне зварювання на флюсовій подушці обмежено порушенням формування швів, внаслідок утворення підрізів, що призводить до зниження ударної в'язкості зварних з'єднань. Тому, розробка одностороннього високошвидкісного зварювання, що забезпечує підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань, є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для запобігання утворення підрізів при дводуговому зварюванні перша дуга проплавляє основний метал, а друга забезпечує відсутність підрізів і якісне формування швів. Однак, при дводуговому зварюванні не забезпечується рівномірне формування зворотного валику на флюсовій подушці. Вплив регулювання енергії, переміщення дуги торцем електрода, магнітного поля, за рахунок форми електрода, на формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні та ударну в'язкість зварних з'єднань досліджено недостатньо [1 – 10].

**Мета досліджень.** Регулювання енергії та розробка одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом, що забезпечує відсутність підрізів, підвищення якості зворотного валику на флюсовій подушці і ударної в'язкості зварних з'єднань.

**Основний матеріал дослідження.** Ефективним енерго- та матеріалозберігаючим процесом є одностороннє високошвидкісне зварювання, яке забезпечує збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань. Однак, підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням підрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Дуга визначає енергію, регулювання якої забезпечує формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. У дузі головна роль належить катоду, головна роль якого в дузі полягає в емісії електронів з поверхні катода, що забезпечує регенерацію зарядів. Катодна пляма дуги, з діаметром порядку  $10^{-6}$  м, постійно переміщається по катоду, внаслідок чого візуально видно площу, по якій переміщається дуга. Щільність струму, за останніми даними, становить  $10^{11}$  А/м<sup>2</sup>. Малий розмір катодної плями, висока щільність струму та рух катодної плями є результатом пінч-ефекту, тобто стиснення під впливом власного магнітного поля. Під дією пінч-ефекту йде ніби ланцюгова реакція – стиснення катодної плями під дією поля призводить до зменшення діаметра плями, що призводить до посилення магнітного поля, яке у свою чергу призводить до скорочення діаметра плями. Процес продовжується до обриву дуги. Дуга знову збуджується у місці найменшої відстані між електродами, згідно із законом найменшого опору.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле струму дуги створює пінч-ефект, який зменшує діаметр дуги, підвищує щільність струму та стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює поперечне магнітне поле, під дією якого дуга відхиляється у бік меншого поля, у бік, протилежний струмопідводу аж до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Діюча на дугу електромагнітна сила зварювального струму пропорційна струму  $I$ , індукції магнітного поля  $B$  і довжині дуги  $L_d$  [3]:

## Машинобудування і зварювальне виробництво

$$F_{EMД} = IBl_{д}, H.$$

Для підвищення швидкості зварювання, розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм через бокові кромки ванни. В результаті, зростає спрямований вниз магнітний тиск [3]

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu} \text{ Па},$$

під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині U-подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання (рис.1г). На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщається торцем електрода попереду дроту, вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і запобігає утворення підрізів.

Електромагнітна природа утворення підрізів підтверджується значною мірою. При зварюванні тонкого метала, підрізи не утворюються. Зі зменшенням глибини проплавлення, схильність до утворення підрізів знижується. З підвищенням глибини проплавлення, схильність до утворення підрізів посилюється. При дводуговому зварюванні перша дуга проплавляє метал, а друга забезпечує відсутність підрізів, за рахунок малої глибини проплавлення. При наплавленні перпендикулярною стрічкою (рис.1а), зі швидкістю 15 м/г утворюються підрізи, тому наплавлення валків перпендикулярною стрічкою не проводиться.

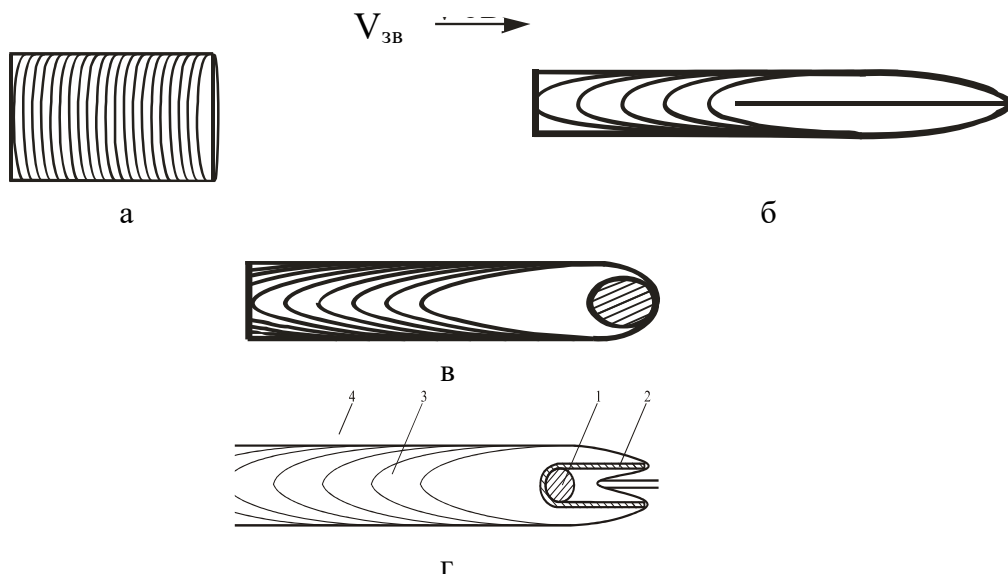


Рисунок 1 – Форма електрода

а – перпендикулярна стрічка; б – повздовжня стрічка; в – дріт;

г – енерго- і матеріалозберігаючий процес одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом:

1 – дріт; 2 – U-подібна стрічка; 3 – зварний шов; 4 – основний метал;

$V_{зв}$  – напрямок зварювання

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Ефективним енерго- та матеріалозберігаючим процесом є одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом (рис.1г) на низькій енергії, яке забезпечує запобігання утворенню підрізів, зменшення тиску зварювальної дуги та якісне формування швів на флюсовій подушці, незалежно від зазору, зниження енергії, мікроспотворень кристалічних решіток, швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань.

При зварюванні складовим електродом тепловкладення можна у значних межах регулювати, шляхом зміни довжини прямолінійних ділянок стрічки. Для визначення оптимальної форми електрода, що забезпечує ефективне тепловкладення в зварювальну ванну, розроблена розрахункова схема джерела тепла і проведений розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод (рис.1г) представлений як складне джерело теплоти [7]. Дуга, що горить в області дротяного електрода і забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв  $U\delta/2a = 19$  і  $z/\delta = 0,3$  [5] є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Потужності джерел визначені пропорційно зайнятому кожним з них перерізу електрода, оскільки швидкість руху дуги по торцю електрода значно вища за швидкість зварювання. Товщина стрічки обрана 0,0005 м, внаслідок збільшення ефективності її застосування із зменшенням товщини [8], мінімум якої обмежений зниженням жорсткості. Діаметр дроту 0,004 м. Розрахунок зроблений для режиму зварювання:

$$I = 2100 \text{ A}; \quad U = 32 \text{ B}; \quad V = 3,8 \cdot 10^{-2} \text{ м/с.}$$

Порівняння розрахункових значень, ширини ізотерми плавлення 0,0215 м з експериментальними даними ширини шва 0,021 м, дає хорошу збіжність результатів у зоні сплавлення, тому вираз в достатній мірі відображає процес поширення тепла і може бути використано для визначення оптимальної форми складового електрода.

Під дією електромагнітної сили при зварюванні складовим електродом дуга переміщається у поздовжньому і поперечному напрямках, збільшується час існування дуги у бокових кромках ванни. У процесі зварювання дуга переміщається в області прямолінійних ділянок стрічки, потім переходить на дротяний електрод, потім знову на прямолінійні ділянки стрічки. На електроді постійно горить лише одна дуга, яка переміщається торцем зі швидкістю, що значно перевершує швидкість зварювання [3]. Згідно з принципом місцевого впливу джерел теплоти [5], збільшення області, зайнятої джерелом, призводить при зварюванні складовим електродом до збільшення тепловкладення в бокові кромки ванни і тепла, що розповсюджується попереду дуги на дротяному електроді, в результаті покращуються умови існування активної плями, зростає рухливість дуги і ширина зони, нагрітої вище температури плавлення.

Струмопідвод здійснюється до дроту. Найбільш ефективно тепловкладення в бокові кромки ванни, при безпосередньому контакті дроту з прямолінійними ділянками стрічки. Дуга, що переміщається на прямолінійних ділянках стрічки, підігріває основний метал і покращує умови існування активної плями дуги, що горить на дроті. В результаті, при контакті дроту та зігнутої ділянки стрічки, підвищується стабільність процесу та рівномірність по висоті формування зворотного валика. Ефективне збільшення тепловкладення в передній та бокових кромках ванни, зниження спрямованого вниз магнітного тиску та якісне формування швів досягається при оптимальній відстані між прямолінійними ділянками стрічки 0,006 м (рис.1г).

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Зосередженість теплового потоку значною мірою залежить від довжини прямолінійних ділянок стрічки, зі збільшенням якої кількість теплоти, виділена у передній та бокових кромках ванни, зростає. В результаті, ізотерми плавлення зміщуються вперед у напрямку переміщення джерела та розширюються в напрямку, перпендикулярному осі шва. Розосередження теплового потоку уздовж ванни є одним з факторів, що визначають тепловкладення, зміну магнітного поля, поліпшення формування зворотного валика і забезпечують нормальну ширину шва при низькій напрузі. Однак, збільшення довжини прямолінійних ділянок стрічки обмежене зменшенням глибини проплавлення, внаслідок перерозподілу потужності джерела в бокові кромки ванни та збільшення площі, по якій рухається дуга. Зокрема, при зварюванні складовим електродом, з довжиною прямолінійних ділянок стрічки 0,03 м, глибина проплавлення зменшується втричі, в порівнянні з дротом і стає криволінійною, з різким збільшенням глибини проплавлення в зоні сплавлення, де утворюються тріщини та шлакові включення. Значне зменшення довжини прямолінійних ділянок стрічки до 0,01 м призводить до зниження кількості тепла в передній та бокових кромках ванни, утворення підрізів та порушення формування зворотного валика, внаслідок збільшення тиску дуги.

Розроблено математичну модель джерела тепла та зроблено розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

В результаті розрахунку ізотерм плавлення та експериментальних даних про вплив форми електрода на формування швів, встановлена оптимальна форма складового електрода, з довжиною прямолінійних ділянок стрічки 0,013 м і відстанню між ними 0,006 м (рис.1). Складовий електрод оптимальної форми, шириною 0,007 м і довжиною 0,018 м, формується в процесі подачі стрічки шириною 0,045 м і забезпечує якісне формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні на флюсовій подушці, без розділки кромки металу, товщиною 0,006–0,012 м.

Внаслідок збільшення тепловкладення та зменшення струму, що протікає через бокові кромки ванни, при зварюванні складовим електродом зменшується індукція та спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів. Тому, при односторонньому високошвидкісному зварюванні складовим електродом, забезпечується формування швів без підрізів.

У процесі подачі, дротяний електрод згинається у напрямку зварювання, а стрічковий у протилежному напрямку. В результаті, між електродами у зоні зварювання утворюється зазор. На віддаленій від дроту ділянці зігнутої стрічки періодично збуджується дуга, катодна пляма якої розташовується на плазмі дуги, що горить на дротяному електроді. Це супроводжується утворенням рідкої перемички між дротом та стрічкою, порушенням стабільності процесу та формування зварних швів.

Зазор між дротом та стрічкою збільшується зі зростанням вильоту. Для підвищення стабільності процесу і якості, зварювання складовим електродом під флюсом проводиться на дуже низькому вильоті  $(17-19) \times 10^{-3}$  м. При цьому, посилюється саморегулювання, дуга стає жорсткою, менш чутливою до зміни зазору в стику, що пояснюється зменшенням довжини дуги, зануренням стовпа в основний метал, збільшенням щільності струму та стабільності процесу зварювання. Підвищення стабільності та покращення формування швів при зменшенні вильоту характерно і для зварювання дротяним електродом [9,10]. Припускають,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

що це є наслідком утворення дуги, що обертається і збільшенням площі нагріву при певному відношенні вильоту і щільності струму або процесів у зварювальному контурі, з індуктивністю [9], що цілком можливо.

Одностороннє високошвидкісне зварювання складовим електродом проводиться під склоподібним флюсом дрібної грануляції АН-348АМ і ОСЦ-45М, що забезпечує збільшення тиску, концентрацію дуги і стабільність процесу. Склоподібний флюс використовується і у флюсовій подушці, що забезпечує якісне формування зворотного валика внаслідок збільшення щільності флюсу.

Значне зниження тиску дуги, при зварюванні складовим електродом, забезпечує якісне формування зовнішнього і зворотного валиків при односторонньому високошвидкісному зварюванні під склоподібними флюсами дрібної грануляції. При заміні пемзовидного флюсу АН-60 на склоподібний АН-348АМ або ОСЦ-45М формування швів покращується.

Формування зовнішнього шва покращується, внаслідок занурення дуги в основний метал, підвищення щільності струму, збільшення ефективності тепловкладення і зменшення спрямованого вниз магнітного тиску у бокових кромках ванни. Формування зворотного валика покращується, внаслідок збільшення щільності струму, підвищення саморегулювання дуги та стабільності процесу.

При зварюванні складовим електродом дрібний склоподібний флюс АН-348АМ або ОСЦ-45М забезпечує рівномірний по всій довжині кромки тиск флюсової подушки. Заміна пемзовидного на склоподібний флюс робить зварювання складовим електродом значно економічнішим за дводуговий процес, так як вартість склоподібного в 1,5 рази нижче пемзоподібного.

Дріт і стрічка, при зварюванні складовим електродом, подається з однаковою швидкістю, подача виробляється на стандартних, однодугових зварювальних автоматах з механізмом для подачі та профілювання електрода, який забезпечує вигин плоскої стрічки при подачі до U-подібної форми (рис. 1г).

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який, за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом з дроту та стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту у напрямку зварювання, дуга збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається. Площа, якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, одностороннє зварювання на флюсовій подушці, незалежно від зазору

Встановленні закономірності та розроблений спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання складовим електродом можуть бути використані при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, котлів залізничних цистерн і хребтових балок.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, які забезпечують підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

## ВИСНОВКИ

Енергія, яка вводиться дугою у зварювальну ванну, визначає тепловкладення, електричний опір, розтікання струму, магнітне поле і тиск, формування швів та ударну в'язкість зварних з'єднань. Згідно закону найменшого опору, дуга збуджується при закорочуванні чи в місці меншої відстані між електродами. Дуга прагне горіти при низькій напрузі, тому переміщається торцем електрода, струм тече шляхом найменшого опору. При

## Машинобудування і зварювальне виробництво

закороченні електрода на виріб, дуга збуджується, в результаті емісії електронів з поверхні катода.

При електродуговому зварюванні створюється магнітне поле дуги і струму, що тече виробом. Магнітне поле дуги створює пінч-ефект, що скорочує діаметр дуги до  $10^{-6}$  м, підвищує щільність струму до  $10^{11}$  А/м<sup>2</sup> і стабільність горіння дуги. Магнітне поле струму, що тече виробом, створює магнітне поле, під дією якого дуга відхиляється у бік меншого поля, протилежну струмопідводу, до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Підвищення швидкості зварювання обмежене утворенням підрізів, які є концентраторами напруг і знижують ударну в'язкість зварних з'єднань.

Розроблено електромагнітну теорію утворення підрізів, згідно з якою, при підвищенні швидкості зварювання підрізи утворюються під дією магнітного поля дуги, внаслідок посилення охолодження та зменшення діаметра дуги, підвищення індукції, магнітного тиску та посилення пінч-ефекту. Дуга концентрується, зменшується тепловкладення, знижується електричний опір та збільшується струм, що тече через бокові кромки ванни. В результаті зростає спрямований вниз магнітний тиск, під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

На основі електромагнітної теорії утворення підрізів, для поліпшення формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні, розроблено спосіб одностороннього зварювання складовим електродом, з дротом всередині  $U$ -подібної стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, в напрямку зварювання. На прямолінійних ділянках стрічки дуга переміщається торцем електрода, попереду дроту вздовж зварювальної ванни, збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що підвищує електричний опір, зменшує струм, спрямований вниз магнітний тиск у бокових кромках і запобігає утворення підрізів.

Розроблено математичну модель джерела тепла та зроблено розрахунок ізотерм плавлення, для чого складовий електрод представлений як складне джерело теплоти. Дуга, що горить в області дротяного електрода та забезпечує повне проплавлення при односторонньому зварюванні, є лінійним джерелом теплоти. Дуга, що горить на прямолінійних ділянках стрічки і проплавляє приблизно 30% товщини основного металу, відповідно до значень безрозмірних критеріїв є поверхневим джерелом кінцевої ширини. Складовий електрод можна уявити, як сукупність трьох джерел тепла: одного лінійного на осі та двох поверхневих кінцевої ширини у бокових кромках ванни.

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання, який за рахунок регулювання енергії і магнітного поля складовим електродом з дроту та стрічки, прямолінійні ділянки якої розташовуються попереду дроту, у напрямку зварювання, дуга збільшує тепловкладення в бокові кромки ванни, що запобігає утворенню підрізів. На дроті і прилеглих ділянках зігнутої стрічки утворюється дуга, що обертається.

Площа, якою переміщається дуга, збільшується, тиск дуги зменшується, що забезпечує якісне формування швів, незалежно від зазору в стику, збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань у 2 – 2,5 рази.

### Список використаних джерел

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму / Р.М.Уайт. - К.: Світ, 2002. - 306с.
2. Грановський В.Л. Електричний струм у газі. Встановлений струм / В. Л. Грановський. -К.: Наука, 2001. - 543с.
3. Фінкельбург В. Електричні дуги та термічна плазма / В. Фінкельбург, Г. Меккер. - К.: Наука., 1991. - 369 с.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

4. Кесаєв І.Г. Катодні процеси електричної дуги/ І.Г. Кесаєв. - К.: Наука, 1998. -244 с.
5. Рикалін Н.М. Розрахунок теплових процесів при зварюванні / Н.М. Рикалін. - К.: Машгіз, 2001. - 296 с.
6. Акулов А. І. Утримання рідкого металу зварювальної ванни поперечним магнітним полем / А.І. Акулов, А.М. Рибачук // Зварювальне виробництво.-2002. - № 2.- С. 3 - 4.
7. Чигарьов В.В. Розрахунок процесу поширення тепла при зварюванні змішаним електродом /В.В.Чигарьов, С.В.Щетинін //Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2001. – Вип.11. – С.175–177.
8. Гулаков С.В. Наплавлення під флюсом стрічковим електродом/С.В. Гулаков, В.М. Матвієнко, Б.І. Носовський. - Маріуполь, 2006. - 136с.
9. Акулов А.І. Граничні струми при зварюванні електродом, що плавиться /А.І.Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г. Чернишов // Изв. вишів. Машинобудування. - 1998. - №3. - С.132 - 137
10. Акулов А.І. Формуваннястикових швів при зварюванні в СО<sub>2</sub> в умовах технологічних збурень /А.І. Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г.Чернишов // Автоматичне зварювання. - 1999. - №12. - С.26 - 28.

Shchetynin S.V., Desyatskyi S.P.

### REGULATION OF ENERGY INPUT INTO THE WELD POOL DURING ONE-SIDED WELDING

*The energy introduced by the arc into the weld pool determines heat input, electrical resistance, current spreading, magnetic field and pressure, weld formation and the welded joints impact toughness. According to the law of least resistance, the arc is ignited by shorting or at the point of shortest distance between the electrodes. The arc tends to burn at minimum voltage, so it moves along the electrode tip. Current flows along the path of least resistance. When the electrode is shorted to the workpiece, the arc is ignited by electron emission from the cathode surface, ensuring charge regeneration.*

*During electric arc welding, a magnetic field is created by the arc and the current, flowing through the workpiece. The arc's magnetic field creates a pinch effect—arc compression under the influence of its own magnetic field—reducing the arc diameter to 10-6 m, increasing the current density to 1011 A/m<sup>2</sup>, and arc stability. The magnetic field of the current, flowing through the workpiece creates a transverse magnetic field, under the which the arc is deflected toward the side of the weaker field, opposite the current supply, until it breaks. Process stability and weld formation are disrupted. Increased welding speed is limited by the undercuts formation, which act as stress concentrators and reduce the welded joints impact toughness.*

*An electromagnetic theory of undercut formation has been developed, according to which, as welding speed increases, undercuts form under the influence of the arc's magnetic field, due to increased cooling and a decrease in arc diameter, increased induction, magnetic pressure, and a stronger pinch effect. The arc concentrates, heat input decreases, electrical resistance decreases, and current through the side edges of the weld pool increases. This results in increased downward magnetic pressure, causing liquid metal to flow from the weld pool edges, leading to undercut formation.*

*Based on the electromagnetic theory of undercut formation, a method for one-sided welding with a composite electrode has been developed to improve weld formation during one-sided welding by regulating energy and the magnetic field. This method consists of a wire inside a U-shaped strip, the straight sections of which are located ahead of the wire in the welding direction. On the straight sections of the strip, the arc moves along the end of the electrode ahead of the wire along the weld*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*pool, increasing heat input into the pool side edges. This increases electrical resistance, reduces current flow, and creates downward magnetic pressure in the area of the side edges, preventing undercut formation.*

*A mathematical model of the heat source was developed, representing the composite electrode as a complex heat source. The arc burning in the area of the wire electrode and ensuring complete penetration during single-sided welding is a linear heat source. An arc burning in the straight sections of the strip and melting approximately 30% of the base metal thickness is, according to the dimensionless criteria, a surface heat source of finite width. The composite electrode can be represented as a combination of three heat sources: one linear heat source along the axis and two surface heat sources of finite width at the weld pool side edges.*

*A method for one-sided high-speed welding has been developed by regulating the energy and magnetic field with a composite electrode consisting of a wire inside a U-shaped strip. The straight sections of the strip are positioned ahead of the wire in the welding direction. The arc increases heat input into the weld pool side edges, preventing undercuts. A rotating arc is formed on the wire and adjacent sections of the curved strip according to the law of least resistance. The arc's travel area increases, and the arc pressure decreases, ensuring high-quality weld formation one-sided flux-bed welding, regardless of the welding gap in the joint and an increase in the welded joints impact toughness by 2–2.5 times.*

**Keywords:** *the one-sided high-speed composite electrode welding, mathematical model of the heat source, undercut, welded joints impact toughness.*

*Стаття надійшла 04.03.2026р.*

*Стаття прийнята 09.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.052.004.64.

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359289](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359289)

Захарова І.В., Спесівцев Я.І

## ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ ДЕТАЛЕЙ ТЕПЛОВИЗНИХ ДИЗЕЛІВ ШЛЯХОМ УДОСКОНАЛЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ВІДНОВЛЕННЯ В УМОВАХ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ

*Одним із основних напрямів розвитку сучасного тепловозобудування є підвищення рівня форсування теплових дизелів, що дає змогу зменшити їх масу та габарити, а також підвищити економічність за рахунок зростання механічного коефіцієнта корисної дії. У зв'язку з цим дедалі більш актуальним стає питання надійності, оскільки підвищення рівня форсування дизеля об'єктивно призводить до її зниження.*

*На вітчизняних тепловозах у даний час встановлюються дизелі типу Д49, форсовані за ефективним тиском до рівня близько 2,0 МПа. У високофорсованих дизелях цього типу спостерігається значна теплова напруженість деталей циліндро-поршневої групи, надійність якої значною мірою визначає загальну надійність дизеля.*

*Зокрема, одними з найменш довговічних і водночас дороговартісних вузлів залишаються кришки циліндрів, основною несправністю яких є тріщини вогневого днища. Їх виникнення зумовлене дією високих температурних градієнтів, циклічних термомеханічних навантажень, концентрацією напружень у зонах клапанів і форсунок, а також процесами термічної втоми та релаксації напружень.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

У сучасних умовах відновлення України питання підвищення надійності та ресурсу таких вузлів набуває особливої актуальності. Це пов'язано з необхідністю забезпечення безперебійної роботи транспортної інфраструктури, зокрема залізничного транспорту, який відіграє ключову роль у перевезенні вантажів, матеріалів і техніки. Водночас виготовлення нових кришок циліндрів є складним і дорогим процесом, що потребує значних матеріальних і енергетичних ресурсів.

У зв'язку з цим значного практичного значення набуває розробка та впровадження ефективних технологій відновлення деталей, які дозволяють істотно знизити витрати, скоротити терміни ремонту та підвищити експлуатаційний ресурс вузлів.

Доцільним є застосування сучасних методів моделювання напружено-деформованого стану, оптимізація теплових режимів роботи, а також впровадження ефективних технологій відновлення, зокрема наплавлення, електродугового напилення термостійкими матеріалами для ремонту зазначеної конструкції.

Таким чином, підвищення довговічності кришок циліндрів є не лише технічним, а й важливим економічним і стратегічним завданням у контексті відновлення промислового потенціалу України.

**Ключові слова:** тепловозний дизель, відновлення, електродугове напилення, надійність, ресурс, металізаційне покриття.

**Постановка проблеми:** Кришка циліндра працює в умовах складного циклічного термомеханічного навантаження, де одночасно діють гістерезисні процеси (циклічна пластичність); релаксація напружень; ефект Баушингера; малоциклова втома. Саме ці процеси визначають довговічність деталі, характер руйнування, необхідність відновлення (зварювання, наплавлення, напилення).

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

Встановлено, що основним пошкоджувальним фактором для кришок циліндрів є термічні напруження, тоді як монтажні зусилля та зусилля від тиску газів мають незначний вплив на напружений стан їхніх вогневих днищ [1,3,4].

У високофорсованих дизелях робота матеріалів деталей циліндро-поршневої групи в умовах циклічного навантаження відбувається в реологічних умовах, тобто в умовах:

- циклічного пластичного деформування;
- циклічної релаксації напружень.

Такі умови зумовлені значними тепловими навантаженнями, що виникають у процесі роботи двигуна.

Унаслідок цього в матеріалі відбувається накопичення залишкових напружень, які є основною причиною руйнування деталей циліндро-поршневої групи.

Свою чергою, циклічна зміна напружень і повторювані пластичні деформації призводять до розвитку малоциклової втоми матеріалу, що є характерним механізмом руйнування для теплонапружених елементів, зокрема кришок циліндрів.

Разом з тим встановлено, що у випадку прикладання до конструкції циклічних навантажень, які перевищують межу текучості, але не виходять за межі поверхні текучості, від циклу до циклу внаслідок пластичної деформації відбувається зміцнення матеріалу [4].

У результаті цього процесу матеріал переходить до роботи переважно в області пружних деформацій, тобто відбувається його адаптація до повторних навантажень.

Зміцнення супроводжується зміщенням кривої деформування матеріалу в координатах «напруження–деформація», що приводить до зміни:

- межі текучості;
- межі міцності матеріалу.

Дане явище відоме як ефект Баушингера.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Водночас характер і ступінь цього ефекту значною мірою залежать від передісторії навантаження, а саме:

- амплітуди навантажень;
- їх знакоперемінності;
- рівня пластичних деформацій у початкових циклах.

Графічно процес циклічного деформування описується залежністю «напруження–деформація», яка має вигляд гістерезисної петлі.

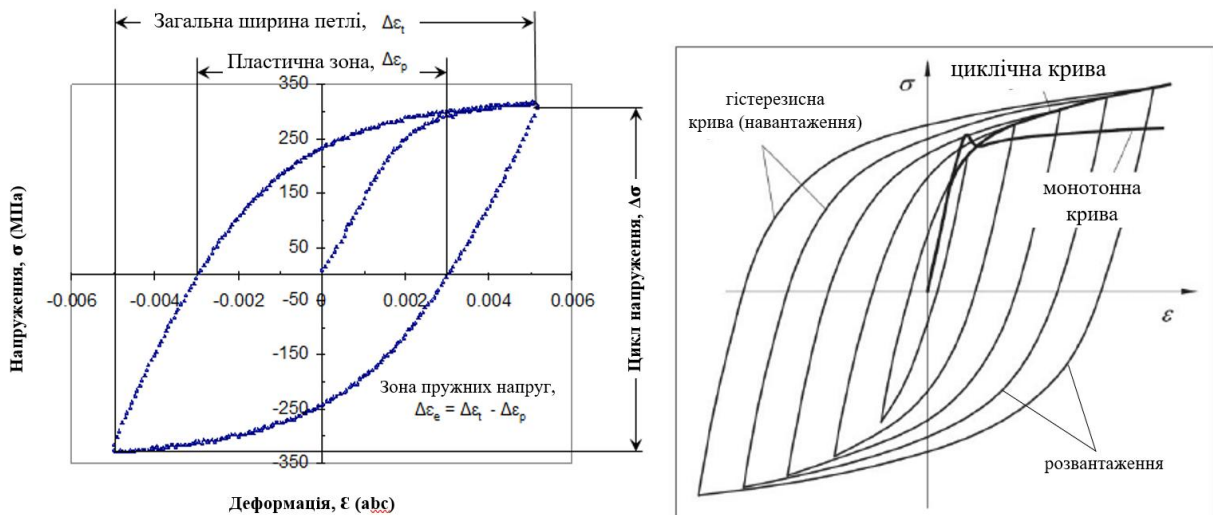


Рисунок – Гістерезисна петля

Гістерезисна петля відображає енергетичні та деформаційні процеси в матеріалі:

- її ширина характеризує величину пластичної деформації;
- площа петлі відповідає енергії, що розсіюється за цикл;
- зміщення петлі свідчить про накопичення залишкових деформацій і напружень.

У процесі багаторазового циклічного навантаження відбуваються такі стадії:

1. Початкова пружно-пластична деформація;
2. Стабілізація циклічного процесу;
3. Накопичення пошкоджень (мікротріщин);
4. Руйнування матеріалу.

Для кришок циліндрів дизелів ці процеси обумовлені періодичними змінами температури та тиску, що призводить до чергування розширення і стискання матеріалу.

Таким чином, основним механізмом руйнування кришок циліндрів є малоциклова термічна втома, яка формується внаслідок:

- високих температурних градієнтів;
- циклічного пластичного деформування;
- накопичення залишкових напружень;
- структурних змін у матеріалі.

Різними авторами досліджувалися окремі фактори, що впливають на інтенсивність процесу релаксації напружень [2,6].

До основних факторів належать:

- тривалість циклу навантаження;
- температура циклу;
- початкове напруження циклу.

Для процесу релаксації напружень характерна наявність двох періодів.

Машинобудування і зварювальне виробництво

Перший період характеризується різкою зміною напружень, незначною тривалістю. Другий період характеризується відносною сталістю процесу, мінімальною швидкістю релаксації напружень.

При цьому тривалість першого періоду релаксації, порівняно з другим, є дуже малою.

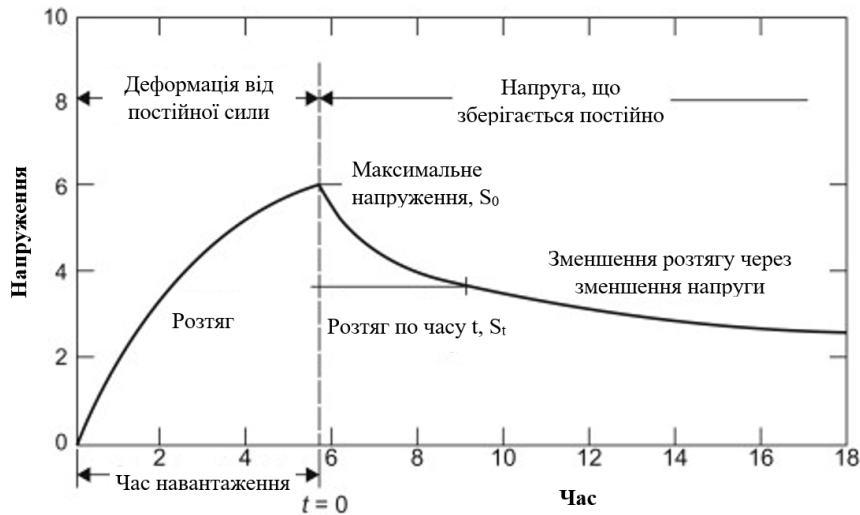


Рисунок 2 – Крива релаксації напружень

**Мета дослідження.** Метою роботи є обґрунтування способу відновлення (ремонт) та підвищення надійності деталей тепловозних дизелів шляхом удосконалення технологій.

**Основний матеріал дослідження** При розробці технології відновлення кришок циліндрів дизелів необхідно враховувати, що кожен робочий цикл двигуна супроводжується циклічним термічним навантаженням, яке обумовлює складний напружено-деформований стан матеріалу. У процесі експлуатації в деталях виникають пластичні деформації, відбувається релаксація напружень, а також реалізується повторне навантаження, що має циклічний характер.

Обрана технологія має забезпечити: відновлення міцності, відновлення герметичності, відновлення геометричних розмірів, відновлення посадочних місць, збереження структури матеріалу, мінімізацію залишкових напружень, недопущення нових тріщин після ремонту.

Перспективним напрямом зниження втрат є покращення властивостей поверхні, що контактує із зовнішнім середовищем. Результати наукових досліджень і практичних розробок показують, що це може збільшити строк служби виробів у 2–3 рази.

У цьому напрямі інтенсивно розвивається група методів газотермічного напилення (ГТН) покриттів. До них належать газополуменеве, плазмове, детонаційне напилення, а також електродугова металізація (ЕДМ). При ГТН поверхня деталі, на яку наноситься покриття, залишається у твердому стані. Внаслідок цієї особливості для процесів ГТН характерні малі теплові деформації і, у багатьох випадках, відсутність структурних змін у деталі. Крім того, тут незначні обмеження щодо складу напилюваних матеріалів. Усе це зумовлює привабливість методів ГТН для покращення експлуатаційних характеристик виробів.

Із способів нанесення газотермічних покриттів перспективним є вивчення процесу електродугової металізації (ЕДМ), який виглядає більш доцільним порівняно з іншими способами за тепловою ефективністю, вартістю напилюваних матеріалів та простотою обслуговування. Техніко-економічна оцінка показує, що за відносною вартістю ЕДМ-покриття у 3–10 разів дешевші за покриття, отримані іншими способами газотермічного напилення, при забезпеченні їх високої міцності (рис. 3).

Машинобудування і зварювальне виробництво

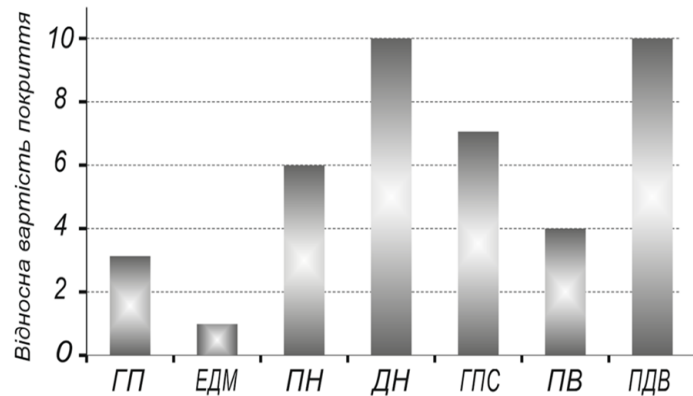


Рисунок 3 – Відносна вартість покриттів, нанесених різними методами напильнення: ДП – газополуменеве напильювання; ЕДМ – електродугова металізація; ПН – полум'яне на відкритому повітрі; ДН – детонаційне напильнення; ГПС – газополуменеве надзвукове; ПВ – полум'яне високошвидкісне; ПДВ – плазмове напильнення в динамічному вакуумі.

При ЕДМ покриття формується з крапель рідкого металу, що рухаються у струмені транспортуючого газу. Нагрівання та плавлення напильюваного металу відбувається за рахунок тепла електричної дуги, яка горить між витратними дротами-електродами, з яких і утворюється напильюваний матеріал. Рідкий метал здувається з торців електродів, подрібнюється під дією газодинамічних та електромагнітних сил і у вигляді крапель рухається у напрямку дії цих сил [7].

Видно, що для ЕДМ характерні риси як газотермічного напильнення (ГТН), так і дугового зварювання. Спільним із ГТН є використання високошвидкісного газового струменя з великою масовою витратою, призначеного для формування та транспортування потоку напильюваних крапель.

В якості ресурсозберігаючих технологій у наш час має місце застосування порошкових дротів, які дозволяють значно розширити діапазон хімічного складу покриттів при дуговому напильненні.

Проведений аналіз дозволив встановити, що для отримання зносостійких покриттів газотермічним напильненням широко використовуються порошки з легованих сталей і сплавів на основі нікелю, кобальту, молібдену і ін., а також композиційні матеріали, що складаються з вищезазначених сталей, карбідів металів, боридів і нітридів (рис.4)[8].

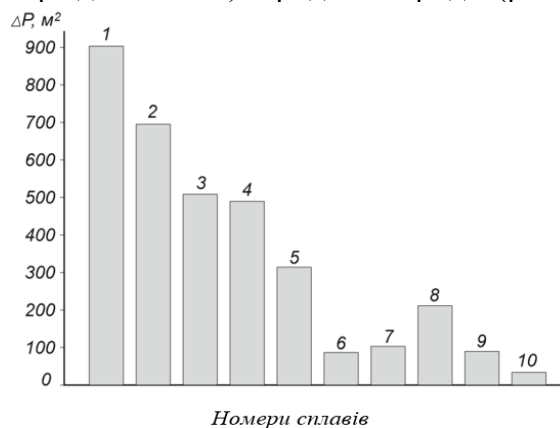


Рисунок 4 – Знос металізаційних покриттів за даними [9]: 1 – низьковуглецева сталь; 2 – корозійностійка сталь типу 18-8 з вмістом молібдену; 3 – хромомолібденова сталь; 4 – стелліт № 66; 5 – стелліт №33; 6 – стелліт №11; 7 – сплав на хромонікелевої основі, 8 – колмоной № 4; 9 – колмоной № 5; 10 – колмоной № 6

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Для отримання зносостійких покриттів застосовують карбіди кремнію, титану та вольфраму. Найбільш широкого застосування отримав карбід вольфраму. Знаходять застосування матеріали, що забезпечують низький коефіцієнт тертя металевих пар композиції нікель-графіт, керамічні матеріали. Для отримання покриттів із зазначених матеріалів, як правило, застосовують полум'яне або детонаційне напилення. Тому що при дуговому напиленні має місце вигорання багато коштуючих компонентів порошкових дротів під дією кисню розпилювального повітря.

На підставі розрахунків і з урахуванням висловлених передумов була запропонована серія складів порошкових дротів, що містять обґрунтовані вище компоненти і складаються з ферохрому, алюмінієвого порошку, фтористого кальцію, гематиту, залізного порошку (табл. 1.).

Таблиця 1 - Склади порошкових електродів

№ варіантів	Відсотковий склад компонентів				
	залізний порошок	Алюміній <i>Al</i>	<i>Fe Cr</i>	фтористий кальцій	ст. оболонка
1	19	5,0	5,0	1,0	зал.
2	22	8,0	7,0	2,0	зал.
3	20,5	6,5	6,0	1,5	зал.
4	17	3,0	4,0	0,5	зал.
5	23	10,0	8,0	2,5	зал.

### ВИСНОВКИ

У роботі розглянуто умови експлуатації кришок циліндрів тепловозних дизелів, особливості їх напружено-деформованого стану та фактори, що визначають довговічність і надійність.

Встановлено, що основним чинником пошкодження кришок циліндрів є термічні напруження, які виникають унаслідок високих температурних градієнтів та циклічного характеру навантаження. Показано, що кожен робочий цикл дизеля супроводжується термомеханічними процесами, які включають пластичне деформування, релаксацію напружень і повторне навантаження.

Доведено, що дія циклічних навантажень призводить до накопичення залишкових напружень, структурних змін матеріалу та розвитку малоциклової втоми, яка є основним механізмом руйнування кришок циліндрів. Визначено, що найбільш небезпечними зонами є ділянки біля форсунки та випускного клапана, де спостерігається концентрація напружень і максимальні температури.

Обґрунтовано доцільність застосування сучасних технологій відновлення – електродугової металізації - яка дозволяє підвищити довговічність кришок циліндрів, зменшити витрати на ремонт і забезпечити повторне використання дороговартісних деталей.

Показано, що в умовах відновлення України підвищення надійності та ресурсу деталей тепловозних дизелів має важливе економічне та стратегічне значення, оскільки дозволяє забезпечити стабільну роботу транспортної інфраструктури та знизити залежність від виготовлення нових комплектуючих.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

### Список використаних джерел

1. Okenyi, V., et al. (2025). Submerged arc welding of S355G10+M steel: Analyzing strength, distortion, residual stresses, and fatigue. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. <https://doi.org/10.1111/ffe.70010>
2. Chen, F., et al. (2025). Assessment of fatigue crack propagation and lifetime considering welding residual stress relaxation. *International Journal of Fatigue*. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2025.107XXXX>
3. Liang, Y., et al. (2025). Influence of welding residual stress on fatigue behavior of titanium alloy. *Crystals*, 15(3), 230. <https://doi.org/10.3390/cryst15030230>
4. Schubnell, J., et al. (2025). Data-driven fatigue assessment of welded steel joints based on transfer learning. *Welding in the World*. <https://doi.org/10.1007/s40194-025-01967-x>
5. Xia, Y., et al. (2023). Re-distribution of welding residual stress in fatigue process of welded joints. *Journal of Marine Science and Engineering*, 11(12), 2378. <https://doi.org/10.3390/jmse11122378>
6. Saputro, M. G., et al. (2024). Residual stress effect on fatigue behavior of welded steel. *Procedia Engineering*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.05.117>
7. Royanov V., Development of properties of spray flow and nature of pressure distribution in electric arc metallization / V Royanov, I Zakharova E. Lavrova // *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies* - 8 p. - 6/5 (90 ) - 2017 - pp. 18-24
8. Похмурский В. И., Студент М. М., Довгуньк В. М. и др. Порошковые проволоки систем FeCrB+Al и FeCrB+Al+C для электродуговой металлизации // *Автоматическая сварка*. - 2002. - № 3. - С. 32-35
9. Борисова А. Л., И. В. Миц, Т. В. Кайда и др. Структура и свойства покрытий на основе феррохрома и феррохромалюминия, полученных элек-тродуговой металлизацией из порошковых проволок // *Автоматическая сварка*. - 1995. - № 6. - С. 3-6.

**Zakharova I.V., Spesivtsev Ya.I.**

## **ENHANCING THE RELIABILITY OF LOCOMOTIVE DIESEL ENGINE COMPONENTS THROUGH THE IMPROVEMENT OF RESTORATION TECHNOLOGIES UNDER THE CONDITIONS OF UKRAINE'S RECONSTRUCTION**

*One of the main directions in the development of modern locomotive engineering is the increase in the boosting level of locomotive diesel engines, which makes it possible to reduce their weight and dimensions, as well as to improve efficiency due to an increase in the mechanical efficiency coefficient. In this regard, the issue of reliability becomes increasingly relevant, since increasing the boosting level of a diesel engine objectively leads to its reduction.*

*At present, domestic locomotives are equipped with D49-type diesel engines, boosted in terms of effective pressure to a level of about 2.0 MPa. In highly boosted diesel engines of this type, significant thermal stress is observed in the components of the cylinder-piston group, the reliability of which largely determines the overall reliability of the diesel engine.*

*In particular, cylinder heads remain among the least durable and at the same time the most expensive components, with the main failure mode being cracks in the fire deck. Their occurrence is caused by the action of high temperature gradients, cyclic thermomechanical loads, stress concentration in the areas of valves and the injector, as well as processes of thermal fatigue and stress relaxation.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*Under modern conditions of Ukraine's recovery, the issue of increasing the reliability and service life of such components is of particular importance. This is associated with the need to ensure the uninterrupted operation of transport infrastructure, in particular railway transport, which plays a key role in the transportation of goods, materials, and equipment. At the same time, the manufacture of new cylinder heads is a complex and costly process that requires significant material and energy resources.*

*In this regard, the development and implementation of effective repair technologies for component restoration are of great practical importance, as they allow significant cost reduction, shorter repair times, and increased service life of units.*

*It is advisable to apply modern methods for modeling the stress-strain state, optimizing thermal operating conditions, as well as implementing effective restoration technologies, in particular cladding, electric arc spraying with heat-resistant materials for repairing the specified structure.*

*Thus, increasing the durability of cylinder heads is not only a technical issue but also an important economic and strategic task in the context of restoring Ukraine's industrial potential.*

**Keywords:** *locomotive diesel engine, restoration, electric arc spraying, reliability, service life, metallization coating.*

*Стаття надійшла 12.03.2026р.*

*Стаття прийнята 16.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359298](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359298)

Щетиніна В.І., Воленко І.В.

### ФРЕТТІНГ-КОРОЗІЯ ОПОРНОГО ВАЛКА І ВТУЛКИ-ЦАПФИ

*Природа міжатомних зв'язків електромагнітна. Електрони, що обертаються навколо ядра, створюють мікротоки, напрямок яких в сусідніх атомів однаковий. Мікроструми створюють магнітні поля протилежних напрямків, які взаємно знищуються, поле стає рівним нулю, атоми рухаються в сторону меншого магнітного поля і виникають міжатомні зв'язки, які при зменшенні міжатомної відстані зростають. При протіканні по пластинках постійного струму однакового напрямку, пластини притягуються, що підтверджує електромагнітну природу міжатомних зв'язків. При протіканні по пластинках струмів протилежних напрямків, пластини відштовхуються, що попереджує фреттінг-корозію.*

*Фреттінг-корозія – процес зварювання контактуючих металевих поверхонь, під дією високих питомих тисків і зсувів, що забезпечує зближення атомів, видалення оксидів, орієнтацію мікрострумів однакового напрямку сусідніх атомів, створення магнітних полів протилежних напрямків, взаємне знищення індукції між атомами, виникнення магнітного тиску тяжіння, скорочення міжатомних відстаней та підвищення міжатомних зв'язків. Для попередження фреттінг-корозії, розроблено спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують, з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, що створює магнітний тиск відштовхування і попереджує фреттінг-корозію. Зі зменшенням відстані між атомами контактуючих поверхонь, під дією високих питомих тисків, під час прокатки металу, індукція зростає та в квадратичній залежності зростає магнітний тиск.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

При електромагнітній обробці вся поверхня розбивається на ділянки, рівні площі магнітопроводу, що концентрує та підвищує магнітну енергію. Зі зростанням перерізу зростає магнітний потік і намагнічування, тому, для підвищення магнітного тиску, необхідно збільшувати перетин магнітопроводу. У процесі електромагнітного намагнічування, при протіканні струму в середині, магнітопровід притягується до поверхні, що обробляється. Спини електронів оброблюваної поверхні орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля, створюваного струмом, що забезпечує намагнічування оброблюваних поверхонь. Збільшення магнітного поля та намагнічування забезпечується за рахунок концентрації магнітного поля, за допомогою магнітопроводу, зменшення зазору, площі електромагнітного тиску розташування магнітопроводу на початку під гострим кутом. Магнітопровід забезпечує замикання силових ліній поля у феромагнетику, зниження магнітного опору та збільшення індукції поля. Зменшення площі підвищує індукцію, електромагнітний тиск і посилює намагнічування оброблюваної поверхні.

Магнітне поле посилюється, при зменшенні зазору в магнітопроводі та магнітного опору, тому поверхня виконана по контуру оброблюваної деталі. Для обробки шийок опорного валка, поверхня магнітопроводу виконана увігнутою, а для обробки втулок-цапф – опуклою. Особливо зростає індукція та магнітний тиск, при розташуванні магнітопроводу на оброблюваній поверхні під гострим кутом. При цьому, контакт магнітопроводу з оброблюваною поверхнею здійснюється лише на початку. При включенні струму та створенні магнітного поля, силові лінії концентруються у місці контакту магнітопроводу з оброблюваною поверхнею. В результаті, різко зростає індукція магнітного поля та намагнічування поверхні. При цьому, упор, що утримує другий кінець магнітопроводу, під дією струму видаляється, і магнітопровід притягується до поверхні, що оброблюється, точка контакту і максимум індукції магнітного поля переміщуються вздовж оброблюваної поверхні. Після обробки однієї ділянки, деталь повертається на ширину магнітопроводу і проводиться обробка наступної ділянки всієї поверхні.

Розроблено, спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують, з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, що створює магнітний тиск відштовхування, який при прокатці, під дією високих питомих тисків концентрує магнітну енергію, посилює поле і попереджує фреттінг-корозію, що забезпечує зниження трудомісткості та собівартості металу.

**Ключові слова:** фреттінг-корозія, опорний валок, втулка-цапфа, електромагнітна природа, магнітна енергія, контактуючі поверхні намагнічують з протилежним напрямком магнітних полів, відштовхування, магнітопровід під гострим кутом, концентрація магнітної енергії, магнітний тиск.

**Постановка проблеми.** Фреттінг-корозія контактуючих металевих поверхонь, під дією високих питомих тисків і зсувів при прокатуванні товстого металу, призводить до утруднення зняття втулки-цапфи з опорного валка, за допомогою гідропресу. Тому, розробка способу запобігання фреттінг-корозії є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Фреттінг-корозія опорного валка і втулки-цапфи в умовах прокатного виробництва відрізняється від найбільш відомих видів. Прокатка товстого металу проводиться при значних питомих тисках, що зближує атоми контактуючих поверхонь на міжатомну відстань. При цьому, зростають міжатомні зв'язки і втулка-цапфа зварюється з опорним валком. Однак, фреттінг-корозію опорного валка і втулки-цапфи досліджено недостатньо [1-7].

**Мета досліджень.** Дослідження фреттінг-корозії контактуючих металевих поверхонь і розробка способу запобігання фреттінг-корозії при прокатуванні металу.

**Основний матеріал дослідження.** Магнітне поле при протіканні струму провідником,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

вивчено Р.М.Уайтом[1] на високому науковому рівні. Природа міжатомних зв'язків електромагнітна [2]. Електрони, що обертаються навколо ядра, створюють мікроструми, напрямок яких в сусідніх атомах однаковий. Мікроструми створюють магнітні поля протилежних напрямків, які взаємно знищуються, поле стає рівним нулю, атоми рухаються в сторону меншого магнітного поля і виникають міжатомні зв'язки, які при зменшенні міжатомної відстані зростають.

На основі дослідження магнітного поля і кінозйомки встановлено, що при протіканні пластинами  $(8 \times 120 \times 900) \cdot 10^{-3}$  м постійного струму однакового напрямку пластини притягуються, що підтверджує електромагнітну природу міжатомних зв'язків.. При протіканні пластинами струмів протилежних напрямків, пластини відштовхуються, що попереджує фреттінг-корозію.

Фреттінг-корозія – процес зварювання контактуючих металевих поверхонь під дією високих питомих тисків і зсувів, що забезпечує зближення атомів, видалення оксидів, орієнтацію мікрострумів однакового напрямку сусідніх атомів, створення магнітних полів протилежних напрямків, взаємне знищення індукції між атомами, виникнення магнітного тиску тяжіння, скорочення міжатомних відстаней та підвищення міжатомних зв'язків. В результаті фреттінг-корозії втулка-цапфа зварюється з конічною шийкою опорного валка і важко зняти втулку-цапфу за допомогою гідропреса. На поверхні залишаються сліди розриву міжатомних зв'язків, які зачищаються шліфмашинкою, що є трудомісткою операцією і посилює фреттінг-корозію, внаслідок нерівності поверхонь. Розбирання опорного валка необхідне для наплавлення та повного видалення тріщин з поверхні перед наплавленням.

Для запобігання прогину та поломок чавунних робочих валків, прокатка металу проводиться з опорними валками (рис.1), що зазнають значних тисків: метал – метал.

Бандажований опорний валок стану 3000 – циліндрична конструкція, що складається з осі і бандажа, одягнутого з натягом, за рахунок нагрівання і збільшення діаметра бандажа. При охолодженні, діаметр бандажа зменшується, що призводить до виникнення власної напруги і обмежує зварювальні напруги. Діаметр бочки бандажованого опорного валка 2100 мм, мінімально допустимий діаметр 1950 мм, діаметр вісі 1595 мм, довжина бочки 2980 мм, загальна довжина 8350 мм і маса 120 Т .

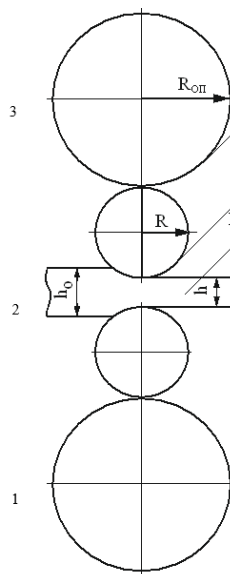


Рисунок 1 – Процес прокатки товстого листа товщиною до 30 мм  
де 1 – опорний валок; 2 – робочий валок; 3 – метал, що прокочується

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Опорні валки експлуатуються в складному напруженому стані, викликаного спільним впливом залишкових напружень, теплових навантажень і крутного моменту.

Відповідно до закону Біо-Сав'яру, індукція магнітного поля, що представляє концентричні кола навколо струму,  $B$  прямо пропорційна струму  $I$  і обернено пропорційна відстані  $R$  від струму [3]:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}$$

Тиск магнітного поля прямо пропорційний квадрату струму, індукції  $B$  та обернено пропорційний магнітній проникності ферромагнетика  $\mu$  [3]:

$$P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu} \text{ Па},$$

Індукція визначає тиск магнітного поля і в значній мірі процес намагнічування.

Для дослідження магнітного поля струму, що тече виробом, розроблено методику, згідно якої до виробу підводяться струмоведучі кабелі. В зазорі стику розміщується зонд тесламетра. Пластинами пропускається струм, проводяться вимірювання індукції магнітного поля тесламетром EM4305. Розміри датчика Холла, діаметром  $1 \cdot 10^{-3}$  м і зонда  $1 \times 5 \times 80 \cdot 10^{-3}$  м, дозволяють вимірювати величину і розподіл індукції в зазорі стику. Зонд встановлюється таким чином, щоб силові лінії магнітного поля входили в датчик. Напрямок силових ліній магнітного поля визначається за правилом буравчика, з урахуванням напрямку струму від плюса до мінусу.

При дослідженні магнітного поля, за допомогою залізного порошка, який насипається на ватман рівним шаром, при протіканні струму в магнітопроводі, залізний порошок орієнтується вздовж силових ліній магнітного поля, які виходять на поверхню і піднімаються над поверхнею, забезпечує намагнічення і попередження фреттінг-корозії. Напрямок намагнічування визначається напрямком струму, що тече в магнітопроводі, та повинен бути протилежним, при намагнічуванні опорного валка і втулки-цапфи.

Для попередження фреттінг-корозії, розроблено спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, що створює магнітний тиск відштовхування і попереджує фреттінг-корозію. Зі зменшенням відстані між атомами контактуючих поверхонь, під дією високих питомих тисків при прокатці металу, індукція зростає та в квадратичній залежності підвищується відштовхування.

Силові лінії магнітного поля, прагнучі пройти шляхом найменшого опору, замикаються в магнітопроводі з електротехнічної сталі, з низьким магнітним опором. Проведені дослідження магнітного поля дозволили встановити, що найбільш ефективно зростання індукції, при розташуванні струмоведучого елемента в середині магнітопровода, коли всі силові лінії магнітного поля, концентруються в ферромагнетик, та індукція поля зростає.

При електромагнітній обробці вся поверхня розбивається на ділянки, рівні площі магнітопроводу, що концентрує та підвищує магнітну енергію. Ширина магнітопроводу визначається перерізом електротехнічної сталі та шириною паза. Зі зростанням перерізу, зростає магнітний потік і намагнічування, тому, для підвищення магнітного тиску, необхідно збільшувати перетин магнітопроводу.

У процесі електромагнітного намагнічування, при протіканні струму всередині, магнітопровід притягується до поверхні, що обробляється. Спини електронів поверхні, що обробляється, орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля, створеного струмом, що забезпечує намагнічування оброблюваних поверхонь. Збільшення магнітного поля та намагнічування забезпечується за рахунок підвищення струму, концентрації магнітного поля,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

за допомогою магнітопроводу, зменшення зазору, площі електромагнітного тиску розташування магнітопроводу на початку, під гострим кутом.

Магнітопровід забезпечує замикання силових ліній поля у феромагнетику, зниження магнітного опору та збільшення індукції поля. Зменшення площі підвищує індукцію, електромагнітний тиск і посилює намагнічування оброблюваної поверхні. Магнітне поле посилюється при зменшенні зазору в магнітопроводі та магнітного опору, тому поверхня виконана по контуру оброблюваної деталі. Для обробки шийок опорного валка, поверхня магнітопроводу виконана увігнутою, а для обробки втулок-цапф опуклою.

Для збільшення індукції магнітного поля при намагнічуванні, необхідно використовувати мідні шини, які забезпечують максимальне наближення до поверхні, що обробляється. При протіканні струму провідником, індукція на осі провідника зі струмом максимальна, так як електрони струму, що рухаються, відкидають і орієнтують спини електронів на поверхні в напрямку, що визначається за правилом буравчика. Це впливає з електромагнітної природи міжатомних зв'язків, які виникають на міжатомній відстані і створюються електронами, що рухаються навколо ядра. Зі зменшенням відстані, індукція магнітного поля зростає. Особливо посилюється магнітне поле при зближенні атомів на міжатомну відстань, під дією контактних тисків в області поверхонь втулки-цапфи і опорного валка. При електромагнітній обробці, це дозволяє забезпечити виникнення максимального тиску відштовхування і запобігти фреттінг-корозію втулки-цапфи і опорного валка.

Встановлено, що індукція та магнітний тиск зростають, при розташуванні магнітопроводу на оброблюваній поверхні під гострим кутом. При цьому, контакт магнітопроводу з оброблюваною поверхнею здійснюється лише на початку. При включенні струму та створенні магнітного поля, силові лінії концентруються у місці контакту магнітопроводу з оброблюваною поверхнею. В результаті, різко зростає індукція магнітного поля та намагнічування поверхні. При цьому, упор, що утримує другий кінець магнітопроводу, під дією струму видаляється і магнітопровід притягується до поверхні, що оброблюється, точка контакту і максимум індукції магнітного поля переміщуються вздовж оброблюваної поверхні. Після обробки однієї ділянки, деталь повертається на ширину магнітопроводу і проводиться обробка наступної ділянки всієї поверхні.

Розроблено, заснований на квантових процесах взаємодії атомів, спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують, з протилежним напрямком силових ліній магнітних полів, що створює магнітний тиск відштовхування, який в процесі прокатки, під дією високих питомих тисків, зменшення площі оброблювальної поверхні та магнітопроводу, розташованого під гострим кутом, концентрує магнітну енергію, посилює поле і попереджує фреттінг-корозію, що забезпечує зниження трудомісткості та собівартості метала.

Основна закономірність тиску зварювальної дуги, яка характерна для всіх процесів, зі зменшенням площі тиск зростає, призводить до зварювання втулки-цапфи з опорним валком, утворенню фреттінг-корозії та проблемам зняття втулки-цапфи з опорного валка на гідропресі.

Ефективність концентрації доказана при збільшенні магнітного поля для намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка і втулки-цапфи. Для намагнічування валка рекомендується, створити виток навколо і пропустити струм. Однак, магнітне поле при цьому не забезпечує намагнічування поверхні опорного валка.

Для намагнічування контактуючих поверхонь опорного валка і втулки-цапфи використовується магнітопровід з електротехнічної сталі, перетином  $50 \times 120 \times 120 \times 245 \times 10^{-3}$  м, з шириною паза 0,02 м і глибиною 0,052 м, який забезпечує розташування струму в середині магнітопроводу з високою магнітною проникністю, замикання силових ліній поля у

## Машинобудування і зварювальне виробництво

феромагнетику, зниження магнітного опору та збільшення індукції поля. При електромагнітній обробці вся поверхня розбивається на ділянки  $0,12 \times 0,245$  м, що забезпечує зменшення площі і збільшення магнітного тиску відштовхування.

Магнітопровід, зі струмоведучим елементом з мідного кабеля чи мідної шини, підводиться до оброблювальної поверхні. По струмоведучому елементу пропускається постійний струм величиною 5000 А, протягом 3-х секунд. При протіканні струму всередині, магнітопровід притягується до оброблювальної поверхні. Спини електронів оброблювальної поверхні орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля, створеного струмом, що забезпечує намагнічування оброблювальних поверхонь.

Після обробки однієї ділянки, магнітопровід відводиться від намагнічуваної поверхні, валок повертається на 0,12 м. Магнітопровід підводиться до оброблювальної поверхні та пропускається струм. Процес повторюється до повної обробки всієї поверхні опорного валка. Аналогічно проводиться обробка поверхні втулки-цапфи. При намагнічуванні поверхонь опорного валка і втулок-цапф напрямки силових ліній магнітного поля повинні бути протилежними, що забезпечує виникнення магнітного тиску відштовхування, під дією якого відштовхуються атоми контактуючих поверхонь і попереджує фреттінг-корозію.

Намагнічування поверхні шийок опорного валка проводиться на вальцетокарному станку важкого типу КЖ-1675-Ф1, на супорті якого встановлено магнітопровід. Електротехнічна сталь магнітопровода, що використовується для обробки поверхонь конічних шийок опорного валка, має вгнуту поверхню, виконану по радіусу шийок. Перед обробкою проводиться розмітка поверхні конічних шийок по периметру, в області більшого діаметра та по довжині. Розмітка проводиться крейдою, шляхом обертання опорного валка. По периметру розмітка проводиться з шириною, рівною ширині магнітопровода – 0,12 м. За допомогою супорта токарного станка, магнітопровід встановлюється в області більшого діаметра конічної шийки, згідно розмітки і магнітопровід впритул підтискається до поверхні, що обробляється.

За допомогою дистанційного керування, при натисканні кнопки "Пуск", вмикається джерело живлення ВМГ-5000, магнітопровід притягується до валку, по магнітопроводу, протягом 3-х секунд, пропускається постійний струм 5000 А і проводиться намагнічування поверхні конусної шийки, з напрямком силових ліній, протилежним напрямку силових ліній намагнічування втулки-цапфи. Натисканням кнопки "Стоп" виключається джерело живлення, супорт відводиться від поверхні і переміщується по довжині конічної шийки, для обробки наступної ділянки. Після обробки поверхні по всій довжині, супорт повертається в вихідне становище в області більшого діаметра конічної шийки. Валок обертається і встановлюється згідно розмітки. Аналогічно проводиться обробка конічної шийки опорного валка по всієї поверхнею. Після обробки однієї шийки проводиться обробка другої шийки і опорний валок подається на зборку з втулками-цапфами.

Електромагнітна обробка поверхні втулки-цапфи проводиться на площі токарного станка, за допомогою поворотної консолі та тельфера. Магнітопровід з випуклою поверхнею електротехнічної сталі кріпиться на тельфері в вертикальному положенні таким чином, щоб виводи мідних шин розташовувались вверху. Підключення кабелей проводиться до мідних шин, з урахуванням напрямку струму від плюса до мінусу та намагнічування поверхні втулки-цапфи, з протилежним напрямком силових ліній, намагнічування конічних шийок опорного валка. Поверхня втулки-цапфи попередньо розмічається по периметру з боку більшого діаметра з розміром, рівним ширині магнітопровода і по висоті з розміром, рівним довжині магнітопровода.

Магнітопровід за допомогою тельфера вводиться в середину втулки-цапфи, встановлюється, згідно з розміткою і підтискається дерев'яним упором до поверхні, що обробляється. По магнітопроводу пропускається струм величиною 5000 А протягом 3-х секунд, і проводиться намагнічування поверхні. Після намагнічування однієї ділянки

## Машинобудування і зварювальне виробництво

магнітопровід піднімається вертикально нагору, встановлюється на наступну ділянку і аналогічно проводиться намагнічування цієї ділянки. Після обробки всієї вертикальної поверхні, магнітопровід опускається вниз і зміщується по периметру, згідно з розміткою. Аналогічно проводиться намагнічування всієї поверхні та іншої втулки-цапфи.

На підставі дослідно-промислової експлуатації оброблених втулок-цапф та опорного валка, який прокатав у чистовій кліті 91 878 000 кг металу, встановлено, що намагнічування контактних поверхонь з протилежним напрямом силових ліній запобігає фреттінг-корозії. Після експлуатації, при розбиранні опорного валка, втулки-цапфи знялися легко при тиску 7,84 МПа, що значно менше граничного значення, необхідного для розбирання опорних валків без фізичної обробки контактних поверхонь. Контактні поверхні опорного валка та втулок-цапф після експлуатації гладкі, чисті, без фреттінг-корозії. Це підтверджує ефективність намагнічування для запобігання фреттінг-корозії. Після підготовки опорний валок завалений в кліть без додаткової обробки контактних поверхонь. Застосування розробленого процесу намагнічування контактних поверхонь, з протилежним напрямом магнітних полів, запобігає фреттінг-корозію, знижує трудомісткість і собівартість металу.

Ефект зварювання під дією високих тисків доцільно використовувати для виготовлення двошарової сталі. По розташованим під гострим кутом вуглецевої та плакуючої сталі пропускають постійний струм однакового напрямку, виникає магнітний тиск тяжіння, атоми зближуються на міжатомну відстань, і утворюється двошарова сталь.

Встановлені закономірності, з урахуванням регулювання магнітного поля дуги, теоретичних основ магнітного поля та механізму підвищення тріщиностійкості, рекомендується використовувати для розробки нових процесів зварювання та наплавлення.

Розроблено спосіб електромагнітного намагнічування поверхонь, з протилежним напрямком силових ліній та виникненням магнітного тиску відштовхування, що зростає при прокатці, забезпечує концентрацію магнітної енергії, виникнення магнітного тиску відштовхування та запобігає зварюванню.

## ВИСНОВКИ

Природа міжатомних зв'язків електромагнітна. Електрони, що обертаються навколо ядра, створюють мікротоки, напрямом яких у сусідніх атомів однаковий. Мікроструми створюють магнітні поля протилежних напрямків, які взаємно знищуються, поле стає рівним нулю, атоми рухаються в сторону меншого магнітного поля і виникають міжатомні зв'язки, які при зменшенні міжатомної відстані зростають. При протіканні пластинами постійного струму однакового напрямку, пластини притягуються, що підтверджує електромагнітну природу міжатомних зв'язків.. При протіканні пластинами струмів протилежних напрямків, пластини відштовхуються, що попереджує фреттінг-корозію.

Фреттінг-корозія – процес зварювання контактуючих металевих поверхонь, під дією високих питомих тисків і зсувів що забезпечує зближення атомів, видалення оксидів, орієнтацію мікрострумів однакового напрямку сусідніх атомів, створення магнітних полів протилежних напрямків, взаємне знищення індукції між атомами, виникнення магнітного тиску тяжіння, скорочення міжатомних відстаней та підвищення міжатомних зв'язків. В результаті фреттінг-корозії втулка-цапфа зварюється з опорним валком і її важко зняти за допомогою гідропреса. На поверхні залишаються сліди, що посилює фреттінг-корозію.

Для попередження фреттінг-корозії, розроблено спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують з протилежним напрямком силових ліній магнітного поля, що створює магнітний тиск відштовхування і попереджує фреттінг-корозію. Зі зменшенням відстані між атомами контактуючих поверхонь, під дією високих тисків при прокатці металу, індукція зростає та в квадратичній залежності

## Машинобудування і зварювальне виробництво

підвищується відштовхування. При електромагнітній обробці вся поверхня розбивається на ділянки, рівні площі магнітопроводу, що концентрує та підвищує магнітну енергію. Для підвищення магнітного потоку, тиску і намагнічування, необхідно збільшувати перетин магнітопроводу.

У процесі електромагнітного намагнічування, при протіканні струму всередині, магнітопровід притягується до поверхні, що обробляється. Спири електронів поверхні, що обробляється, орієнтуються вздовж силових ліній магнітного поля, створюваного струмом, що забезпечує намагнічування оброблюваних поверхонь. Збільшення магнітного поля та намагнічування забезпечується за рахунок зростання струму, концентрації магнітного поля, за допомогою магнітопроводу, зменшення зазору, площі електромагнітного тиску і розташування магнітопроводу на початку, під гострим кутом.

Магнітопровід забезпечує замикання силових ліній поля у феромагнетику, зниження магнітного опору та збільшення індукції поля. Зменшення площі підвищує індукцію, електромагнітний тиск і посилює намагнічування оброблюваної поверхні. Магнітне поле посилюється при зменшенні зазору в магнітопроводі та магнітного опору, тому, поверхня виконана по контуру оброблюваної деталі. Для обробки шийок опорного валка, поверхня магнітопроводу виконана увігнутою, а для обробки втулок-цапф опуклою.

Індукція та магнітний тиск зростають при розташуванні магнітопроводу на оброблюваній поверхні, під гострим кутом. Контакт магнітопроводу з оброблюваною поверхнею здійснюється лише на початку. При включенні струму та створенні магнітного поля, силові лінії концентруються у місці контакту магнітопроводу з оброблюваною поверхнею. В результаті, різко зростає індукція магнітного поля та намагнічування поверхні. Упор, що утримує другий кінець магнітопроводу, під дією струму видаляється і магнітопровід притягується до поверхні, що оброблюється, точка контакту і максимум індукції магнітного поля переміщуються вздовж оброблюваної поверхні. Після обробки однієї ділянки, деталь обертається на ширину магнітопроводу і проводиться обробка наступної ділянки всієї поверхні.

Розроблено, заснований на квантових процесах взаємодії атомів, спосіб електромагнітної обробки опорного валка і втулки-цапфи, при якому контактуючі поверхні намагнічують з протилежним напрямком силових ліній магнітних полів, що створює магнітний тиск відштовхування, який в процесі прокатки, під дією високих питомих тисків, концентрує магнітну енергію, посилює поле і попереджує фреттинг-корозію, що забезпечує зниження трудомісткості та собівартості метала

### Список використаних джерел

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму / Р.М.Уайт. - К.: Світ, 2002. - 306с.
2. Фролов В.В. Теоретичні основи зварювання/В.В. Фролов, В.А.Вінокуров. - К.: Вища школа, 2004. - 591 с.
3. Акулов А. І. Утримання рідкого металу зварювальної ванни поперечним магнітним полем/А.І. Акулов, А.М. Рибачук // Зварювальне виробництво. - 2002. - № 2. - С. 3 - 4.
- 4.Зварювання з електромагнітним перемішуванням/В.П. Черниш, В.Д.Кузнецов, А.Н.Брисман, Г.М.Шеленков.-К.: Техніка, 2003. - 127с.
5. Рижов Р.М. Магнітне керування якістю зварних з'єднань /Р.М. Рижов, В.Д. Ковалів. - К.: Екотехнологія, 2010. - 288 с.
6. Черниш В.П., Рижов Р.М. Залежність параметрів керуючого магнітного впливу від енерговкладання встик при дуговому зварюванні / В.П. Черниш, Р.М. Рижов // Автоматичне зварювання. - 1998. - №5. - С.49 -51.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

7.Рижов Р.Н Застосування шестиполусної електромагнітної системи для управління параметрами формування швів при зварюванні електродом, що не плавиться/Р.М. Рижов, В.Д. Кузнєцов, А.В. Малишев // Автоматичне зварювання. - 2004. - №2. - С.45 -49.

Shchetynina V.I., Volenko I.V.

### FRETTING CORROSION OF THE SUPPORT ROLL AND JOURNAL BUSHING

*The nature of interatomic bonds is electromagnetic. Electrons rotating around the nucleus create microcurrents, the direction of which is the same for neighboring atoms. Microcurrents create magnetic fields of opposite directions, which cancel each other out, the field becomes zero, and the atoms move in the direction of the smaller current. magnetic field and interatomic bonds arise, which increase with decreasing interatomic distance. When direct current of the same direction flows through the plates, the plates are attracted, which confirms the electromagnetic nature of interatomic bonds. When currents of opposite directions flow through the plates, the directions of the plates repel each other, which prevents fretting corrosion.*

*Fretting corrosion – welding process of contacting metal surfaces under the influence of high specific pressures and displacements, which ensures the convergence of atoms, the removal of oxides, the orientation of microcurrents of the same direction of neighboring atoms, the creation of magnetic fields of opposite directions, mutual destruction of induction between atoms, the emergence of magnetic pressure of attraction, a reduction in interatomic distance and an increase in interatomic bonds.*

*To prevent fretting corrosion, a method for electromagnetic treatment of the support roll and journal sleeve has been developed, in which the contacting surfaces are magnetized with opposite directions of the magnetic field lines, which creates a magnetic repulsive pressure and prevents fretting corrosion. As the distance between the atoms of the contacting surfaces decreases, under the high specific pressures of metal rolling, the induction and magnetic repulsive pressure increase in a quadratic relationship. During electromagnetic processing, the entire surface is broken down into sections equal to the area of the magnetic circuit. This concentrates and increases magnetic energy. The width of the magnetic core is determined by the cross-section of the electrical steel and the slot width. As the cross-section increases, so does the magnetic flux and magnetization, so to increase the magnetic pressure, it is advisable to increase the cross-section of the magnetic core.*

*During electromagnetic magnetization, a current flows through the magnetic core, attracting it to the workpiece. The electron spins of the workpiece are aligned with the magnetic field lines generated by the current, resulting in magnetization of the workpiece. The increase in magnetic field and magnetization is achieved by concentrating the magnetic field using a magnetic circuit, reducing the gap, the area of electromagnetic pressure, and positioning the magnetic circuit at the beginning at an acute angle.*

*The magnetic core ensures the closure of the field lines in the ferromagnet, reducing magnetic resistance and increasing the field induction. Reducing the area increases the induction, electromagnetic pressure, and enhances the magnetization of the workpiece. The magnetic field increases as the gap in the magnetic core and magnetic resistance decrease, so the surface is machined to the contour of the workpiece. For machining the journals of the support roll, the magnetic core surface is concave, while for machining the journals, it is convex.*

*Induction and magnetic pressure increase especially when the magnetic core is positioned at an acute angle to the workpiece. In this case, contact between the magnetic core and the workpiece occurs only at the beginning. When the current is turned on and a magnetic field is created, the lines of force are concentrated in the area. Contact of the magnetic circuit with the workpiece. As a result,*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

*the magnetic field induction and surface magnetization increase sharply. At the same time, the stop holding the other end of the magnetic circuit is removed by the current, and the magnetic circuit is attracted to the workpiece, the contact point and the maximum magnetic field induction moves along the surface being processed. After processing one section, the part is rotated by the width of the magnetic circuit, and the next section of the entire surface is processed.*

*The electromagnetic nature of fretting corrosion has been established and a new method for electromagnetic treatment of a support roll and journal sleeve, based on quantum processes of atomic interaction, has been developed, in which the contacting surfaces are magnetized in the opposite direction. magnetic field lines, which creates a repulsive magnetic pressure, which, during the rolling process under the influence of high specific pressures, a decrease in the area of the processed surface and a magnetic circuit located at an acute angle, concentrates the magnetic energy, strengthens the field and prevents fretting corrosion, which reduces labor intensity and metal cost.*

**Keywords:** *fretting corrosion of the support roll and journal bushing, electromagnetic nature, magnetic energy, contacting surfaces are magnetized in the opposite direction. creates a repulsive magnetic pressure, electromagnetic nature of fretting corrosion, magnetic core located at an acute angle, concentrates the magnetic energy.*

*Стаття надійшла 15.03.2026р.*

*Стаття прийнята 19.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359306](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359306)

Аришин О.В., Макаров О.В., Михайлів Ю.В., Трофуненко І.С.

### ПРИРОДА УТВОРЕННЯ ГАРЯЧИХ ТА ХОЛОДНИХ ТРІЩИН ПРИ ВИСОКОШВИДКІСНОМУ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

*На основі рентгеноструктурного аналізу, що проводився на дифрактометрі ДРОН-3 встановлено, що при електродуговому наплавленні, під дією дуги та термодіформацийного циклу, в наплавленому металі порушується рівновага, виникають мікростворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і утворюються зварювальні напруги. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому для підвищення тріщиностійкості необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги. Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур  $T_l - T_c$ , ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої  $T_{FeS} = 1150^{\circ}C$ . Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ТІК, в якому значно знижується межа міцності. Для запобігання утворення гарячих тріщин і підвищення тріщиностійкості високовуглецевих сталей, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS і високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, що знижує зварювальні напруги і подрібнює мікроструктуру, внаслідок зростання швидкості кристалізації. При наплавленні високовуглецевих сталей, для запобігання утворення холодних і гарячих тріщин рекомендується спочатку проводити*

**Машинобудування і зварювальне виробництво**

попередній і супутній підігрів до 250 – 300<sup>0</sup> С і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений зменшує вміст вуглецю, зварювальні напруги, запобігає тріщинам, і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від більшого до меншого, елементи рухаються з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією, що призводить до мимовільного вирівнювання концентрацій, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується, і тріщиностійкість підвищується. Рекомендовано наплавлення перших двох проходів буферного шару високовуглецевих сталей проводити низьковуглецевим дротом, що забезпечує зменшення вуглецю, за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення СО. Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендовано замість дроту Зв08А проводити наплавлення кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни, запобігають утворення пір СО і підвищують зносостійкість. Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин, зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість. Розроблено процес наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS, запобігання утворення гарячих, холодних тріщин і пір, зниження енергії, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, підвищення швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

**Ключові слова:** гарячі та холодні тріщини, температурний інтервал крихкості, робочі валки прокатних станів сірка, високошвидкісне наплавлення на низькій енергії, буферний шар, наплавлення низьковуглецевим дротом, пори, зварювальні напруги, кремнемарганцевий дріт Зв08Г2С, тріщиностійкість, та зносостійкість.

**Постановка проблеми.** Робочі валки прокатних станів, що експлуатуються в умовах високих тисків і змінюючихся температур, виготовляються зі, схильної до утворення гарячих і холодних тріщин, високовуглецевої сталі 90ХФ. Тому, підвищення тріщиностійкості та зносостійкості високовуглецевих сталей є важливою науково-технічною проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** При наплавленні високовуглецевих сталей утворення гарячих і холодних тріщин залежить від хімічного складу буферного шару наплавленого металу. Механізм утворення і запобігання гарячих тріщин не встановлено [1]. Однак, Н. М. Прохоров відмічає, що при значному зменшенні погонної енергії тріщиностійкість зростає. Вплив хімічного складу буферного шару наплавленого металу та енергії на структуру, тріщиностійкість та зносостійкість досліджено недостатньо [1–7].

**Мета досліджень.** Встановлення механізму утворення гарячих тріщин і розробка процесу високошвидкісного наплавлення на низькій енергії, що забезпечує підвищення тріщиностійкості та зносостійкості робочих валків прокатних станів.

**Основний матеріал дослідження.** При електродуговому наплавленні високовуглецевих сталей, під дією дуги та термодформаційного циклу, порушується рівновага і виникають

## Машинобудування і зварювальне виробництво

мікронапруги[2]. Мікронапруги  $\sigma = E \frac{\Delta a}{a}$ , МПа в наплавленому металі, визначаються мікроспотвореннями кристалічної решітки  $\frac{\Delta a}{a}$ .

Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги і температурний інтервал крихкості (рис.1), що забезпечується при зростанні швидкості наплавлення і зниженні енергії при високошвидкісному наплавленні.

Для регулювання якості наплавленого металу проведені дослідження впливу погонної енергії на структурні та фазові перетворення, шляхом виміру мікроспотворень кристалічної решітки і щільності дислокацій наплавленого металу. Дослідження величини мікроспотворень кристалічної решітки проводили методом рентгеноструктурного аналізу на рентгенівському дифрактометрі ДРОН-3.

В результаті встановлено, що при наплавленні на низькій погонній енергії мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги та щільність дислокацій знижуються[3]. Підвищення енергії призводить до зростання мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг і утворення тріщин.

Тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити зменшення термодформаційного циклу і мінімальні зварювальні напруги, які знижуються при підвищенні швидкості зварювання і зменшенні погонної енергії[4].

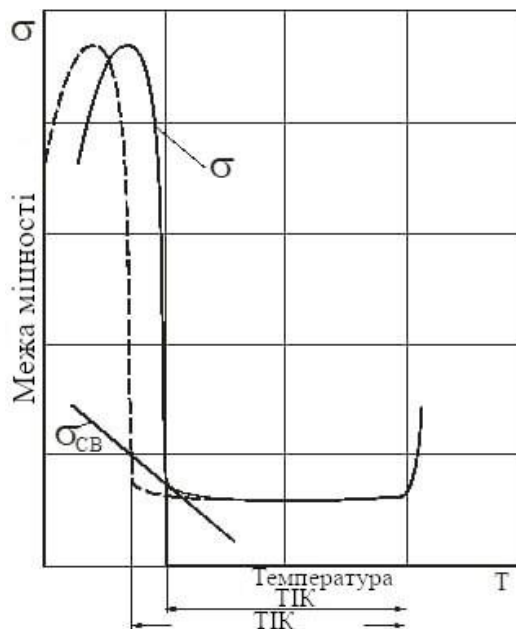


Рисунок 1 – Температурний інтервал крихкості

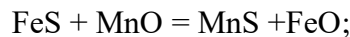
На основі проведеного рентгеноструктурного аналізу, для попередження утворення тріщин при наплавленні високовуглецевих сталей, спочатку проводять попередній та супутній підігрів до температури 250 – 300°C і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, зменшує вміст вуглецю і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від

## Машинобудування і зварювальне виробництво

більшого до меншого, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується і тріщиностійкість підвищується.

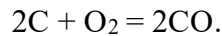
Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур  $T_l - T_c$  „ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої  $T_{FeS}=1150^0$  C[5]. Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ПК (рис.1).

Ефективним способом запобігання виникнення гарячих тріщин є зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS;



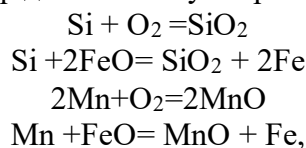
Тому, для запобігання утворення гарячих тріщин, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С.

Валки листопрокатних станів виготовляються з високовуглецевої сталі, тому, при наплавленні перших двох проходів, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення CO:



При високошвидкісному наплавленні зростає швидкість кристалізації і гази, що не встигли виділитися, призводять до утворення пір.

Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендується замість дроту Зв08А використовувати кремнемарганцевий дріт Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни:



запобігають утворення пір CO і підвищують зносостійкість.

Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість[6].

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів, з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, запобігання утворення гарячих і холодних тріщин, зниження енергії, зростання швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури, зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

Встановлені закономірності і розроблений спосіб високошвидкісного наплавлення на низькій енергії буферних шарів робочих валків кремнемарганцевим дротом можуть бути використані при високошвидкісному наплавленні опорних валків.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси високошвидкісного наплавлення на низькій енергії буферних шарів високовуглецевих сталей низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом, який забезпечує підвищення тріщиностійкості та зносостійкості.

## ВИСНОВКИ

На основі рентгеноструктурного аналізу, що проводився на дифрактометрі ДРОН-3, встановлено, що при електродуговому наплавленні, під дією дуги та термодформаційного циклу, в наплавленому металі порушується рівновага, виникають мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, щільність дислокацій і утворюються зварювальні напруги. Мікронапруги призводять до інтенсивного утворення і зростання тріщин. Природа утворення тріщин електромагнітна. Гарячі та холодні тріщини утворюються, коли зварювальні напруги стають більше за межу міцності, тому, для підвищення тріщиностійкості, необхідно забезпечити мінімальні зварювальні напруги.

Кристалізаційні чи гарячі тріщини утворюються в інтервалі температур  $T_L - T_C$ , ліквідус – солідус, близьких до лінії солідус, внаслідок виникнення легкоплавкої евтектики FeS, температура плавлення якої  $T_{FeS}=1150^0$  С. Гарячі тріщини утворюються в температурному інтервалі крихкості ПІК, в якому значно знижується межа міцності. Для запобігання утворення гарячих тріщин і підвищення тріщиностійкості високовуглецевих сталей, рекомендується проводити наплавлення буферного шару низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS і високошвидкісного наплавлення на низькій погонній енергії, що знижує зварювальні напруги і подрібнює мікроструктуру, внаслідок зростання швидкості кристалізації.

При наплавленні високовуглецевих сталей, для запобігання утворення холодних і гарячих тріщин, рекомендується спочатку проводити попередній і супутній підігрів до  $250 - 300^0$  С і наплавлення буферного шару низьковуглецевим дротом, що за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений зменшує вміст вуглецю, зварювальні напруги, запобігає тріщинам, і підвищує тріщиностійкість. В природі все мимоволі рухається від більшого до меншого, елементи рухаються з області з високою концентрацією в область з низькою концентрацією, що призводить до мимовільного вирівнювання концентрацій, тому вміст вуглецю в наплавленому металі зменшується і тріщиностійкість підвищується.

Рекомендовано наплавлення перших двох проходів буферного шару високовуглецевих сталей проводити низьковуглецевим дротом, що забезпечує зменшення вуглецю, за рахунок дифузії вуглецю з основного металу в наплавлений, в наплавленому металі утворюються пори, внаслідок виділення СО. Для запобігання утворення пір, при наплавленні перших двох проходів буферного шару, рекомендовано, замість дроту Зв08А, проводити наплавлення кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, який, за рахунок підвищеного вмісту кремнію та марганцю, що мають велику спорідненість до кисню, забезпечують розкислення рідкого металу зварювальної ванни, запобігають утворення пір СО і підвищують зносостійкість.

Високошвидкісне наплавлення запобігає утворенню гарячих і холодних тріщин, зменшує погонну енергію, температурний інтервал крихкості, мікроспотворення кристалічної решітки, мікронапруги, зварювальні напруги, щільність дислокацій, збільшує швидкість зварювання та кристалізації, подрібнює мікроструктуру, скорочує міжатомну відстань, підвищує міжатомні зв'язки, тріщиностійкість та зносостійкість.

Розроблено процес високошвидкісного наплавлення на низькій енергії робочих валків прокатних станів з підігрівом і наплавленням буферного шару зварювальним низьковуглецевим кремнемарганцевим дротом Зв08Г2С, що забезпечує зменшення температурного інтервалу крихкості, за рахунок зниження вмісту сірки, шляхом зв'язування сірки в з'єднання MnS, запобігання утворення гарячих, холодних тріщин і пір, зниження енергії, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, зварювальних напруг, щільності дислокацій, зростання швидкості наплавлення та кристалізації, подрібнення мікроструктури,

## Машинобудування і зварювальне виробництво

зменшення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, тріщиностійкості та зносостійкості.

### Список використаних джерел

1. Прохоров Н.М. Фізичні процеси у металі при зварюванні /Н.Н.Прохоров. - Т.ІІ. - К.: Металургія, 2006. - 600 с
2. Порівняльне визначення щільності дислокацій у напівкристалах за шириною рентгенівських ліній та електронномікроскопічно / О.М.Іванов, Ю.О. Меженний, А.Є. Острів та інших. // Заводська лабораторія. - 1997. - №2. - С.43 - 48.
3. Фінкель В.М. Фізика руйнування/В.М. Фінкель. - К.: Металургія, 1970. - 376с.
4. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - К.: Світ, 2002. - 306с.
5. Вплив погонної енергії на утворення відколів при наплавленні високовуглецевої сталі аустенітними дротиками /В.К. Каленський, Я.П. Черняк, В.Г. Васильєв, Т.Г. Соломійчук // Автоматичне зварювання. - 2001. - №11. – С. 11–14.
6. Технологія, матеріали, обладнання/І.А. Рябцев, І.А. Кондратьєв, Є.Ф.Переплетчиков, Ю.М. Кусков. – Київ, ІЕЗ ім. О.О. Патона НАНУ, 2015. – 402 с.
7. Рябцев І.А. Наплавлення деталей машин та механізмів. - Київ: Екотехнологія, 2004. - 160 с.

**Aryshyn O.V., Makarov O.V., Mykhailiv Y.V., Trofunenko I.S.**

## **NATURE OF HOT AND COLD CRACKING IN HIGH-SPEED WITH HIGH-SPEED WELDING AND SURFACING**

*Based on X-ray structural analysis using a DRON-3 diffractometer, it was established that during electric arc surfacing, under the action of the arc and the thermal deformation cycle, the equilibrium in the deposited metal is disturbed, micro-distortions of the crystal lattice, micro-stresses, dislocation density arise, and welding stresses are formed. Micro-cracks lead to intense crack growth and crack growth. The nature of crack formation is electromagnetic. Hot and cold cracks form, when welding stresses exceed the tensile strength, so to improve crack resistance, it is necessary to ensure minimal welding stresses.*

*Crystallization or hot cracks are formed in the temperature range  $T_l - T_c$ , liquidus – solidus, close to the solidus line, due to the formation of a low-melting eutectic FeS, the melting temperature of which is  $T_{FeS} = 11500$  C. Hot cracks are formed in the brittleness temperature range  $T_{IH}$ , in which the ultimate strength is significantly reduced. To prevent the formation of hot cracks and increase the crack resistance of high-carbon steels, it is recommended to weld a buffer layer with low-carbon silicon-manganese welding wire Zv08G2S, which reduces the temperature brittleness range by reducing the sulfur content by binding sulfur into the MnS compound and high-speed surfacing at low heat input, which reduces welding stresses and refines the microstructure due to an increase in the crystallization rate.*

*When surfacing high-carbon steels, to prevent the formation of cold and hot cracks, it is recommended to first carry out preliminary and subsequent heating to 250 - 3000 C and surfacing of a buffer layer with low-carbon wire, which, due to the diffusion of carbon from the base metal into the weld reduces carbon content, welding stresses, prevents crack formation, and increases crack resistance. In nature, everything moves randomly from greater to lesser; elements move from areas*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

of high concentration to areas of low concentration, which leads to a random equalization of concentrations. Therefore, the carbon content in the deposited metal decreases and crack resistance increases.

*It is recommended surfacing the first two passes of the buffer layer on high-carbon steels to carry out with low-carbon wire, which ensures a reduction in carbon due to the diffusion of carbon from the base metal into the weld metal, pores form in the weld metal due to the release of CO. To prevent the formation of pores when surfacing the first two passes of the buffer layer, it is recommended to use Zv08G2S silicon-manganese wire instead of Sv08A wire, which, due to the increased content of silicon and manganese, which have a high affinity for oxygen, ensures the deoxidation of the weld pool liquid metal, prevent CO pores the formation and increase wear resistance.*

*High-speed surfacing prevents the hot and cold cracks formation, reduces linear energy, the brittleness temperature range, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, increases the surfacing and crystallization speed, grinds microstructure, reduces interatomic distances, increases interatomic bonds, crack resistance and wear resistance*

*A process has been developed for high-speed, low-energy surfacing of working rolls of rolling mills with heating and surfacing of a buffer layer using low-carbon silicon-manganese welding wire Sv08G2S, which ensures a reduction in the temperature range of brittleness due to a reduction in the sulfur content by binding sulfur into the MnS compound, preventing the formation of hot and cold cracks and pores, reducing energy, crystal lattice microdistortions, microstresses, welding stresses, dislocation density, surfacing and crystallization speed, refining the microstructure, reducing interatomic distances, increased interatomic bonds, crack resistance and wear resistance.*

**Keywords:** *rolling mill rollers, hot and cold cracks, the brittleness temperature range, sulfur, high-speed surfacing low energy, the buffer layer, surfacing with low-carbon, pores, welding stresses, silicon-manganese welding wire Zv08G2S, crack resistance, wear resistance.*

*Стаття надійшла 16.03.2026р.*

*Стаття прийнята 21.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

131 – Прикладна механіка

УДК 621.791.753.042

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359310](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359310)

Ніколаєв Р.В., Мінін Д.І., Плешаков А.О.

### ВПЛИВ ФОРМИ ВИРОБУ НА МАГНІТНЕ ПОЛЕ ПРИ ЗВАРЮВАННІ ТА НАПЛАВЛЕННІ

*При зварюванні та наплавленні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, індукція магнітного поля підвищується, внаслідок концентрації силових ліній у замкненій трубі, що володіє великою магнітною проникністю. Струм тече шляхом найменшого опору, силові лінії магнітного поля – шляхом найменшого магнітного опору. Адекватність методики вимірювання магнітного поля реальним умовам підтверджена при вимірюванні індукції поля струму, що тече виробом, у виробничих умовах при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб діаметром 0,426 м, з товщиною стінки 0,008м.*

## Машинобудування і зварювальне виробництво

В результаті досліджень встановлено, що, при протіканні струму пластинами, індукція магнітного поля в середині товщини пластини дорівнює нулю. При наближенні до поверхні пластини, індукція зростає та досягає максимального значення на поверхні. При віддаленні поверхні пластини індукція зменшується. Відповідно до силових ліній поля, при переході від середини до нижньої поверхні пластин, напрямок індукції змінюється на протилежне. Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що при протіканні струму по трубі, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в вододіючій великою магнітною проникністю трубі, максимальне значення індукції різко зростає в  $\pi$  разів, порівняно зі зварюванням пластин, з 0,1 Т до 0,35 Т. При наближенні до верхньої та нижньої поверхонь стінки труби, індукція магнітного поля знижується і різко падає при виході з ферромагнетика. При цьому, напрямок індукції в стику не змінюється, а максимальне значення досягається в середині стінки труби. Індукція підвищується внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в замкнутій, що володіє більшою магнітною проникністю, феромагнітної труби, контур якої збігається з силовими лініями поля. За межами феромагнітної труби магнітна проникність знижується і індукція різко падає. Індукція на осі труби дорівнює нулю і має протилежний напрямок в області нижньої стінки. Форма виробу, відповідно, впливає на електромагнітну силу, яка підвищується з 0,42 Н при протіканні струму пластинами до 1,47 Н і магнітний тиск, який при протіканні струму трубою зростає з 3,98 кПа до 48,8 кПа, більш ніж в 10 разів. Тому, при зварюванні труб, посилюється магнітне дуття та вплив магнітного поля на формування швів. В результаті магнітного дуття, при зварюванні труб від струмопідводу, електромагнітна сила відхиляє дугу вперед, її довжина періодично збільшується до природного обриву дуги, яка знову збуджується при закорочуванні електрода на виріб. При цьому, режим стає нестабільним, формування швів порушується. При зварюванні на струмопідводі, дуга відхиляється назад, занурюється в основний метал і стабілізується, але шов формується з підрізами. При нестабільному процесі зростає енергія, підвищення якої, згідно з рентгеноструктурним аналізом, призводить до появи мікроспотворень кристалічних ґрат, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин і зниження ударної в'язкості зварних сполук. При стабільному процесі енергія зменшується, що забезпечує зниження мікроспотворень кристалічних ґрат, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Розроблено енерго- і матеріалозберігаючий спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, з двостороннім струмопідводом до труби, при якому струм ззаду дуги в 2 рази вище струму попереду дуги, створює магнітне поле, яке забезпечує зниження енергії і наплавленого металу, мікроспотворень кристалічного решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг, схильності до утворення тріщин, рівновагу діючих на дугу і рідкий метал ванни електромагнітних сил, стабільність процесу, збільшення швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, якості зовнішнього шва, зворотного валика на флюсовій подушці, незалежно від зазору, і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

**Ключові слова:** одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, магнітне поле, енергія, стабільність, ударна в'язкість.

**Постановка проблеми.** Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей обмежено порушенням стабільності процесу та формування швів, що призводить до зниження ударної в'язкості зварних з'єднань. Тому, розробка енерго- і матеріалозберігаючого способу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, що забезпечує підвищення стабільності процесу, формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань є важливою науково-технічною

## Машинобудування і зварювальне виробництво

проблемою.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Для запобігання утворення підрізів при дводуговому зварюванні перша дуга проплавляє основний метал, а друга забезпечує відсутність підрізів і якісне формування швів. Однак, при дводуговому зварюванні, не забезпечується рівномірне формування зворотного валику на флюсовій подушці. Вплив регулювання енергії, переміщення дуги торцем електрода, магнітного поля, за рахунок форми електрода, на формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні та ударну в'язкість зварних з'єднань досліджено недостатньо [1 – 10].

**Мета досліджень.** Зниження енергії та розробка енерго-і матеріалозберігаючого процесу одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей, що забезпечує, підвищення стабільності, формування швів і ударної в'язкості зварних з'єднань

**Основний матеріал дослідження.** Ефективним енерго- та матеріалозберігаючим процесом є одностороннє високошвидкісне зварювання, яке забезпечує збільшення швидкості зварювання та кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків та ударної в'язкості зварних з'єднань. Однак підвищення швидкості зварювання обмежене порушенням стабільності процесу, що знижує ударну в'язкість зварних з'єднань.

При електродуговому зварюванні стабільність процесу та формування швів визначаються магнітним полем зварювального струму, що створюється дугою і струмом, що тече виробом. Магнітне поле струму дуги створює пінч-ефект, тиск дуги і спрямовані вниз електромагнітні сили, що діють, на рідкий метал і призводять до витікання метала з ванни при односторонньому зварюванні та утворенню підрізів, при високошвидкісному зварюванні. Магнітне поле струму, що тече виробом, визначає стабільність процесу, магнітогідродинамічні явища в ванні, формування швів і ударну в'язкість зварних з'єднань.

Магнітне поле визначається розтіканням струму в зварювальній ванні та залежить від струмовідводу до виробу. При зварюванні від струмопідводу, більшість струму протікає позаду дуги і лише частина попереду. При зварюванні на струмопідвод, більша частина струму протікає попереду дуги. В результаті змінюється магнітне поле зварювального струму і діючи на дугу і рідкий метал електромагнітні сили.

Магнітне поле струму, що тече виробом, створює поперечне магнітне поле, під дією якого дуга відхиляється у бік меншого поля, у бік, протилежний струмопідводу до обриву. Стабільність процесу та формування швів порушується. Діючи на дугу електромагнітна сила зварювального струму пропорційна струму  $I$ , індукції магнітного поля  $B$  і довжині дуги  $L_d$  [3]:

$$F_{EMD} = IBL_d, H.$$

В результаті зростає спрямований вниз магнітний тиск [3]  $P_{EM} = \frac{B^2}{2\mu} \text{ Па}$ , під дією якого рідкий метал стікає з кромки ванни, що призводить до утворення підрізів.

Особливо посилюються магнітне поле при зварюванні труб для газо-і нафтопровідних магістралей. При зварюванні труб від струмовідводу електромагнітна сила магнітного поля відхиляє дугу від більшого до меншого магнітного поля вперед до обриву. Стабільність процесу і формування швів порушуються, що знижує ударну в'язкість зварних з'єднань. Для забезпечення стабільності процесу та ударної в'язкості зварних з'єднань, розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб.

Для дослідження магнітного поля зварювального струму, що тече виробом, розроблено методику, згідно з якою, до виробу з моделлю зварювальної ванни підводяться струмопровідні кабелі. У зазорі стику знаходиться зонд тесламетра. По пластинах і трубі пропускається струм, і проводяться вимірювання магнітної індукції поля тесламетром EM4305. Розміри датчика

## Машинобудування і зварювальне виробництво

Холла, діаметром  $1 \cdot 10^{-3}$  м та зонда  $1 \times 5 \times 80 \cdot 10^{-3}$  м, дозволяють виміряти величину та розподіл індукції у зазорі стику. Як датчик тесламетра використовується ЕРС Холла, похибка вимірювання  $\pm 2,5$  %. Зонд встановлюється таким чином, щоб силові лінії магнітного поля входили в датчик Холла. Напрямок силових ліній магнітного поля визначається за правилом буравчика, з урахуванням напрямку струму від плюса до мінуса. Для регулювання та використання магнітного поля зварювального струму, вимірювання індукції виробляються у зазорі стику на верхній та нижній поверхнях, середині товщини металу та на відстані від виробу.

В результаті досліджень встановлено, що при протіканні струму пластинами індукція магнітного поля в середині товщини пластини дорівнює нулю. При наближенні до поверхні пластини, індукція зростає та досягає максимального значення на поверхні. При віддаленні поверхні пластини індукція зменшується. Відповідно напрямку силових ліній поля, при переході від середини до нижньої поверхні пластин, напрямку індукції змінюється на протилежне.

Розподіл індукції в зазорі стику пластин є результатом рівномірного розподілу струму перерізом виробу. Відповідно до принципу суперпозиції, магнітне поле, створене декількома струмами, дорівнює алгебраїчній сумі полів, створених кожним струмом окремо. Згідно закону Біо-Савара, індукція магнітного поля, створеного прямолінійним струмом провідника нескінченної довжини, прямо пропорційна величині струму  $I$  і обернено пропорційна відстані  $R$  від струму:

$$B = \mu \frac{I}{2\pi R}$$

де  $\mu$  – магнітна проникність середовища,  $4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м;

У середині товщини пластини струми, що протікають по верхній і нижній поверхнях, створюють рівні за величиною і протилежні магнітні поля, які взаємно знищуються. Тому, індукція всередині товщини пластини дорівнює нулю.

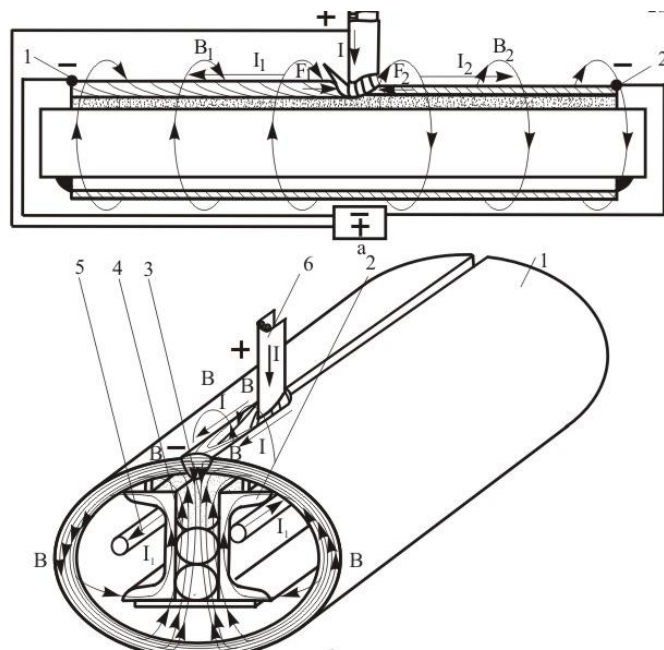
При наближенні до поверхні пластин, відстань від іншої поверхні збільшується, компенсуюча дія струмів зменшується, і величина індукції магнітного поля зростає. Максимальне значення індукції на поверхні свідчить, що максимальна магнітна міжатомна взаємодія визначають міцність зварного з'єднання.

Хороша збіжність розрахункових та експериментальних даних, при моделюванні процесу, підтверджує достовірність отриманої математичної моделі для визначення індукції магнітного поля струму, що тече пластинами.

Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що при протіканні струму трубою (рис.1), внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в замкнутій, що володіє більшою магнітною проникністю феромагнітної труби, контур якої збігається з силовими лініями поля. Максимальне значення індукції магнітного поля підвищується в  $\pi$  раз, порівняно зі зварюванням пластин:

$$B = \mu \frac{I}{2R}, T.$$

Машинобудування і зварювальне виробництво



б

Рисунок 1 – Одностороннє високошвидкісне зварювання труб для газо-і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмовідводом(а) і токоведучим витком(б)

де  $I$  – струм;  $F$  – електромагнітна сила;  $B$  – силові лінії магнітного поля;  
1, 2 – струмовідводи на початок і кінець труби(а)

1 – феромагнітна труба; 2 – штанга; 3 – флюсова подушка; 4 – пневмошланг; 5 – токоведучий виток; 6 – складовий електрод(б)

При цьому, напрямок індукції в стику не змінюється, а максимальне значення досягається в середині стінки труби. За межами феромагнітної труби магнітна проникність знижується і індукція різко падає. Індукція на осі труби дорівнює нулю і має протилежний напрямок в області нижньої стінки.

Форма виробу, відповідно, впливає на електромагнітну силу, яка підвищується з 0,42 Н, при протіканні струму пластинами, до 1,47 Н і магнітний тиск, який при протіканні струму трубою зростає з 3,98 кПа до 48,8 кПа, більш ніж в 10 разів. Тому, при зварюванні труб, посилюється магнітне дуття та вплив магнітного поля на формування швів. В результаті магнітного дуття, при зварюванні труб від струмопідводу, електромагнітна сила відхиляє дугу вперед, її довжина періодично збільшується до природного обриву дуги, яка знову збуджується при закорочуванні електрода на виріб. При цьому, режим стає нестабільним, формування швів порушується. При зварюванні на струмопідводі, дуга відхиляється назад, занурюється в основний метал і стабілізується, але шов формується з підрізами.

У процесі зварювання труб зонд тесламетра розташовувався в зазорі стику на середині товщини металу, верхній, нижній поверхнях і на відстані від поверхні. Для запобігання пошкодженню зонда, максимальне наближення до дуги, що швидко рухається, становило 0,25 м.

Як встановлено, при зварюванні труб у виробничих умовах, максимальне значення індукції магнітного поля дорівнює значенню індукції, отриманому при моделюванні за розробленою методикою, що підтверджує адекватність моделі реальним умовам зварювання труб.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

При односторонньому зварюванні якість формування швів визначається стабільністю процесу, що знижується при магнітному дутті. Закритий контур труб посилює магнітне поле, внаслідок чого порушується стабільність процесу формування швів. Тому, для забезпечення якісного формування швів при односторонньому високошвидкісному зварюванні необхідно зменшувати магнітне поле і стабілізувати процес.

Згідно з рентгеноструктурним аналізом, при нестабільному процесі, зростає енергія, підвищення якої призводить до появи мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин і зниження ударної в'язкості зварних сполук. При стабільному процесі енергія зменшується, що забезпечує зниження мікроспотворень кристалічних решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

При зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей індукція магнітного поля підвищується, внаслідок концентрації силових ліній у закритій трубі, що володіє великою магнітною проникністю. Струм тече шляхом найменшого опору, силові лінії магнітного поля – шляхом найменшого магнітного опору. Адекватність методики вимірювання магнітного поля реальним умовам підтверджена при вимірюванні індукції поля струму, що тече виробом, у виробничих умовах при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб діаметром 0,426 м, з товщиною стінки 0,008 м для газо-і нафтопровідних магістралей.

Для запобігання магнітному дуттю, розроблено спосіб зварювання труб з двостороннім струмопідводом, при якому регулюється діюча на дугу і рідкий метал ванни електромагнітна сила, за рахунок пропускання зварювального струму попереду та позаду дуги різних значень.

При протіканні позаду і попереду дуги струмів однакового значення, електромагнітні сили призводять до стабілізації процесу, однак, шви формуються з підрізами, тому, для якісного формування швів, розроблено спосіб, при якому величина струму позаду дуги в 2 рази більше ніж попереду дуги. Розроблений процес одностороннього високошвидкісного зварювання труб забезпечує стабільність та формування швів без підрізів.

Встановлено, що при протіканні струму по пластинах і трубі створюється два види магнітного поля – поперечне та поздовжнє. Індукція поздовжнього поля різко зростає при зазорі  $(1,5-2) \cdot 10^{-3}$  м, в результаті розпору силових ліній поля, що приводить дугу в обертання і підвищує стабільність процесу зварювання. Під дією поздовжнього магнітного поля, створюються спрямовані вперед по напрямку зварювання і до бокових кромek ванни магнітні тиски, що забезпечує формування швів без підрізів.

Зазор у стику визначає умови існування дуги, саморегулювання, автоматичне регулювання та значною мірою формування зовнішнього та зворотного валика при односторонньому зварюванні на флюсовій подушці, незалежно від зазору.

Для якісного формування швів, при односторонньому високошвидкісному зварюванні, необхідно встановити механізм регулювання і використовувати магнітне поле зварювального струму, що тече виробом. Магнітне поле має поперечну і поздовжню складову. Поперечне магнітне поле призводить до магнітного дуття, визначає положення дуги та рідкого металу, магнітогідродинамічні явища у ванні та формування зварних швів. Поздовжнє магнітне поле діє на горизонтальну складову струму, що протікає по рідкому металу, визначає рух рідкого металу в кратерну частину і до бокових кромek ванни, магнітогідродинамічні явища та формування швів. Поздовжнє поле приводить дугу та рідкий метал у обертання, що підвищує стабільність процесу та покращує формування швів.

Поздовжнє магнітне поле, що діє на дугу, підвищує стабільність процесу зварювання. Діюче на рідкий метал ванни поздовжнє поле створює спрямовані до кромek електромагнітні сили та магнітний тиск, що запобігає утворенню підрізів, тому необхідно вивчати механізм і регулювати магнітне поле зварювального струму.

## Машинобудування і зварювальне виробництво

На основі проведених досліджень розроблено процес одностороннього високошвидкісного зварювання на флюсовій подушці труб для газо- і нафтопровідних магістралей складовим електродом з двостороннім струмопідводом, на режимі: величина струму  $I = 2000-2100$  А, напруга на дузі  $U = 27-29$  В, величина струму позаду дуги  $I_1 = 1400$  А, попереду дуги  $I_2 = 700$  А, швидкість зварювання  $V = 75$  м/г.

Розроблено спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмопідводом до труби, при якому, струм позаду дуги в 2 рази вище струму попереду дуги, створює магнітне поле, яке забезпечує зниження енергії, мікроспотворень кристалічного решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг, схильності до утворення тріщин, рівновагу діючих на дугу і рідкий метал ванни електромагнітних сил, стабільність процесу, збільшення швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, якості швів і ударної в'язкості зварних з'єднань

Встановленні закономірності та розроблений спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання з двостороннім струмопідводом струмів різної величини можуть бути використані при зварюванні котлів залізничних цистерн і хребтових балок.

Подальші дослідження в даному напрямку є перспективними, так як дозволять розробити нові процеси одностороннього високошвидкісного зварювання, які забезпечують підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

## ВИСНОВКИ

При зварюванні труб для газо- і нафтопровідних магістралей, індукція магнітного поля підвищується, внаслідок концентрації силових ліній у замкненій трубі, що володіє великою магнітною проникністю. Струм тече шляхом найменшого опору, силові лінії магнітного поля – шляхом найменшого магнітного опору. Адекватність методики вимірювання магнітного поля підтверджена у виробничих умовах при односторонньому високошвидкісному зварюванні труб, діаметром 0,426 м, з товщиною стінки 0,008 м.

В результаті досліджень встановлено, що при протіканні струму пластинами, індукція магнітного поля в середині товщини пластини дорівнює нулю. При наближенні до поверхні пластини, індукція зростає та досягає максимального значення на поверхні. При віддаленні поверхні пластини індукція зменшується. Відповідно до силових ліній поля, при переході від середини до нижньої поверхні пластин, напрямок індукції змінюється на протилежне.

Розрахунково-експериментальним шляхом встановлено, що при протіканні струму по трубі, внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в володіючій великою магнітною проникністю трубі, максимальне значення індукції різко зростає в  $\pi$  разів, порівняно зі зварюванням пластин, з 0,1 Т до 0,35 Т. При наближенні до верхньої та нижньої поверхонь стінки труби, індукція магнітного поля знижується і різко падає при виході з ферромагнетика. При цьому, напрямок індукції в стику не змінюється, а максимальне значення досягається в середині стінки труби. Індукція підвищується внаслідок концентрації силових ліній магнітного поля в замкнутій, що володіє більшою магнітною проникністю феромагнітної труби, контур якої збігається з силовими лініями поля. За межами феромагнітної труби магнітна проникність знижується і індукція різко падає. Індукція на осі труби дорівнює нулю і має протилежний напрямок в області нижньої стінки.

Форма виробу відповідно впливає на електромагнітну силу, яка підвищується з 0,42 Н, при протіканні струму пластинами, до 1,47 Н і магнітний тиск, який, при протіканні струму трубою, зростає з 3,98 кПа до 48,8 кПа, більш ніж в 10 разів. Тому, при зварюванні труб, посилюється магнітне дуття та вплив магнітного поля на формування швів. В результаті магнітного дуття, при зварюванні труб від струмопідводу, електромагнітна сила відхиляє дугу

## Машинобудування і зварювальне виробництво

вперед, її довжина періодично збільшується до природного обриву дуги, яка знову збуджується при закорочуванні електрода на виріб. При цьому, режим стає нестабільним, формування швів порушується. При зварюванні на струмопідводі дуга відхиляється назад, занурюється в основний метал і стабілізується, але шов формується з підрізами.

При нестабільному процесі зростає енергія, підвищення якої, згідно з рентгеноструктурним аналізом, призводить до появи мікроспотворень кристалічних ґрат, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин і зниження ударної в'язкості зварних сполук. При стабільному процесі енергія зменшується, що забезпечує зниження мікроспотворень кристалічних ґрат, мікронапруг, щільності дислокацій, тріщин та підвищення ударної в'язкості зварних з'єднань.

Розроблено енерго- і матеріалозберігаючий спосіб одностороннього високошвидкісного зварювання труб для газо- і нафтопровідних магістралей з двостороннім струмопідводом до труби, при якому, струм позаду дуги в 2 рази вище струму попереду дуги, створює магнітне поле, яке забезпечує зниження енергії, мікроспотворень кристалічної решітки, мікронапруг, щільності дислокацій, зварювальних напруг, схильності до утворення тріщин, рівновагу діючих на дугу і рідкий метал ванни електромагнітних сил, стабільність процесу, збільшення швидкості зварювання і кристалізації, подрібнення мікроструктури, скорочення міжатомної відстані, підвищення міжатомних зв'язків, якості зовнішнього шва, зворотного валика на флюсовій подушці незалежно від зазору і ударної в'язкості зварних з'єднань в 2 рази.

### *Список використаних джерел*

1. Уайт Р.М. Квантова теорія магнетизму. - К.: Світ, 2002. - 306с.
2. Грановський В.Л. Електричний струм у газі. Встановлений струм / В. Л. Грановський. - К.: Наука, 2001. - 543с.
3. Фінкельбург В. Електричні дуги та термічна плазма / В. Фінкельбург та Г. Меккер. - К.: Вид-во іностр. літ., 2011. - 369 с.
4. Кесаєв І.Г. Катодні процеси електричної дуги/І.Г. Кесаєв. - К.: Наука, 2008. -244 с.
5. Рикалін Н.М. Розрахунок теплових процесів при зварюванні/Н.М. Рикалін. - К.: Металургія, 2001. - 296 с.
6. Акулов А. І. Утримання рідкого металу зварювальної ванни поперечним магнітним полем / А.І. Акулов, А.М. Рибачук // Зварювальне виробництво. - 2002. - № 2. - С. 3 - 4.
7. Чигарьов В.В. Розрахунок процесу поширення тепла при зварюванні змішаним електродом / В. В. Чигарєв, С. В. Щетінін // Вісник Приазов. держ. техн. ун-ту: Зб. наук. пр. – Маріуполь, 2001. – Вип.11. – С.175–177.
8. Гулаков С.В. Наплавлення під флюсом стрічковим електродом/С.В. Гулаков, В.М. Матвієнко, Б.І. Носовський. - Маріуполь, 2006. - 136с.
9. Акулов А.І. Граничні струми при зварюванні електродом, що плавиться /А.І.Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г. Чернишов // Изв. вишів. Машинобудування. - 2008. - №3. - С.132 - 137.
10. Акулов А.І. Формування стикових швів при зварюванні в CO<sub>2</sub> в умовах технологічних збурень /А.І. Акулов, Б.Л. Боженко, Г.Г.Чернишов // Автоматичне зварювання. - 2009. - №12. - С.26 - 28.

## EFFECT OF PRODUCT SHAPE ON MAGNETIC FIELD DURING WELDING AND SURFACING

*When welding gas and oil pipeline pipes, magnetic field induction increases due to the concentration of magnetic field lines within a closed, highly magnetically permeable pipe. Current flows along the path of least resistance, and magnetic field lines follow the path of least magnetic resistance. The adequacy of the magnetic field measurement method for real-world conditions has been confirmed by single-sided high-speed welding of 0.426-meter diameter pipes.*

*The research revealed that when current flows through the plates, the magnetic field induction at the center of the plate thickness is zero. As the plate surface is approached, the induction increases and reaches its maximum value at the surface. As the surface distance increases, the induction decreases. When moving from the center to the bottom surface of the plates, the direction of induction reverses.*

*Calculations and experiments have shown that when current flows through a pipe, due to the concentration of magnetic field lines in the pipe's high magnetic permeability, the maximum induction value increases sharply by a factor of  $\pi$  compared to welding plates from 0.1 T to 0.35 T. The maximum value is reached in the middle of the pipe wall and does not change direction. As it approaches the upper and lower surfaces of the pipe wall, the magnetic induction decreases and drops sharply upon exiting the ferromagnet.*

*Due to magnetic field induction, the electromagnetic force during pipe welding increases from 0.42 N when current flows through the plates to 1.47 N. Magnetic pressure also increases more than tenfold when current flows through the pipe, from 3.98 kPa to 48.8 kPa. Therefore, during pipe welding, process instability and the influence of the magnetic field on weld formation increase. As a result, when welding pipes, the electromagnetic force deflects the arc forward from the current lead until it naturally breaks, only to re-ignite when the electrode shorts to the workpiece. This makes the welding process unstable, disrupting weld formation. When welding with a current lead, the arc deflects back, plunges into the base metal, and stabilizes, but the weld is formed with undercuts.*

*During an unstable process, energy increases, which, according to X-ray diffraction analysis, leads to the appearance of microdistortions in the crystal lattice, microstresses, dislocation density, cracks, and a decrease in the impact toughness of welded joints. During a stable process, energy decreases, resulting in reduced microdistortions in the crystal lattice, microstresses, dislocation density, cracks, and an increase in the impact toughness of welded joints.*

*An energy- and material-saving method has been developed for one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines with double-sided current supply to the pipe, in which the current flowing behind the arc is 2 times higher than the current flowing in front of the arc, which creates a magnetic field that ensures a reduction in energy and deposited metal, microdistortions of the crystal lattice, microstresses, dislocation density, welding stresses, tendency to crack formation, equilibrium of the forces acting on the arc and liquid metal bath of electromagnetic forces, process stability, increased welding and crystallization speed, refinement of the microstructure, reduction of interatomic distances, improvement of interatomic bonds, quality of the outer weld, back bead on the flux cushion regardless of the gap in the joint and welded joints impact toughness by 2 times.*

**Keywords:** *the one-sided high-speed welding of pipes for gas and oil pipelines, welded joints impact toughness, magnetic field, energy.*

*Стаття надійшла 20.03.2026р.*

*Стаття прийнята 24.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## СКЛАДОВІ ДО СТВОРЕННЯ ТЕХНОЛОГІЇ ВИРОБНИЦТВА ХОЛОДНОГНУТИХ ШВЕЛЕРІВ З СТАЛЕЙ ПІДВИЩЕНОЇ МІЦНОСТІ, ЩО ЗВАРЮЮТЬСЯ

Є два типи технології з виробництва швелерів: технологія гарячої сортової прокатки з квадратної чи прямокутної заготовки; технологія холодного згинання смуги або листа.

При гарячій сортовій прокатці в основному застосовують низьковуглецеві сталі які можливо зварювати. Такі сталі не мають великої міцності.

Зниження металоємкості конструкцій з швелерів є важливою задачею. Питання з підвищенням показників міцності метала швелерів мають високу актуальність при сучасних вимогах до металоконструкцій.

Швелери сталеві гнуті згинають в місцях між полкою та стінкою. Такий профіль має меншу жорсткість по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногогнутих профілів. Перша складова це застосування сталей листового прокату з низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей (з контрольованої прокатки), де виконується інтенсивна термічна і механічна обробка, яка дозволяє збільшити показники міцності сталі. При цьому залишається можливість якісної зварки таких сталей.

Наприклад, гнуті швелери виготовляють з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup> регламентовані за ДСТУ 2834-94, а можливо використовувати лист за API Spec 5L сталь X60 L415, границя міцності якої досягає 760 Н/мм<sup>2</sup>.

Друга складова – для підвищеного жорсткості гнутого профілю запропоновано метал нагрівати безпосередньо в зонах деформації кутів та осаджувати полку, заповнюючи кут в 90 градусів між полкою та стінкою. Використання такого способу дозволяє наблизити і жорсткість холодногогнутого швелера до жорсткості гарячекатаного.

Запропонована технологія дозволяє виробляти гнутий швелер з зварних сталей, що мають підвищену міцність. Це дозволить зменшити металоємність конструкцій з швелерів.

**Ключові слова:** швелери гарячекатані та холодногогнути, міцність, жорсткість, зварюваність, сталі з контрольованої прокатки, локальний нагрів, локальна деформація, зменшення маси погонного метра швелера, термомеханічно оброблена сталь,.

**Постановка проблеми.** Швелер це один з видів металургійної продукції, що застосовується в різноманітних конструкціях. Його особлива форма дає добрі результати при навантаженні на вигин.

Промисловість випускає два види швелерів гарячекатаний та гнутий, які відрізняються за своїм способом виробництва, а також мають відмінність у механічних властивостях.

Виробництво гарячекатаних швелерів є енергоємним зі складним технологічним ланцюгом. Складною є системи калібрів. Потрібно мати великий парк станів та інструменту для них [1],[2], [3].

Для швелерів застосовують низьковуглецеві сталі. Низьковуглецеві сталі, що застосовуються при виробництві гарячекатаних швелерів, дають можливість зварювання, але не мають високої міцності.

Виробництво швелерів по технології холодного згинання смуги чи листа простіше і, на відмінність від гарячекатаних процесів, не потребує значних енергетичних витрат на нагрів. Їх виробляють методом холодного згинання листового металу або полос на профілезгинальних безперервних станах або на механічних пресах. Але такий профіль поступається жорсткістю по зрівнянню з гарячекатаними швелерами.

Гнутий швелер відрізняється різноманітністю форм та розмірів, та регламентується ДСТУ 8808:2018 «Профілі сталеві гнуті. Технічні умови».

Відомо, що для виробництва зварних труб великих діаметрів для нафтогазопроводів застосовують низьковуглецеві сталі з низьким легуванням. Також застосовують низьковуглецеві сталі після так званої контрольованої прокатки, де виконується інтенсивна термічна обробка, яка дозволяє збільшувати основні показники міцності сталі.

Є сенс у виробництві гнутих швелерів застосовувати сталі вироблені за технологіями контрольованої прокатки, так як вони є менш коштовними.

### **Аналіз останніх досліджень і публікацій.**

Візуально, від гарячекатаного швелера холодногнутий швелер відрізняється плавними округленими кутами вигину, однаковою товщиною всіх сторін, гладкою поверхнею (рис.1).

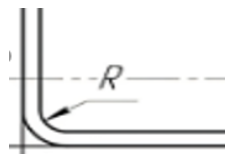


Рисунок 1 – Закруглення між полкою та стінкою у холодногнутому швелері

Різниця між гарячекатаним швелером (з гострими зовнішніми кутами) і гнутим швелером (із округленими кутами) полягає у розподілі металу, що безпосередньо впливає на жорсткість та міцність конструкції.

Основні причини, чому гарячекатаний профіль вважається більш жорстким:

1. Концентрація маси у критичних зонах. У гарячекатаному швелері перехід від стінки до полиці має масивне посилення (внутрішній радіус закруглення при гострих зовнішніх кутах). Це створює жорсткий вузол, який чинить опір деформації. Гарячекатаний має змінну товщину полиці (вона потовщується до основи), що дає додатковий момент інерції. Гнутий має однакову товщину по всьому перерізу. У місці вигину метал навіть трохи розтягується та стоншується.

2. Геометричний момент інерції балки на вигин визначається моментом інерції  $I$ . Чим далі маса металу розподілена від центральної осі перерізу, тим вища міцність. У гарячекатаного швелера «зайвий» метал у кутах максимально віддалений від нейтральної осі. Гострий зовнішній кут дозволяє полиці працювати всією своєю площею, в той час як закруглення гнутого профілю «зрізає» частину корисного перерізу в найважливішому місці.

3. Відсутність початкових напруг. Гнутий профіль виготовляється методом холодної згинання. У кутах виникають значні внутрішні напруження, і структура металу там вже «зіпсована» деформацією. Це знижує опір піковим навантаженням. Гарячекатаний профіль формується при високих температурах, що знімає структурну напругу. Метал виходить більш однорідним та стабільним.

У виробництво зварних труб та конструкцій по закордонним стандартам застосовують наступні сталі [4]:

EN 10025-2 (Вироби гарячекатані з конструкційної сталі. Технічні умови постачання нелегованих конструкційних сталей);

EN 10025-3 (Гарячекатані вироби з конструкційних сталей. Технічні умови постачання нормалізованого прокату зварюваних дрібнозернистих конструкційних сталей);

EN 10025-4 (Гарячекатані вироби з конструкційних сталей. Технічні умови постачання для термомеханічного прокату зварюваних дрібнозернистих конструкційних сталей);

EN 10028-2 (Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Нелеговані та леговані сталі з точно визначеними властивостями за підвищених температур);

EN 10028-3 (Вироби плоскі сталеві для використання під тиском. Нормалізовані зварювані дрібнозернисті сталі );

EN 10028-5 (Вироби плоскі сталеві для використання під тиском).

Порівняння механічні властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі X42 L245, S355 та з сталями K48, K50, K52 які використовують для виробництва зварних труб великих діаметрів , що представлені в таблиці 1 і у таблиці 2 показують на можливість значно збільшити міцність металу холодногнутих швелерів у випадку застосування сталей, наприклад, K48, K50, K52.

Таблиця 1 – Порівняння механічні властивостей вуглецевих сталей за вітчизняною документацією СтЗсп, 20, з європейськими марками сталі (за закордонною документацією) S235, S355 X42 L245 [4].

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості, не менше				
		границя плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	границя міцності, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup> (кгс/мм <sup>2</sup> )	відносне видовження, $\delta_5$ , %	ударна в'язкість	
					KV, J	KCU Дж/см <sup>2</sup>
ДСТУ 9218	СтЗсп	245 (25)	372 (38)	20	-	29
ДСТУ 7809	20	245 (25)	410 (42)	25	-	-
ДСТУ 8943	20	216 (22)	353 (36)	15	-	39,2
ДСТУ EN 10025-2:2022	S235	<b>235</b>	<b>360</b>	26 24	27	-
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355	355	470	22 20	27	-
API Spec 5L	X42 L245	245	415	-	27	-

Таблиця 2 – Порівняння механічних властивостей низьколегованого прокату за вітчизняною та закордонною документацією [4].

Нормативний документ	Марка сталі	Механічні властивості для товщини прокату від 3 мм до 16 мм включно, не менш			
		границя плинності, $\sigma_T$ , Н/мм <sup>2</sup>	границя міцності, $\sigma_B$ , Н/мм <sup>2</sup>	відносне видовження, $\delta_5$ , %	KCV <sub>-50°C</sub> , Дж/см <sup>2</sup> KV <sub>-20°C</sub> , J
ДСТУ 9219:2023	K48	295	471	20	29,4
ДСТУ 9219:2023	K50	343	485	20	29,4
ДСТУ 9219:2023	K52	353	510	20	29,4
ДСТУ EN 10028-2:2018	P355GH	355	<b>510-650</b>	20	27
ДСТУ EN 10025-2:2022	S355JR0 S355J0 S355J2	355	<b>470-630</b>	22 20	27
ДСТУ EN 10025-3:2022	S355N, S355NL	355	<b>470-630</b>	22	<b>40</b>
API Spec 5L	X56 L390	390-545	490-760	$A_f = C \frac{A_{XC}^{0,2}}{U^{0,9}}$	27, 40
API Spec 5L	X60 L415	415-564	520-760		27, 40

Ідея підвищення жорсткості холодногнутого швелера, за рахунок локального нагріву металу в зонах кутів між полкою та стінкою до температури гарячого пластичного деформування і заповнення кута в 90 градусів між полкою та стінкою шляхом осадки полок представлена в роботах [5], [6] (рис.2).

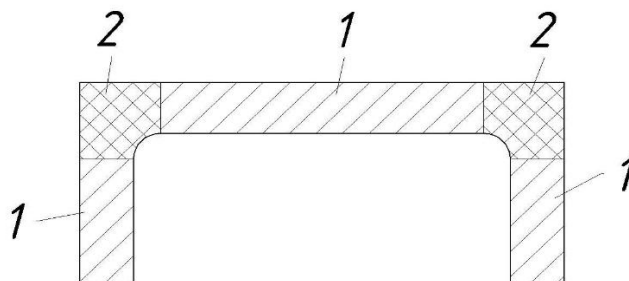


Рисунок 2 – Місце локального нагріву та локальної пластичної деформації швелера: 1 - зона, що не підлягала нагріву і деформації; 2 – зона локального нагріву та деформації.

Механічні властивості металу ділянок, які не були підтвержені нагріву та деформації залишаються незмінні.

**Мета дослідження.** Метою статті є аналіз основних складових пропонованої технології виробництва холодногнутих швелерів з металу, що має достатню зварюваність та підвищену міцність по зрівнянню з гарячекатаним швелером.

**Основний матеріал дослідження.** Сталі листового прокату для труб вітчизняних та закордонних стандартів поставляють за;

- EN 10025-2 (конструкційна),
- EN 10025-3 (нормалізована),
- EN 10025-4 (термомеханічна прокатка),
- EN 10028-2 (підвищені температури),
- EN 10028-3 (нормалізована).

Якісні показники сталей досягають термомеханічною обробкою.

При виробництві кутиків та швелерів важко провести таку обробку. Це обумовлено нерівномірністю охолодження по перетину, складною формою форсунок і питаннями якісної правки профілів.

При вигинанні листа з термомеханічно оброблених сталей виникають проблеми, що пов'язані з їх високою міцністю на напруженім станом:

1. Висока пружинна віддача. Після зняття навантаження метал повертається у вихідне положення. Тож треба значне перегинання і більш точний розрахунок зусилля, та компенсації пружинної віддачі.

2. Підвищене зусилля згинання. Завдяки високій міцності цих сталей потребується більша сила від обладнання. Потрібно більш потужне згинальне обладнання і більш міцний інструмент.

3. Ризик розтріскування та зниження пластичності. При холодному формуванні такі сталі чутливі до концентраторів напруги. При малому радіусі згинання на зовнішній поверхні можливе руйнування матеріалу або поява мікротріщин.

4. Пошкодження поверхні. Внаслідок тиску і тертя на поверхні виникають подряпини, вм'ятини (сліди від інструменту). Це обумовлює використання спеціального інструменту для захисту поверхні.

Є сенс в застосування для виготовлення швелерів марок сталей листового прокату, що застосовують для виготовлення зварних труб великих діаметрів труб вітчизняних

та іноземних стандартів методом холодного згинання з локальним нагрівом та осадкою зон деформації в місцях кутів між полицею та стінкою. При нагріві збільшиться величина зерна металу.

При такій технології буде зміна властивостей при гарячій осадці полок в зонах 2 (рис.2). Термомеханічна обробка створює унікальну дрібнозернисту мікроструктуру, що забезпечує високу міцність. Нагрів металу вище за певну температуру (залежно від марки) руйнує цю структуру. Гаряче формування до заповнення кута а 90 градусів має контролюватись з урахуванням температур, які не повинні перевищувати температуру фазного перетворення металу в зонах 1 (рис.2). Це дозволяє зберегти механічні властивості полиць та стінки.

Додатково можна при закінченні осадки гарячого металу виконати локальну термообробку для отримання мікроструктури з меншою величиною зерна.

Нагрів локальних зон у кутах до 1250 С, та подальша деформація потребує попередньо лише до 5% маси виробу в місцях нагріву і деформації, а 95% перетину зберігає початкові механічні властивості. Також це дозволяє уникнути потоншення металу та запобігати утворенню структурних напружень у місцях деформації. Підвищується супротив швелера на крутіння. Гострий зовнішній кут працює всією своєю площею, на відмінність площі металу у закругленого кута.

У пропонуваній розвинутій технології виготовлення холодногнутого швелера. як приклад, можна застосовувати прокат за стандартами API Spec 5L з сталей X60 L415 та досягати у холодногнутих профілях границь міцності 760 Н/мм<sup>2</sup>.

А у звичайній технології за ДСТУ 2834-94 у виробництві холодногнутих швелерів застосовують низьковуглецеві сталі (сталь 20, чи СтЗсп) з границями міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup>.

Це дає змогу значно зменшувати вагу погонного метра профіля і дозволяє зменшувати кінцеву масу металічних конструкцій.

## ВИСНОВКИ

Низьковуглецеві сталі, що застосовують при виробництві гарячекатаних швелерів не мають вику міцність.

Швелери холодногнуті можна виробляти з низьковуглецевих сталей, отриманих по технології контрольованої прокатки, де покращені якісні показники міцності металу. Це дасть можливість зменшувати масу погонного метра швелера і випускати металоконструкції з меншою масою.

В роботі запропоновано складові розвинутої технології виготовлення холодногнутих профілів на прикладі швелера:

- застосування низьковуглецевих термомеханічно оброблених сталей для листового прокату для труб, де збільшені показники міцності металу;
- підвищення жорсткості профілів за рахунок осадки полок та заповнення прямих кутів металом між полицею та стінкою при застосовуванні локального нагріву у кутах, що мають округлення;
- охолодженням деформованих ділянок для наближення якісних показників металу до механічних властивостей вхідного листа.

Розглянуті проблеми, які виникають при виробництві термомеханічно оброблених сталей.

Як приклад показано, що на теперішній час гнуті швелери виготовляють за ДСТУ 2834-94 з низьковуглецевих сталей (сталь 20, СтЗсп,) з границями міцності 370-410 Н/мм<sup>2</sup>. Виробництво холодногнутого швелера за запропонованою технологією, наприклад, із сталі

X60 L415 за API Spec5L, де границя міцності досягає  $760 \text{ Н/мм}^2$ , дозволить значно зменшити масу погонного метра відносно гарячекатаного швелера.

### Список використаних джерел

1. О. П. Максименко, М. М. Штода, О. В. Нікулін. Основи калібровки прокатних валків: Навчальний посібник. – Кам'янське: ДДТУ, 2023. – 156 с. <https://dspace.mipolytech.education/handle/mip/570>.
2. Ілюкович, Б. М., Нехаев, Н. Е., Меркурьев С. Е., Прокатка и калибровка. В 6 т. Т. 5. – Днепропетровск: Днепро-ВАЛ, 2002. – 482 с. <https://vdoc.pub/documents/5-4on3iio3uk20>.
3. Григоренко В.У., Заболотній О.М. Складові розвитку методів калібрування валків для прокатки швелерів на основі зменшення нерівномірності деформування. Вісник Приазовського державного технічного університету Серія: Технічні науки. 2024 вип. 48. 2024 р. с. 73-82 <https://doi.org/10.31498/2225-6733.48.2024>.
4. Овсяников В.В. До питання застосування закордонних марок сталей для вітчизняних магістральних трубопроводів Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво №30, 2025. ПДТУ. С. 92-99. [doi.org/10.31498/2522-9990302025347108](https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347108).
5. Григоренко В.У., Заболотній О.М. (2024). Стосовно підвищення експлуатаційних властивостей швелерів вироблених способом згинання із смуги або штрипса. Проблеми і перспективи розвитку сучасних технологій в контексті відбудови і сталого розвитку України - 2024 : тези доп. Міжнар. науково-техн. конф. (Дніпро, 28-29 листопада 2024 р) : Навчально-науковий інститут сучасних технологій / ДВНЗ «ПДТУ». – Дніпро: ДВНЗ«ПДТУ», 2024. – 99 с., с.39-40. [https://drive.google.com/file/d/1\\_4lmpQFfJ6Yya2G93905EL60NMdiCCVEv/view](https://drive.google.com/file/d/1_4lmpQFfJ6Yya2G93905EL60NMdiCCVEv/view).
6. Григоренко В.У., Заболотній О.М. Підвищення жорсткості та міцності і забезпечення зварюваності холодногнутих швелерів Міжвузівський тематичний збірник наукових праць. Наука та виробництво №29, 2025. ПДТУ. С. 83-90. <https://doi.org/10.31498/2522-9990292025>.

**Zabolotnii O.M.**

## COMPONENTS FOR CREATING A TECHNOLOGY FOR MANUFACTURING COLD-BENT CHANNELS FROM WELDED STEELS OF HIGH STRENGTH

*There are two types of channel production technology: hot section rolling technology from a square or rectangular billet; cold bending technology of a strip or sheet.*

*In hot section rolling, low-carbon steels that can be welded are mainly used. Such steels do not have high strength.*

*Reducing the metal content of channel structures is an important task. Issues of increasing the strength of channel metal are highly relevant given modern requirements for metal structures.*

*Bent steel channels are bent in places between the flange and the wall. Such a profile has less rigidity compared to hot-rolled channels.*

*The work proposes components of a developed technology for manufacturing cold-bent profiles. The first component is the use of sheet steels from low-carbon thermomechanically treated steels (from controlled rolling), where intensive thermal and mechanical treatment is performed, which allows to increase the strength indicators of the steel. At the same time, the possibility of high-quality welding of such steels remains.*

*For example, bent channels are made of low-carbon steels (steel 20, St3sp,) with strength limits of 370-410 N/mm<sup>2</sup> regulated by DSTU 2834-94, and it is possible to use a sheet according to API Spec 5L steel X60 L415, the strength limit of which reaches 760 N/mm<sup>2</sup>.*

*The second component - for increased rigidity of the bent profile, it is proposed to heat the metal directly in the deformation zones of the corners and deposit the shelf, filling the 90-degree angle between the shelf and the rack. Using this method allows to bring the rigidity of the cold-bent channel closer to the rigidity of the hot-rolled one.*

*The proposed technology allows you to produce a bent channel from welded steels with increased strength. This will reduce the metal content of channel structures.*

**Keywords:** *hot-rolled and cold-bent channels, strength, stiffness, weldability, controlled-rolled steels, local heating, local deformation, reduction in the mass of a linear meter of channel, thermomechanically treated steel.*

*Стаття надійшла 24.03.2026р.*

*Стаття прийнята 27.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

Воденнікова О.С., Воденніков С.А., Піщенко К.А.

## СИНЕРГІЯ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ ТА МАТЕРІАЛОЗНАВСТВА ПРИ СТВОРЕННІ ЗОБРАЖЕНЬ НАНОАРТ: ПЕРСПЕКТИВИ, ПРОБЛЕМИ ТА МОЖЛИВОСТІ

Використання штучного інтелекту (ШІ) в матеріалознавстві відкриває нові можливості для аналізу мікроструктур матеріалів, автоматизованого розпізнавання фазових складових, прогнозування властивостей матеріалів, а також покращення якості мікроскопічних зображень. Застосування таких технологій ШІ має низку переваг, зокрема підвищення точності та об'єктивності аналізу, скорочення часу обробки даних, зменшення впливу людського фактора та забезпечення ефективної обробки великих масивів інформації.

Водночас сучасні цифрові технології та методи обробки зображень створюють нові можливості для розвитку напряму НаноАрт, який поєднує наукову візуалізацію наноструктур із художньою інтерпретацією отриманих зображень. У межах цього напряму особливо виразно проявляється повторюваність форм у природі: структури, що існують на рівні атомів і молекул, нерідко відтворюють контури пейзажів, живих істот, космічних об'єктів, натюрмортів чи інших предметів матеріального світу, засвідчуючи універсальність природних закономірностей.

Сучасні AI-генератори (моделі ChatGPT та Gemini) дозволяють автоматизовано аналізувати та покращувати мікро- і нанозображення, підвищуючи їхню деталізацію, контрастність і художню виразність, що сприяє більш ефективній комунікації наукових даних і створенню естетично виразних візуальних образів мікросвіту.

Можливість експериментувати зі стилями та візуалізацією (наприклад, створювати зображення в 3D-стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших) розкриває нові підходи до художньої інтерпретації мікро- та наноструктур матеріалів, сприяє підвищенню візуальної виразності зображень та розширює можливості популяризації наукових результатів через поєднання елементів науки, цифрового мистецтва і сучасних технологій.

Незважаючи на значний потенціал використання ШІ для створення зображень НаноАрт, науковці стикаються з низкою проблем і обмежень, серед яких є: обмежена наукова точність та ризик викривлення даних, недостатній контроль над мікродеталізацією, можливість надмірної художньої стилізації, залежність від компетенцій автора, освітні та когнітивні ризики, а також питання авторського права та етичні аспекти застосування ШІ в контексті створення зображень НаноАрт.

Отже, синергія штучного інтелекту та матеріалознавства формує новий міждисциплінарний підхід до створення НаноАрт, поєднуючи алгоритмічні методи аналізу й генерації зображень із керуванням структурою та властивостями матеріалів на нанорівні.

**Ключові слова.** матеріалознавство, структура металів і сплавів, цифровізація, цифрова металографія, штучний інтелект, інструменти штучного інтелекту, НаноАрт, стилізація зображень.

**Постановка проблеми.** В сучасних умовах інформатизація освіти виступає ключовим чинником підвищення ефективності освітнього процесу в закладах вищої освіти (ЗВО), забезпечуючи формування цифрової культури, розвитку цифрових компетентностей як

викладачів, так і здобувачів освіти [1]. Завдяки використанню сучасних ІТ-засобів ЗВО можуть забезпечити здобувачам вищої освіти доступ до актуальної інформації, інтерактивний освітній процес та сприяння розвитку наукової діяльності [2]. Саме наукова діяльність здобувачів вищої освіти розширює їх світогляд, виховує потяг до самоосвіти, розвиває мислення, надає уміння спостерігати, аналізувати, творчо інтерпретувати результати інших досліджень [3].

Значний інтерес у науковців викликає цифровізація матеріалознавства, впровадження інструментів та методів ШІ в процесі прогнозування властивостей матеріалів, оптимізації їх складу, моделювання їх структури та проектування матеріалів, що дає змогу підвищити точність наукових досліджень, оптимізувати експериментальні дослідження та суттєво скоротити час розроблення нових матеріалів [4–28].

У цьому контексті особливої актуальності набуває проблема цифрової трансформації підготовки здобувачів освіти, наприклад за спеціальностями G8 «Матеріалознавство» та G10 «Металургія», оскільки впровадження сучасних цифрових рішень змінює зміст освітнього процесу, науково-дослідну роботу та формування професійних компетентностей майбутніх фахівців в умовах глобальної технологічної модернізації. Застосування цифрових двійників технологічних процесів, віртуальних лабораторій і симуляційного моделювання дозволяє здобувачам не лише засвоювати теоретичні знання, а й набувати практичних навичок аналізу структури й властивостей матеріалів, прогнозування поведінки металів і сплавів у різних умовах експлуатації, оптимізації технологічних режимів виробництва. Це особливо важливо в умовах обмеженого доступу до матеріально-технічної бази та під час дистанційного навчання.

Так у **Запорізькому національному університеті** з метою забезпечення цифрової трансформації освітньо-наукового процесу активно впроваджуються сучасні цифрові інструменти, технології цифрової металографії та інформаційно-комунікаційні рішення для дослідження структури й властивостей металів і сплавів, що сприяє підвищенню якості підготовки здобувачів вищої освіти та розширенню можливостей проведення наукових досліджень. Під час дистанційного навчання синергія теоретичних і практичних знань із матеріалознавства з потенціалом цифрових технологій стала основою для розвитку наукових досліджень, присвячених напряму НаноАрт – міждисциплінарній галузі, що поєднує аналіз мікро- та наноструктур матеріалів із їх художньою інтерпретацією засобами цифрової візуалізації та алгоритмів штучного інтелекту.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Напряму НаноАрт відомий у всьому світі як мистецько-науковий феномен, що візуалізує невидимий світ атомів і молекул, відображаючи закономірності природи, які присутні як на макро-, так і на макрорівнях. У цьому контексті НаноАрт демонструє дивовижну повторюваність форм: структури, що існують на рівні атомів, нерідко відтворюють контури пейзажів (рис. 1а, рис. 1б, рис. 1д, рис. 1е), живих істот (рис. 1в), космосу (рис. 1ж), натюрморт (рис. 2в) чи предметів матеріального світу (рис. 2д), засвідчуючи універсальність природних закономірностей.

На конкурсах і виставках науковці з різних країн світу демонструють безліч цікавих і неординарних зображень НаноАрт, які поєднують точність науки та художню уяву, надихаючи глядачів на роздуми про красу природи та технологій:

– конкурсі UNAM NanoArt та NanoPoster [29].

Наприклад, в SEM-зображенні частинок оксидоміду вісмуту кристали природним чином формують сферичні структури з безліччю тонких пластинок, що робить їх схожими на квіти – пухнасті голівки кульбаб, тим самим даючи змогу побачити вражаючий витвір мистецтва – НаноАрт «Молекулярні кульбаби» (рис. 1б).

Природний візерунок жилок листка, завдяки уяві автора, стало можливим побачити в мікроструктурі електроформованих нановолокон полікапролактону, отриманих методом

електроспінінгу (рис. 1д).

НаноАрт «Нано-жоржина» (рис. 1е) ілюструє **самоорганізовану радіальну мікроструктуру нанодрогів оксиду цинку**, сформовану під час процесу кристалічного росту. Нанодроги виростають із одного центру та розходяться назовні, створюючи структуру, що морфологічно нагадує квітку жоржини.



Рисунок 1 – Приклади зображень НаноАрт, представлені на Конкурсі UNAM NanoArt та NanoPoster [29]: а – «Венерина мухоловка в наносвітах» (мікроструктура поліетилентерефталату, покритого колагеном), Фаїті Фуеркаїті (Fajti Ferhati), Білкентський університет, Туреччина; б – «Молекулярні кульбаби» (мікроструктура частинок  $\text{BiOBr}$ ), Сара Самуєї (Sara Serrano), Білкентський університет, Туреччина; в – «Кіт у Нанокраїні» (мікроструктура бактерій, імобілізованих на фільтрувальному папері), Ілкай Чісіл Коксал (Ilkay Cisol Koksal), Білкентський університет, Туреччина; д – «Нано-жилкування» (мікроструктура електроформованих нановолокон полікапролактону), Аслі Челебіоглу (Ashi Çelebioğlu), Білкентський університет, Туреччина; е – «Нано-жоржина» (мікроструктура нанодрогів  $\text{ZnO}$ ), Зейнеп Джемре Орсел (Zeynep Cemre Örsel), Близькосхідний технічний університет, Туреччина; ж – «Нановсесвіт» (мікроструктура мікрогелю), Аслі Гізем Чинар і Еджем Ердоган (Ashi Gizem Çinar, Esem Erdoğan), Білкентський університет, Туреччина – міжнародному фестивалю наномистецтва (The International Festival of NanoArt) [30], організованому NanoArt 21 та Академією наномистецтва (The Academy of NanoArt).

Найвідомішою картиною засновника напряму НаноАрт, вченого-фізика Кріса Орфеску, є НаноАрт «Уламки» [31], яка створена на основі зображення колоїдної частинки графіту, зануреної в рідкий азот за температури  $-196\text{ }^{\circ}\text{C}$ , із використанням техніки Digital Faux (рис. 2а).

Використовуючи Adobe Illustrator, Photoshop та Painter А. Джон Валуа створює свій відомий НаноАрт «Розкриваючи таємниці наносфери» (рис. 2б) [32]. Представлене зображення формує симетричну композицію, у якій можна умовно розпізнати образ фантастичного обличчя. Це ілюструє поєднання наукової візуалізації наноструктур із художнім сприйняттям складних морфологічних форм.

– міжнародному конкурсі наукових зображень НаноАртографія (NanoArtography) [33].

На сканувальному електронному мікрознімку відображена хитромудра краса травленого алюмінію, що нагадує стійку квітку, що пережила надзвичайно суворі умови навколишнього середовища (рис. 2в). Травлений алюміній, оброблений водним розчином нітрату цинку та аміаку, демонструє унікальну структуру, що символізує міцність та виживання у складних умовах. Ширина зображення складає  $0,014\text{ мм}$  [34].

– міжнародному конкурсі «Наука як мистецтво» (Science as Art), що проводиться Товариством дослідження матеріалів (Materials Research Society) [35].

Наприклад, у чорно-білих наноструктурах ZnO на скляній підкладці, покритій оксидом індію, осаджені при температурі  $70\text{ }^{\circ}\text{C}$  із використанням простого методу електрохімічного осадження, можна умовно розпізнати образ, подібний до ведмежа Тедді (рис. 2д) [36]. Таке поєднання матеріалознавства та образу відомого дитячого персонажа дає змогу наочно продемонструвати особливості морфології наноструктур і водночас підкреслити здатність людського сприйняття знаходити знайомі форми у складних мікро- та нанорозмірних структурах.

– міжнародному онлайн-конкурсі NanoArt K12 (NanoArt K12 International Online Competition) [37].

Специфічна морфологія кристалів оксиду цинку нагадує пелюстки троянд (рис. 2е) [38], які так і хочеться понюхати та відчутти, адже їхня ніжна структура вражає своєю симетрією та гармонією, перетворюючи наноскопічні утворення на справжні мініатюрні витвори мистецтва.

– щорічному конкурсі візуалізації матеріалів (MVC), який спонсорує кафедра матеріалознавства та інженерії (MatSE) та Інститут досліджень матеріалів (MRI) [39].

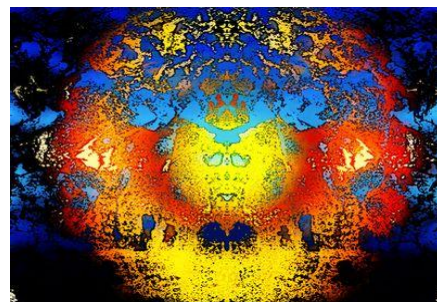
Мікроструктура триоксиду молібдену з орторомбічною кристалічною структурою після художньої обробки нагадує зображення зірок, що світяться, та створює НаноАрт «Комета Моллі: орторомбічні кристали триоксиду молібдену з космосу» (рис. 2ж) [40] вражаюче схоже на деяких з найдивовижніших мешканців нічного неба. Зелено-фіолетове забарвлення «хвоста комети» досягається за рахунок поляризаційної лінзи, прикріпленої до оптичного мікроскопа, у поєднанні з різною орієнтацією оксиду. Фон зображення, здавалося б нецікавим, при найближчому розгляді набуває додаткової інтриги, оскільки дефекти сапфірової підкладки посилюють космічний відтінок твору.

– та інших виставках та конкурсах.

Серед українських робіт, присвячених створенню зображень НаноАрт слід виділити роботи [41–45]. Особливої уваги заслуговує НаноАрт «Блискавка перемоги», який показує, як у кристалах на поверхні фосфіду індію можна розгледіти форму блискавки (рис. 3а) [42]. За задумом авторів, цей НаноАрт представляє очікуване звільнення українських територій і вирішальну перемогу над агресорами. Структура фосфіду індію служить потужною метафорою для вражаючого та швидкого правосуддя, яке чекає, втілюючи сяючу надію на майбутнє.



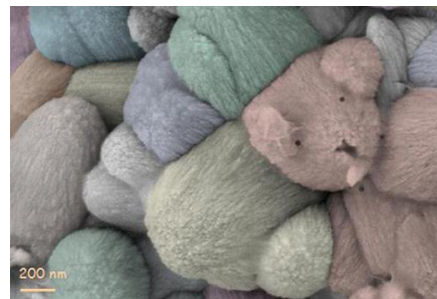
а



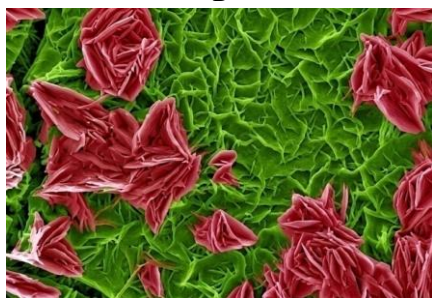
б



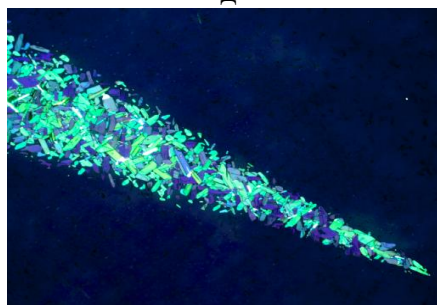
в



д



е



ж

Рисунок 2 – Приклади зображень НаноАрт авторів з різних країн світу: а – «Уламки» («In Pieces»), Кріс Орфеску (Cris Orfescu), NanoArt 21, США [31]; б – «Розкриваючи таємниці наносфери» («Uncovering the Nanosphere»), А. Джон Валуа (A. John Valois), Університет Південної Кароліни, США [32]; в – «Натюрморт» («Still Life»), Мехран Мірмохаммаді (Mehran Mirmohammadi), Університет Аалто, Фінляндія [34]; д – «Нановедмідь Тедді» («Nanobear Teddy»), Хелія Джалілі (Helia Jalili), Університет Ватерлоо, Канада [36]; е – «Рожевий сад» («Rose-garden»), Нгуєну Гігерту (Nguyen Giegert), США [38]; ж – «Комета Моллі: орторомбичні кристали триоксиду молібдену з космосу» («Molly's Comet: Orthorhombic Molybdenum Trioxide Crystals from Outer Space»), Саїд Альмішал (Saeed Almishal), Пенсильванський державний університет, США [40]

Ще один український НаноАрт, який асоціюється з вірою в перемогу, світле майбутнє, відновлення України та народження нового покоління, – «Соняшники» (рис. 36) [43]. У взятій за основу доєвтектичній структурі, отриманій шляхом переплавлення та науглецювання в рідкому стані (перліт і трансформований ледебурит), автори впізнають жовті квіти – соняшники.

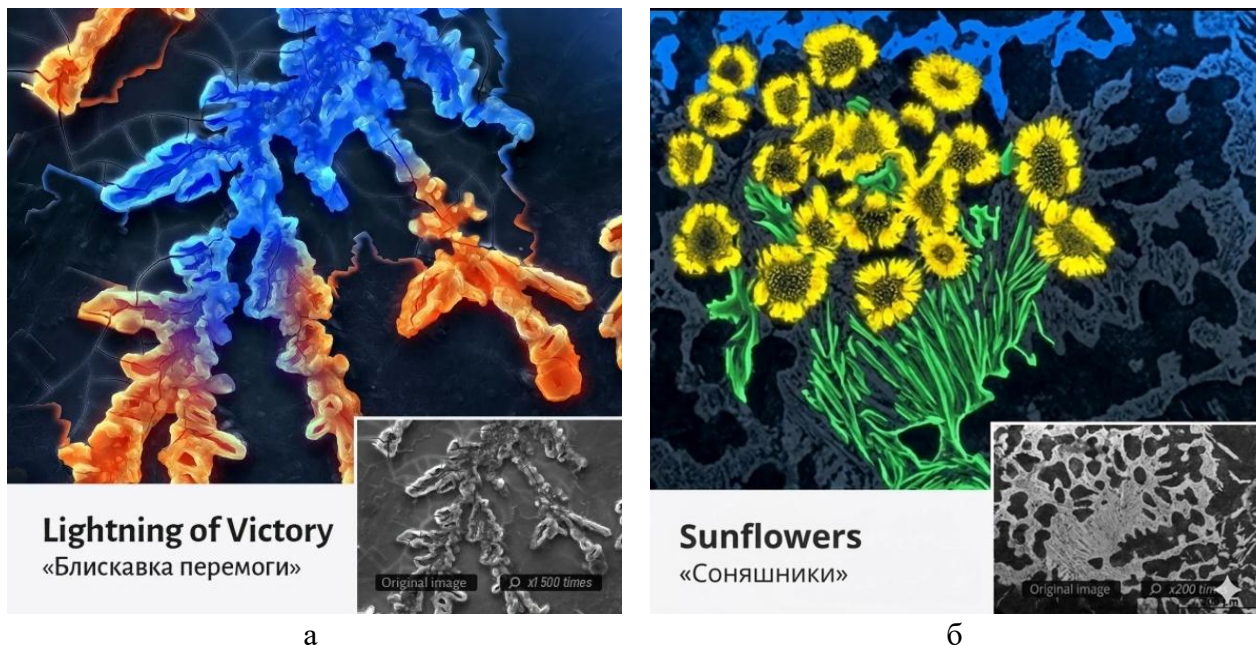


Рисунок 3 – Приклади зображень НаноАрт українських науковців: а – «Блискавка перемоги», Бердянський державний педагогічний університет [42]; б – «Соняшники», Запорізький національний університет та Національний університет «Запорізька політехніка» [43]

Отже, аналіз сучасних публікацій у сфері НаноАрт показує, що в якості об'єкту наукового дослідження та художньої візуалізації можуть бути різноманітні мікро- та наноструктури, що дає змогу розкрити естетичний потенціал невидимих фрагментів матеріального світу та поєднувати фундаментальні наукові дані з художньою експресією.

Водночас такий підхід сприяє **подальшому** поглибленню наукового розуміння структурних особливостей матеріалів і **суттєво** розширює можливості їх інтерпретації у контексті **сучасного** матеріалознавства.

**Мета дослідження.** Дослідити теоретичні та практичні засади синергії штучного інтелекту й матеріалознавства для створення візуалізацій зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів, визначити ефективність інтеграції генеративних алгоритмів у процес обробки мікроструктурних зображень та розробити рекомендації щодо їх раціонального використання із збереженням наукової достовірності.

**Основний матеріал дослідження.** Інтеграція ШІ у сферу матеріалознавства формує нові міждисциплінарні підходи до інтерпретації та візуалізації мікроструктур металів і сплавів. У цьому контексті особливий інтерес становить створення зображень НаноАрт, що поєднує науковий аналіз із цифровими технологіями генеративної обробки даних. З метою систематизації та порівняльного аналізу можливостей зазначених підходів доцільним є узагальнення їх функціональних характеристик і практичної результативності.

Узагальнені данні ефективності різних цифрових інструментів для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів представлені в таблиці 1. Аналіз представлених даних таблиці 1 свідчить про те, що визначення оптимальної технології цифрової обробки зображень наноструктур є детермінованим і залежить від кінцевої мети дослідження або творчого проєкту:

Таблиця 1 – Порівняння ефективності цифрових інструментів для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів

№ п/п	Параметр	Цифрові інструменти			
		Графічні редактори	3D-моделювання	Спеціалізований софт для мікроскопії	AI-генератори
1	Час створення	Від кількох годин до днів на ретельне розфарбовування.	Тривалий процес через необхідність побудови топології за знімком.	Мінімальний, оскільки обробка відбувається в реальному часі або відразу після зйомки.	Секунди або хвилини на генерацію/стилізацію.
2	Гнучкість	Висока у плані корекції кольору та нашарування ефектів.	Максимальна у зміні освітлення та ракурсів «металевої» сцени.	Низька, обмежена інструментами математичного аналізу поверхні.	Висока у варіативності стилів, але важко контролювати деталі.
3	Передача кольорів	Повністю суб'єктивна, художня інтерпретація автора.	Базується на фізично коректному рендерингу (PBR) металів.	Псевдоколювання на основі інтенсивності сигналу або висоти рельєфу.	Залежить від тренувальних даних та промпту.
4	Складність використання	Середня, потребує навичок цифрового малювання.	Висока, вимагає знання принципів тривимірної геометрії.	Потребує спеціальної технічної підготовки оператора мікроскопа.	Низька, достатньо текстового запиту або базового зображення.
5	Рівень деталізації	Обмежений роздільною здатністю вихідного мікрознімка.	Залежить від кількості полігонів у моделі структури.	Найвищий (атомно-молекулярний рівень), фіксує реальну текстуру металу.	Висока візуальна деталізація, яка може бути ілюзорною («артефакти»).
6	Реалістичність зображення	Висока художня реалістичність.	Фотореалістична імітація фізичних властивостей сплавів.	Документальна точність (відображення реальної наноструктури).	Гіперреалістична, але часто науково недостовірна.
7	Можливості масштабування	Обмежені піксельною сіткою (растром).	Необмежені (векторна природа 3D-об'єктів).	Обмежені технічними характеристиками лінз та детекторів.	Висока завдяки вбудованим алгоритмам апскейлінгу.
8	Рівень автоматизації процесу	Низький, переважно ручна праця.	Середній (використання процедурних текстур).	Високий у частині збору та первинної фільтрації даних.	Максимальний, процес майже повністю автономний.
9	Можливості інтеграції з іншими технологіями	Добре інтегрується з будь-якими медіа-форматами.	Можливість експорту для VR/AR візуалізацій структур.	Інтеграція з базами даних кристалографії та CAD-системами.	Можливість використання як плагіна в графічних редакторах.
10	Доступність для користувача	Загальнодоступне програмне забезпечення (ПЗ). Є безкоштовні аналоги.	Доступно (Blender безкоштовний), але високий поріг входу.	Низька, ПЗ часто прив'язане до дорогого обладнання (SEM/AFM).	Висока, через хмарні сервіси та відкриті моделі.
11	Вартість	Від безкоштовних варіантів до підписки (\$20-50/міс).	ПЗ безкоштовне, але потребує потужного апаратного забезпечення.	Дуже висока (входить у вартість мікроскопа - сотні тисяч доларів).	Від безкоштовних лімітів до платних API-запитів.

– за критерієм наукової достовірності та прецизійності, безумовне лідерство належить

спеціалізованому софту для мікроскопії (Gwyddion, MountainsMap, ImageJ (Fiji), SmartSEM/Velox та інші), оскільки лише він забезпечує документальну точність передачі морфології структур металів та сплавів на нанорівні.

– у контексті художньої виразності та гнучкості маніпуляцій, найбільш ефективними є графічні редактори (Adobe Photoshop, GIMP або Affinity Photo), які дозволяють автору здійснювати повний контроль над колористикою та композицією.

– з точки зору технологічного прогресу та швидкості обробки, домінують AI-генератори (Midjourney, Stable Diffusion, DALL-E 3 (інтегрований у ChatGPT), Adobe Firefly (вбудований у Photoshop), Gemini (модель Nano Banana/3 Flash)), що демонструють найвищий рівень автоматизації, тоді як 3D-моделювання (Blender, Maya) є оптимальним для задач інтерактивного масштабування та створення об'ємних симуляцій.

На основі узагальнення практичного досвіду застосування технологій штучного інтелекту у процесі створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів було визначено та систематизовано їх основні переваги:

1. Інтелектуальне масштабування та реставрація (Upscaling).

Використання нейронного відновлення зображень дозволяє підвищувати роздільну здатність мікроструктур, ефективно усуваючи цифрові шуми та артефакти. Це забезпечує точне відтворення дрібних елементів нанорельєфу та дає «друге життя» старим зображенням структур матеріалів.

Так, наприклад, під час покращення якості зображення мікроструктури сформованого шару термітного сплаву на основі хрому, отриманого методом самопоширюваного високотемпературного синтезу (СВС) (рис. 4а), за допомогою алгоритмів генеративного штучного інтелекту (зокрема моделі Gemini 3) спостерігається підвищення чіткості, деталізації та контрастності зображення (рис. 4б). Відновлене зображення характеризується кращою візуалізацією структурних елементів, тоді як початкове зображення має ознаки розмитості та нижчу насиченість кольорів.

З використанням моделі ChatGPT5.2 зображення мікроструктури трубної заготовки сталі 15X1M1Ф (рис. 4в) стає більш чітким, оскільки прибираються оптичні шуми, артефакти розфокусування та надлишкова зернистість фону (рис. 4д).

Використання штучного інтелекту для реставрації архівних мікрофотографій та знімків структур матеріалів (рис. 4е) відкриває нові можливості для матеріалознавства: це не просто «косметичний ремонт» зображення (рис. 4ж), а інструмент відновлення втрачених наукових даних.

2. Висока швидкість генерації та автоматизація обробки.

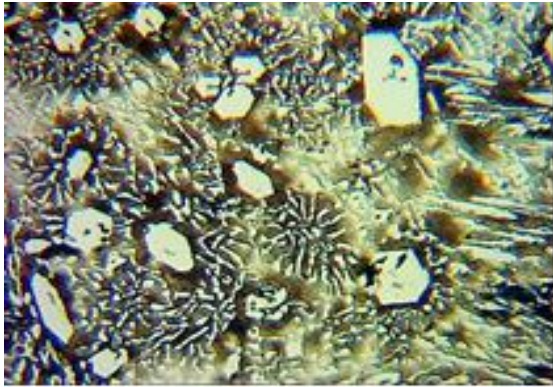
Штучний інтелект дозволяє обробляти складні мікроскопічні структури (SEM, TEM, AFM) за лічені хвилини. Це мінімізує вплив людського фактора та значно прискорює цикл наукових досліджень, перетворюючи рутинну роботу на динамічний творчий процес.

Так, безпосередньо чорно-білий знімок мікроструктури сірого чавуну з пластинчастим графітом, отриманий методом електронної мікроскопії (рис. 5а), після обробки сучасними цифровими інструментами (за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop та AI-генераторів – моделей ChatGPT і Gemini) проходить етапи усунення шумів і дефектів зображення, структурної деталізації, цифрового підвищення контрастності та візуальної трансформації, у результаті чого набуває ознак художнього образу НаноАрт «Колібрі» (рис. 5б – рис. 5е). Колібрі як найменший птах на планеті в зображенні НаноАрт уособлює мікроскопічний масштаб структурних елементів матеріалу, підкреслюючи складність, витонченість і приховану енергію мікросвіту металів і сплавів.

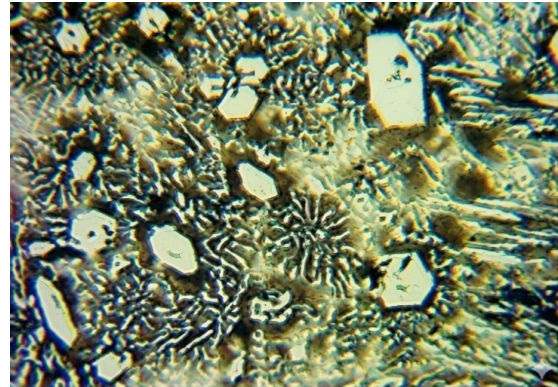
3. Можливість експериментувати зі стилями та візуалізацією.

AI-генератори дають змогу застосовувати широкий спектр візуальних стилізацій

зображень (наприклад, в 3D стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших), підкреслюючи унікальну форму та морфологію об'єктів. Це дозволяє адаптувати науковий контент під різні формати – від академічних презентацій до виставок сучасного мистецтва.



а



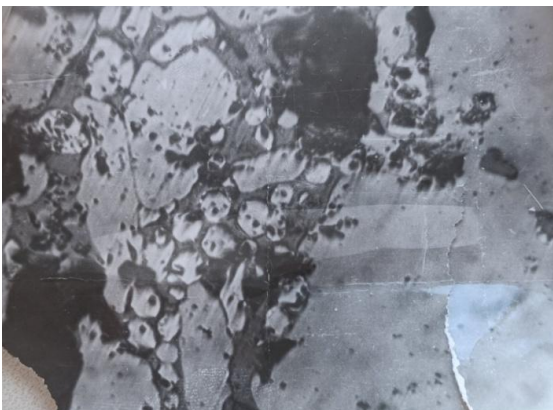
б



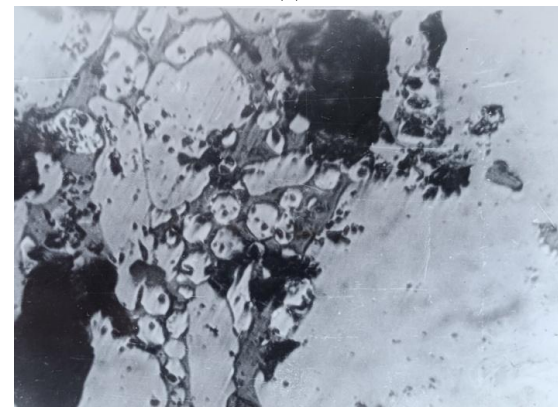
в



д



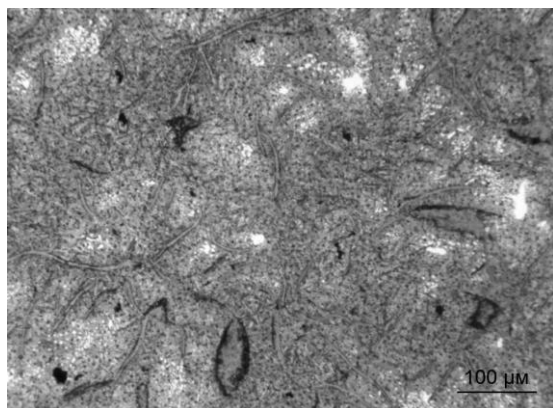
е



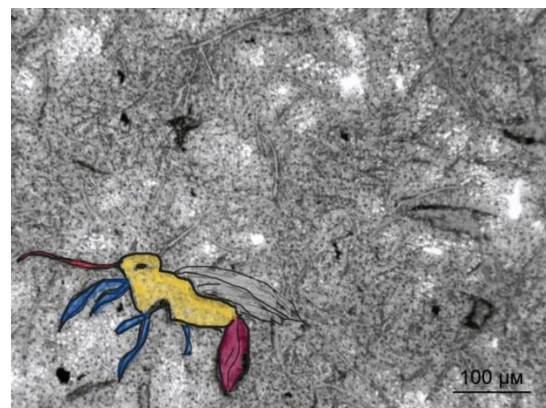
ж

Рисунок 4 – Механізм покращення якості зображень старих мікроструктур металів і сплавів із застосуванням інтелектуальних систем на основі штучного інтелекту:

а, б – мікроструктура формування шару термітного сплаву на основі хрому при СВС-процесі (зразок з травленням) [46] до та після покращення якості за допомогою моделі Gemini 3; в, д – мікроструктури трубної заготовки сталі 15X1M1Ф до та після покращення якості за допомогою моделі ChatGPT5.2; е, ж – мікроструктура високохромистого чавуну в литому стані до та після реставрації за допомогою моделі Gemini 3



а



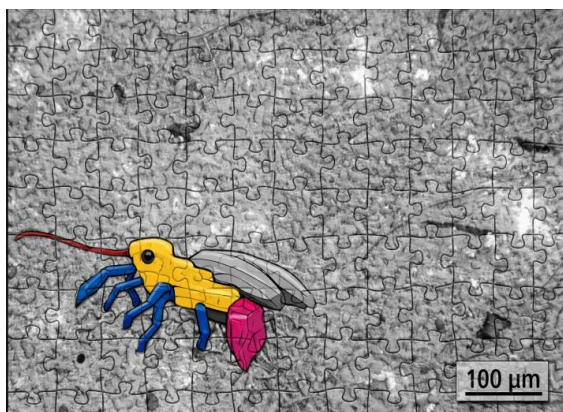
б



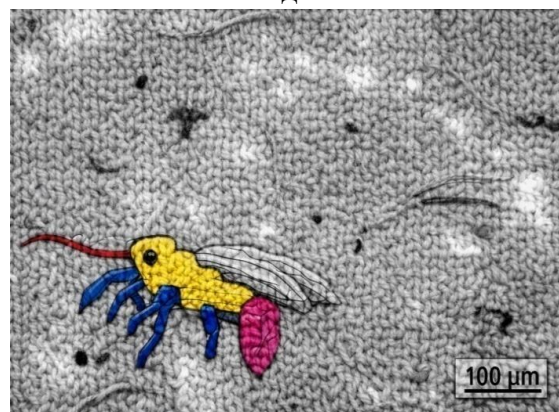
в



д



е



ж

Рисунок 5 – НаноАрт «Колібрі»: а – вихідна мікроструктура сірого чавуну з пластинчастим графітом; б – НаноАрт, створений за допомогою графічного редактора Adobe Photoshop; в – НаноАрт, створений за допомогою Gemini 3; д – НаноАрт, створений в стилі 3D за допомогою моделі ChatGPT5.2; е – НаноАрт, створений в стилі пазлів за допомогою моделі Gemini 3; ж – НаноАрт, створений у в'язаному стилі за допомогою моделі Gemini 3

Застосування 3D-ефектів, об'ємного моделювання та світлотіньових акцентів у межах концепції НаноАрт трансформує пласку мікроструктурну схему у візуально відчутний просторовий образ (рис. 5г). Гармонійно підібрана кольорова гама, асоційована з яскравим оперенням колібрі, підсилює художню виразність композиції та формує ефект нано-скульптури, надаючи зображенню статусу унікального цифрового експоната.

Візуальна стилізація у форматі пазлів (рис. 5д) створює відчуття мозаїчної цілісності та

композиційної взаємозалежності елементів, де кожен фрагмент виступає окремою структурною складовою, що органічно інтегрується у загальну систему зображення. Такий підхід формує уявлення про складний об'єкт як про сукупність взаємопов'язаних частин, які, поєднуючись, утворюють завершену візуальну конфігурацію. Крім того, використання естетики пазлів підкреслює багаторівневу організацію структури об'єкта, створюючи візуальну метафору складності, взаємозв'язку та гармонійної взаємодії між науковим пізнанням і художнім осмисленням.

Створення НаноАрту у в'язаному стилі (рис. 5е) дозволяє інтерпретувати мікроструктуру матеріалу як систему взаємопов'язаних «ниткоподібних» елементів, що

формують цілісне структурне полотно, поєднуючи наукову візуалізацію складних морфологічних особливостей із художньою метафорою взаємодії та безперервності структурних компонентів.

#### 4. Сприяння розвитку креативного та критичного мислення.

Процес створення НаноАрту стимулює пошук нових візуальних метафор у матеріалознавстві. Водночас це розвиває навички верифікації даних, адже дослідник повинен постійно оцінювати достовірність згенерованих результатів, щоб художня обробка не викривила наукову суть структури.

Застосування технологій штучного інтелекту у створенні зображень НаноАрт супроводжується також і сукупністю проблем і обмежень, що потребують системного аналізу та врахування, особливо в межах освітньої діяльності та науково-мистецькому контексті:

##### 1. Обмежена наукова точність та ризик викривлення.

Згенеровані зображення не завжди відповідають реальним фізичним та хімічним властивостям наноструктур. Це призводить до спотвореного уявлення про об'єкти, особливо коли алгоритми створюють недостовірні інтерпретації (артефакти генерації), додаючи неіснуючі деталі або ігноруючи реальні пропорції та масштаби зображення.

##### 2. Обмежений контроль над мікродеталізацією

Більшість сучасних генеративних моделей оперують художніми стилями в цілому, не дозволяючи досліднику здійснювати прецизійне (точкове) керування окремими елементами структури. Це призводить до того, що під час стилізації специфічні фази металів чи сплавів (наприклад, голчасті чи пластинчасті структури) можуть бути помилково згладжені або викривлені. У професійному НаноАрті це є критичним недоліком, оскільки втрачається ідентифікація конкретного матеріалу, а художня обробка починає суперечити його фізичній морфології.

##### 3. Ризик надмірної художньої стилізації.

Використання популярних візуальних стилізацій зображень несе ризик надмірної художньої обробки. Без належного балансу між естетикою та достовірністю наукова цінність мікроснімка нівелюється, перетворюючи його на суто декоративний елемент.

Наприклад, художня стилізація НаноАрт «Колібри» у стилі кіберпанк (рис. 6а) ускладнює сприйняття основної ідеї створення НаноАрт на основі структур металів та сплавів, відбувається «загубленість» концепту, тобто ставить акцент на ефектності, а не на смислі зображення. Унаслідок цього наукова складова зображення відходить на другий план, тоді як домінуючим стає декоративний візуальний ефект.

В свою чергу надмірна стилізація (рис. 6б) викривлює сприйняття реальних об'єктів мікросвіту, перетворюючи їх на декоративні елементи. Якщо на оригінальному мікроснімку (рис. 5а) колір та текстура фаз відображали їхній хімічний склад та фазовий стан, то тут вони замінені на яскраві, неприродні відтінки та спрощені форми. Порушення масштабів та ігнорування метричних параметрів спотворює просторове уявлення про справжні розміри структурних складових зображення. Така художня інтерпретація позбавляє зображення

інформативності та може призвести до невірних висновків про морфологію та фазовий склад матеріалу.

#### 4. Питання авторського права та етики.

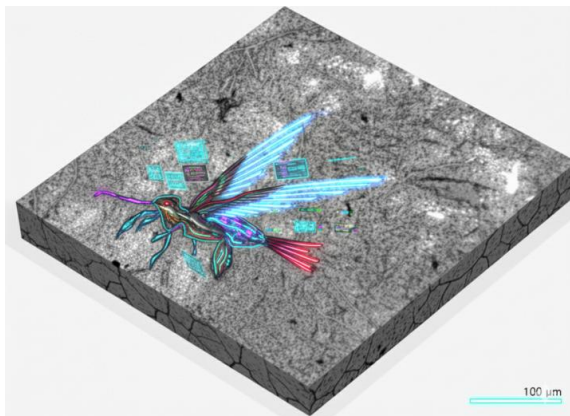
Гостро постають питання авторського права, прозорості використання навчальних даних та коректного зазначення внеску людини і ШІ. Крім того, технічні обмеження платформ щодо роздільної здатності, форматів експорту та можливостей подальшого редагування часто стають на заваді отриманню професійного результату.

#### 5. Залежність від компетенцій користувача (Prompt Engineering).

Якість кінцевого результату залежить від майстерності формулювання промпту (стиль, колір, ефекти, мета). Це вимагає від дослідника додаткових навичок цифрової грамотності, без яких ефективно використання ШІ неможливе.

#### 6. Освітні та когнітивні ризики.

Неконтрольоване використання AI-генераторів створює загрозу зниження рівня аналітичного мислення та творчої самостійності користувача, замінюючи глибоке дослідження морфології поверхневим генеративним підбором варіантів.



а



б

Рисунок 6 – НаноАрт «Колібрі», створений з надмірною художньою стилізацією:  
а – НаноАрт, створений у стилі кіберпанк в 3D-ізометрії за допомогою моделі Gemini 3;  
б – НаноАрт, створений в стилі 3D за допомогою моделі ChatGPT5.2

Отже, НаноАрт на основі структур металів та сплавів є перспективним інструментом візуалізації, який дозволяє трансформувати складні мікроструктурні зображення у виразні художні образи. Проте для збереження наукової достовірності дослідникам-матеріалознавцям рекомендується дотримуватися концепції помірної стилізації, де художні засоби (колірна сегментація, вітражна техніка) спрямовані на акцентування морфології фаз та топології міжзеренних меж без спотворення їхньої геометрії. Встановлено, що надмірна стилізація формує у глядача уявлення про зображення як про продукт цифрового дизайну, а не як про візуалізацію реальних мікроструктур, сформованих у процесі кристалізації та фазових перетворень у металах і сплавах. Така інтерпретація послаблює пізнавальну цінність НаноАрт і знижує його роль як засобу популяризації матеріалознавства, адже наукова основа зображення втрачає свою очевидність для спостерігача. У зв'язку з цим рекомендується раціональне використання технологій штучного інтелекту для створення та обробки зображень НаноАрт, спрямоване на дотримання академічної доброчесності, розвитку цифрових компетентностей та забезпечення наукової достовірності результатів освітньої діяльності.

Перспективи подальших досліджень включають розробку методів застосування

штучного інтелекту для автоматизованого відновлення архівних фотографій мікроструктур металів та сплавів, створення алгоритмів художньої інтерпретації наноструктур на основі даних електронної мікроскопії, а також формування цифрових платформ і баз даних для зберігання та аналізу зображень НаноАрт.

## ВИСНОВКИ

Використання цифрових технологій є невід'ємним етапом у процесі створення зображень НаноАрт, оскільки вони дозволяють точно відтворювати наноструктури та складні деталі, які недоступні для спостереження неозброєним оком. Ці інструменти забезпечують ефективну обробку наукових даних, моделювання текстур і кольорових композицій, а також відкривають широкі можливості для творчого експериментування. Завдяки цифровій візуалізації НаноАрт поєднує наукову точність із художньою уявою, створюючи високоякісні та інноваційні образи. Крім того, застосування таких технологій сприяє популяризації науки, дозволяючи глядачам усвідомити красу та складність невидимого світу атомів і молекул.

На основі комплексного аналізу виявлених переваг і недоліків застосування технологій штучного інтелекту у процесі створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів та сплавів сформульовано науково обґрунтовані рекомендації щодо їх етичного та раціонального використання, орієнтовані на забезпечення принципів академічної доброчесності, розвиток цифрових компетентностей та досягнення наукової достовірності результатів освітньої діяльності.

Сучасні генеративні системи штучного інтелекту (зокрема моделі ChatGPT та Gemini) надають можливість здійснювати автоматизований аналіз та покращення мікро- і нанозображення металів та сплавів, а також реставрацію архівних знімків мікроструктур металів і сплавів, підвищуючи їхню деталізацію, контрастність і художню виразність, що сприяє більш ефективній комунікації наукових даних і створенню естетично виразних візуальних образів мікросвіту.

Можливість експериментування з різними художніми стилями та способами візуалізації (наприклад, створювати зображення в 3D-стилі, у стилі LEGO, порцеляновому стилі, в'язаному стилі, стилі пазлів та інших) відкриває нові підходи до художньої інтерпретації мікро- та наноструктур матеріалів. Такий підхід підсилює візуальну виразність наукових зображень і водночас розширює можливості популяризації наукових результатів шляхом інтеграції елементів науки, цифрового мистецтва та сучасних інформаційних технологій.

Синергія штучного інтелекту та матеріалознавства відкриває нові міждисциплінарні можливості для створення та обробки зображень НаноАрт на основі структур металів і сплавів, поєднуючи наукову достовірність мікроструктурного аналізу з інструментами цифрової візуалізації та генеративного моделювання. Використання алгоритмів штучного інтелекту дає змогу здійснювати обробку, інтерпретацію та художню трансформацію зображень реальних металографічних структур без втрати їх фізичної сутності, що сприяє популяризації матеріалознавства та формуванню нового формату представлення наукових результатів.

### *Список використаних джерел*

1. Shargorodskiy S.A. Comparative analysis of the implementation of information technologies in higher education institutions of the Czech Republic and Ukraine / S.A. Shargorodskiy // Actual Issues of Modern Science. European Scientific e-Journal. – 2025. – No. 38. – pp. 165–175. –

<http://doi.org/10.47451/tec2025-09-05>

2. Левківська Л.В. Використання інформаційних технологій у вищій школі / Л.В. Левківська, С.А. Левківський // Наукові записки Малої академії наук України. – 2024. – №1(29). – С. 57–66. – <http://doi.org/10.51707/2618-0529-2024-29-07>
3. Варава І.М. Особливості науково-дослідницької діяльності студентів як суб'єктів вищої освіти / І.М. Варава // Сучасні інформаційні технології та інноваційні методики навчання в підготовці фахівців: методологія, теорія, досвід, проблеми. – 2018. – Вип. 52. – С. 247–250. – [http://nbuv.gov.ua/UJRN/mitimpt\\_2018\\_52\\_60](http://nbuv.gov.ua/UJRN/mitimpt_2018_52_60)
4. Computational Technologies in Materials Science / Edited By S. Tayal, P. Singla, A. Nandi, J.P. Davim. 1st Edition. – 2021. – CRC Press. – 250 p. – <https://doi.org/10.1201/9781003121954>. – ISBN 9780367640583
5. Digitalisation of material science – Improving product design in the context of Industry 4.0 / Pascoal-Faria P., da Silva D.P., Mateus A., Mitchell G.R. // *Materials Today: Proceedings*. – 2023. – <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2023.06.237>
6. Цифровізація матеріалознавства й напрями використання штучного інтелекту / Ю.Г. Ковальов, В.В. Аулін, С.Г. Ковальов та ін. // Вісник Харківського національного автомобільно-дорожнього університету. – 2025. – №. 111. – С. 67–74. – <https://doi.org/10.30977/BUL.2219-5548.2025.111.0.67>
7. Штучний інтелект у матеріалознавчих дослідженнях: тенденції, інструменти та трансформації / Ю.Г. Ковальов, В.В. Аулін, С.Г. Ковальов та ін. // Центральнотраїнський науковий вісник. Технічні науки. – 2025. – Вип. 12(43). – Ч. II. – С. 134–141. – [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12\(43\).2.134-142](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.12(43).2.134-142)
8. Пашинська О.Г. Штучний інтелект у матеріалознавстві: зміни у відкритті та розробці матеріалів / О.Г. Пашинська, А.В. Завдовесєв // Науковий Журнал Метінвест Політехніки. Серія: Технічні науки. – 2025. – № 5. – С. 152–164. – <https://doi.org/10.32782/3041-2080/2025-5-17>
9. Абрамович А.О. Застосування штучного інтелекту для ідентифікації металів вихрострумовою системою / А.О. Абрамович, Є.О. Зайцев, В.О. Піддубний // Scientific Collection «InterConf+». Theory and Practice of Science: Key Aspects: Proceedings of the 8th International Scientific and Practical Conference (July 19–20, 2023, Rome, Italy). – 2023. – № 35(163). – С. 287–298. – <https://doi.org/10.51582/interconf.19-20.07.2023.028>
10. Dimiduk D.M. Perspectives on the Impact of Machine Learning, Deep Learning, and Artificial Intelligence on Materials, Processes, and Structures Engineering / D.M. Dimiduk, E.A. Holm, S.R. Niezgodna // Integrating Materials and Manufacturing Innovation. – 2018. – Vol. 7. – pp. 157–172. – <https://doi.org/10.1007/s40192-018-0117-8>
11. Goswami L. Artificial Intelligence in Material Engineering: A Review on Applications of Artificial Intelligence in Material Engineering / L. Goswami, M.K. Deka, M. Roy // *Advanced Engineering Materials* (11 April 2023). – 2023. – Vol. 25. – Issue 13. – <https://doi.org/10.1002/adem.202300104>
12. Artificial intelligence: A powerful paradigm for scientific research / Y. Xu, X. Liu, X. Cao et al. // *The Innovation*. – 2021. – Vol. 2. – Issue 4. – 100179. – <https://doi.org/10.1016/j.xinn.2021.100179>
13. Exploring Elastoplastic Constitutive Law of Microstructured Materials Through Artificial Neural Network – A Mechanistic-Based Data-Driven Approach / H. Yang, H. Qiu, Q. Xiang et al. // *Journal of Applied Mechanics*. – 2020. – Vol. 87. – Issue 9. – <https://doi.org/10.1115/1.4047208>
14. Wang K. Meta-modeling game for deriving theory-consistent, microstructure-based traction–separation laws via deep reinforcement learning / K. Wang, W. Sun // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2019. – Vol. 346. – pp. 216–241. –

<https://doi.org/10.1016/j.cma.2018.11.026>

15. Artificial intelligence and machine learning in design of mechanical materials / Guo K., Yang Z., Yu C.-H., Buehler M.J. // *Materials Horizons*. – 2021. – No. 8. – pp. 1153–1172. – <https://doi.org/10.1039/d0mh01451f>

16. Kumar A. Recent progresses on high entropy alloy development using machine learning: A review / A. Kumar, N.K. Mukhopadhyay, T.P. Yada // *Computational Materials Today*. – 2025. – Vol. 8. – 100038. – <https://doi.org/10.1016/j.commt.2025.100038>

17. When Machine Learning Meets 2D Materials: A Review / B. Lu, Y. Xia, Y. Ren et al. // *Advanced Science*. *Open Asses.* – 2024. – Vol. 11. – Issue 13. – 2305277. – <https://doi.org/10.1002/advs.202305277>

18. Artificial intelligence can recognize metallic glasses in vast compositional space with sparse data / W. Xie, Y. Sun, C. Wang et al. // *npj Computational Materials*. – 2025. – Vol. 11. – 254. – <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01753-9>

19. Divide and conquer: Machine learning accelerated design of lead-free solder alloys with high strength and high ductility / Q. Wei, B. Cao, H. Yuan et al. // *npj Computational Materials*. – 2023. – Vol. 9. – Article number 201. – <https://doi.org/10.1038/s41524-023-01150-0>

20. AI-Driven Inverse Design of Materials: Past, Present, and Future / X.-Q. Han, X.-D. Wang, M.-Y. Xu et al. // *Chinese Physics Letters*. – 2025. – Vol. 42. – No. 2. – <https://doi.org/10.1088/0256-307X/42/2/027403>

21. Alloy design integrating natural language processing and machine learning: breakthrough development of low-cost, high-performance Ni-based single-crystal super alloys / J. Yao, Z. Wang, J. Wang et al. // *npj Computational Materials*. – 2026. – Vol. 12. – Article number 38. – <https://doi.org/10.1038/s41524-025-01906-w>

22. Wang Y. Applications of Artificial Intelligence / Machine Learning to High-1 Performance Composites / Y. Wang, K. Wang, C. Zhang // *Composites. Part B: Engineering*. – 2024. – Vol. 285. – 111740. – <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111740>

23. Artificial Intelligence for High-Throughput Discovery of Topological Insulators : the Example of Alloyed Tetradymites / G. Cao, R. Ouyang, L.M. Ghiringhelli et al. // *Physical Review Materials*. – 2020. – No. 4. – 034204. – <https://doi.org/10.1103/PhysRevMaterials.4.034204>

24. Machine learning–driven thermoelectric materials: Review on prediction, optimization, and discovery / X. Zhang, X. Wang, W. Wang et al. // *Journal of Alloys and Compounds*. – 2026. – Vol. 1050. – 185711. – <https://doi.org/10.1016/j.jallcom.2025.185711>

25. Deep learning-based superconductivity prediction and experimental tests / D. Kaplan, A. Zheng, J. Blawat et al. // *Eur. Phys. J. Plus*. 2025. – Vol. 140. – No. 58. – <https://doi.org/10.1140/epjp/s13360-024-05947-w>

26. Application of machine learning in magnetocaloric materials: A review / W. Mo, J. Wang, G. Yuan et al. // *Materials Today Communications*. – 2025. – Vol. 44. – 111933. – <https://doi.org/10.1016/j.mtcomm.2025.111933>

27. Xie E., Yang C. AI Design for High Entropy Alloys: Progress, Challenges and Future Prospects / E. Xie, C. Yang // *Metals*. – 2025. – No.15. – 1012. – <https://doi.org/10.3390/met15091012>

28. Vergara D. A Decade of Digital Twins in Materials Science and Engineering / D. Vergara, A. del Bosque, P. Fernández-Arias // *Computers, Materials and Continua*. – 2025. – Vol. 85. – Issue 1. – pp. 41–64. – <https://doi.org/10.32604/cmc.2025.067881>

29. NanoArt Winners [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://unam.bilkent.edu.tr/en/nanoart/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

30. NanoArt. International Festivals, NanoArt Online Competitions, Art - Science - Technology Conferences, NanoArt 21 Exhibitions [Електронний ресурс]. – Режим доступу:

<https://nanoart21.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

31. Academy of NanoArt. NanoArt Programs, Educational NanoArt Events, NanoArt Online Galleries, 3D Museum of NanoArt [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

32. The 1st International Festival of NanoArt - Finland 2007: Art and Nanotechnology - Part I [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanotech-now.com/columns/?article=067> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

33. NanoArtography [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanoartography.org/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

34. NanoArtography 2024 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.nanoartography.org/2024> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

35. Science as Art Backgrounds [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.mrs.org/programs/get-involved/science-as-art/science-as-art-zoom-backgrounds> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

36. Science to art...for the microscopic world enthusiast [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://m.gemologyonline.com/Forum/phpBB2/viewtopic.php?t=13296> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

37. NanoArt K12 International Online Competition [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart21.org/nanoart-k12-international-online-competition/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

38. NanoArt K12 Gallery [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://nanoart.org/nanoart-k12-gallery/> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

39. MVC14. 14th ANNUAL MATERIALS VISUALIZATION COMPETITION 2022 [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.matse.psu.edu/mvc14> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

40. MVC14 Final Entries [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.matse.psu.edu/mvc14-final-entries> (дата звернення: 05.02.2026). – Назва з екрана.

41. Suchikova Y. Rethinking the Goals and Values of Nanoart During the War: an Artists' Statement / Y. Suchikova, S. Kovachov // *NanoEthics*. – 2023. – Vol. 17. – article number 12. <https://doi.org/10.1007/s11569-023-00447-0>

42. «Бердянські медузи», «Вулкан», «Україна». Сергій Ковачов і Яна Сичікова в світовому топі Наноарта (фото) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://www.brd24.com/news/berdyanski-meduzi-vulkan-ukraina-sergiy-kovachov-i-yana-sychikova-v-svitovomu-topi-nanoarta-foto.html> (дата звернення: 05.08.2025). – Назва з екрана.

43. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: симбіоз мистецтва та нанотехнологій під час війни / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков, К.А. Піщенко // *Метал та лиття України*. – 2025. – Т. 33. – № 3–4 (342–343). – С. 53–63. – <https://doi.org/10.15407/steelcast2025.03-04.053>.

44. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: використання інформаційних технологій при обробці мікро-та макроструктур чорних та кольорових металів і сплавів / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков, К.А. Піщенко // *Наука та виробництво*. – 2025. – № 30. – С. 69–80. – <https://doi.org/10.31498/2522-9990302025347069>

45. Воденнікова О.С. НаноАрт та металургія: використання штучного інтелекту для обробки структур металів та сплавів / О.С. Воденнікова, С.А. Воденніков // *Метал та лиття України*. – 2026. – Т. 34. – № 1 (344). – С. 55–64. <https://doi.org/10.15407/steelcast2026.01.055>

46. Аналіз структурно-хімічного стану формування шару термітного сплаву на сталевій підкладці самопоширюваним високотемпературним синтезом / І.Е. Скідін, Б.Ф. Белов, О.С. Воденнікова та ін. // *Метал та лиття України*. – 2020. – Том 28. – №4. – С. 69–75.

Vodennikova O.S., Vodennikov S.A., Pishchenko K.A.

## SYNERGY OF ARTIFICIAL INTELLIGENCE AND MATERIALS SCIENCE IN THE CREATION OF NANOART IMAGES: PROSPECTS, CHALLENGES, AND OPPORTUNITIES

*The use of artificial intelligence (AI) in materials science opens new opportunities for the analysis of material microstructures, automated recognition of phase components, prediction of material properties, and improvement of the quality of microscopic images. The application of such AI technologies offers several advantages, including increased accuracy and objectivity of analysis, reduced data processing time, minimization of human factor influence, and efficient processing of large volumes of information.*

*At the same time, modern digital technologies and image processing methods create new opportunities for the development of the NanoArt field, which combines scientific visualization of nanostructures with the artistic interpretation of obtained images. Within this field, the recurrence of forms in nature becomes particularly evident: structures that exist at the atomic and molecular levels often reproduce the contours of landscapes, living organisms, cosmic objects, still lifes, or other objects of the material world, demonstrating the universality of natural patterns.*

*Modern AI generators (such as the ChatGPT and Gemini models) enable automated analysis and enhancement of micro- and nano-images, improving their level of detail, contrast, and artistic expressiveness. This contributes to more effective communication of scientific data and to the creation of aesthetically expressive visual representations of the microworld.*

*The possibility of experimenting with styles and visualization (for example, creating images in 3D style, LEGO style, porcelain style, knitted style, puzzle style, and others) reveals new approaches to the artistic interpretation of micro- and nanostructures of materials, enhances the visual expressiveness of images, and expands opportunities for popularizing scientific results through the integration of science, digital art, and modern technologies.*

*Despite the significant potential of AI for creating NanoArt images, researchers face a number of challenges and limitations, including limited scientific accuracy and the risk of data distortion, insufficient control over micro-level detailing, the possibility of excessive artistic stylization, dependence on the author's competencies, educational and cognitive risks, as well as copyright issues and ethical aspects related to the use of AI in the context of NanoArt image creation.*

*Thus, the synergy of artificial intelligence and materials science forms a new interdisciplinary approach to the creation of NanoArt, combining algorithmic methods of image analysis and generation with the control of material structure and properties at the nanoscale.*

**Keywords:** *materials science, structure of metals and alloys, digitalization, digital metallography, artificial intelligence, AI tools, NanoArt, image stylization.*

*Стаття надійшла 08.04.2026р.*

*Стаття прийнята 10.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

133 – Галузеве машинобудування

УДК 621.91

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359339](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359339)

Білодіденко С.В., Іщенко А.О., Кравченко В.М., Капустін С.В.

## ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ РЕМІННИХ ПЕРЕДАЧ РОТОРНИХ ПИЛ ГАРЯЧОЇ РІЗКИ

*Для сучасного прокатного виробництва актуальним є питання міцності та надійності конструкцій роторних пил, які призначені для різання металопрокату.*

*Залишалися невирішеними питання надійності вузлів роторних та вдосконалення режимів різання, зокрема швидкості обертання пильного диска. Але за останні пів століття суттєвих змін у питанні вдосконалення конструкцій пил та режимів різання не відбулося.*

*При аналізі використовуваних конструкцій пилок визначено конструктивні та технологічні недоліки в роботі пил гарячого різання прокату, тому є доцільною подальша робота з удосконалення як обладнання для різання прокату так і технології розкрою прокату.*

*Враховуючи те, що тривалість різання це короткочасний процес (триває 0,1 сек.), то при визначенні реакцій в опорах дискового валу, що виникають під дією сил різання, можливо розглядати процес різання як ударне явище.*

*В процесі експлуатації у конструкціях роторних пил гарячого різання через специфічні умови різання були виявлені слабкі ланки, що вимагають подальшого вдосконалення.*

*Оскільки під час різання відбувається зниження оборотів дискового валу, так звана просадка за швидкістю, яка є одним з негативних факторів, який знижує надійність роторної пили. Просадка за швидкістю не тільки зменшує продуктивність роторних пил, але й викликає інтенсивне проковзування ременів в ремінній передачі механізму обертання диска. Це в свою чергу призводить к зносу як шківів так і потребує регулярної заміни зношених ременів.*

*Для вирішення проблем зі швидким зношуванням деталей привода роторної пили, які викликані зниженням оборотів дискового валу (просадкою за швидкістю) під час різання, що дає різницю між кутовими швидкостями дискового валу і валу двигуна, у ПДГУ був розроблений режим роботи привода пили, який дозволить позбавитись виникаючої різниці швидкостей валів під час різання за рахунок вимикання двигуна на час коли виконується безпосередньо розкрий прокату, що є можливим за рахунок накопиченої на холостому ході кінетичної енергії маховиками привода диска пили.*

*Запропонований спосіб різання гарячого прокату дисковою пилою, при якому підвищиться ефективність процесу розкрою прокату за рахунок збільшення міжремонтного періоду пристрою завдяки усуненню сильного проковзування ременів привода роторної пили.*

**Ключові слова:** розкрий, різання, якість, надійність, продуктивність, металопрокат, пилки, недоліки.

**Постановка проблеми.** До теперішнього часу залишалися невирішеними питання надійності роторних пил із-за короткочасності процесу та виникаючих внаслідок чого значних навантажень.

### Аналіз останніх досліджень і публікацій.

В останні роки широко застосовуються роторні пилки конструкції ВНІметмашу [1], які працюють на високих швидкостях подачі 1...3 м/с, тоді як традиційні конструкції ріжуть зі швидкістю 0,007...0,25 м/с.

Крім того, має місце коротка тривалість самого процесу різання. Як відомо, особливістю роторних пил є процес різання заготовки, який займає дуже короткий час. Наприклад, заготовка діаметром 200 мм розрізається за 0,2 секунди, в той час як традиційні конструкції салазкових та маятникових пил виконують цю операцію за 10-20 та більше секунд. Цей ефект досягається за рахунок високих швидкостей подачі диска на різ, які перевищують традиційні режими в 20 та більше разів.

В результаті аналізу стану роторних пил було встановлено, що найбільш схильним до зношування елементом пили є касета, що складається з трьох барабанів, підшипників цих барабанів, ременів на барабанах та корпусу. В свою чергу, основні вузли, які виходять зі строю у касеті це або підшипники, або ремінна передача внаслідок зносу ременів або шківів.

Насамперед на зниження надійності пили суттєво впливає недостатня довговічність підшипників високошвидкісного дискового валу, що сприймає зусилля різання.

Також під час різання відбувається зниження оборотів дискового валу, так звана просадка за швидкістю, що викликає інтенсивне проковзування ременів в ремінній передачі механізму обертання диска, вважаючи, що під час різання двигун намагається підтримувати номінальну кількість оборотів. Це в свою чергу призводить к зносу як шківів так і потребує регулярної заміни зношених ременів. Тому необхідна подальша робота з удосконалення як обладнання для різання прокату так і технології розкрою прокату.

На сьогоднішній день науковцями нашої та інших країн проведено ряд досліджень та опубліковано деякі статті на тему підвищення стійкості до зносу та ефективності використання пил гарячого різання в умовах сучасного металургійного виробництва [2-6]. При цьому залишалися невирішеними питання надійності цих конструкцій.

У статті [5] приведений теоретичний підхід к визначенню впливу на реакції в опорах підшипників дискового валу роторної пили таких факторів як радіальне биття диска та короткочасність процесу різання, яка може бути представлена як ударне навантаження. І тому згідно з існуючими методиками визначення сил різання прокату [7-10] виникає можливість оцінки не тільки реакцій в підшипникових опорах, але і довговічності самих підшипників, яка традиційно визначається по відомій методиці викладеної в [9].

Також у статті [11] виконано визначення довговічності підшипників дискового валу роторної пили з урахуванням таких факторів як радіальне биття диску та ударне навантаження в процесі різання.

**Мета дослідження.** Метою роботи є удосконалення технології та режимів розкрою прокату для підвищення ефективності роботи пил гарячого різання.

**Основний матеріал дослідження.** При аналізі конструкцій роторних пил, що використовуються в прокатному виробництві слід звернути увагу на одну особливість роторних пил — незважаючи на різке підвищення швидкостей подачі і, відповідно, збільшення зусиль різання, потужності електродвигунів обертання дисків такі ж або навіть менше, ніж у пилок, наприклад, салазкових з тим же діаметром диска. На рис.1 наведена конструкція роторної пили.

Роторна пила містить пиляльний диск 1, який приводиться в обертання за допомогою електродвигуна 2 і двох пасових передач 3 і 4. Подача пиляльного диска 1 на заготовку 5 здійснюється за допомогою ланки подачі (води́ла) 6, що приводиться в обертання електродвигуном 7 через редуктор 8. На дисковому валу 9, крім веденого шківа 10 пасової передачі 4, розташований маховик 11.

Зазначена невелика потужність двигуна пояснюється тим, що в роторних пилах при великих швидкостях подачі власне процес різання триває десятки частки секунди, робота різання виконується як за рахунок потужності двигуна, так і за рахунок маховиків в приводі диска, які віддають кінетичну енергію, накопичену на холостому ході.

## Ремонт та відновлення деталей машин

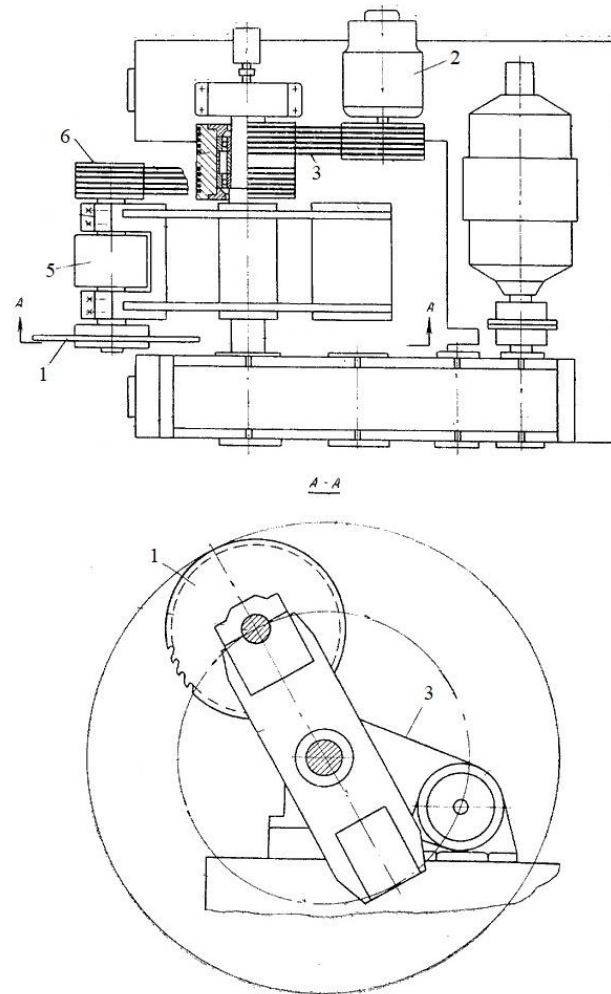


Рисунок 1 – Спосіб різання гарячого прокату

Тому оскільки частину роботи різання перебирає маховик, двигун диска може мати меншу потужність ніж у салазкових пил. Однак під час різання відбувається зниження оборотів дискового валу, так звана просадка за швидкістю, тому продуктивність роторних пилок визначається часом відновлення двигуном номінальних оборотів. Графік зміння швидкості привода диска в процесі роботи виглядає наступним чином.

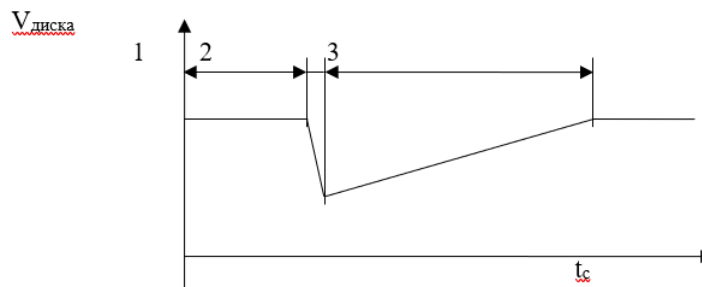


Рисунок 2 – Графік зміння швидкості привода диска в процесі роботи

1 – холостий хід пили перед різом; 2 – час різання;

3 – час відновлення номінальної швидкості.

Однак у самому приводі просадка швидкості на трьох валах: дисковому, проміжному, та валу двигуна (рис. 1) нерівнозначні, оскільки в момент різання двигун продовжує підтримувати номінальні числа оборотів і за рахунок цього просадка швидкості на валу двигуна виявляється менше ніж на дисковому валу враховуючи проковзування у момент різку ременів двох ремінних передач.

Таким чином просадка за швидкістю не тільки зменшує продуктивність роторних пил, але й викликає інтенсивне проковзування ременів в ремінній передачі механізму обертання диска. Це в свою чергу призводить к зносу як шківів так і потребує регулярної заміни зношених ременів.

Згідно розрахунків [11] визначається тривалість процесу різання, який в наступному розглядається, через його короткочасність, як тривалість удару.

Маємо:

$$t_{\text{різа}} = \frac{D_{\text{заготов.}}}{U} \cdot \cos \Psi = \frac{0,3}{2} \cdot 0,7 = 0,105 \text{ с.}$$

Згідно [11] приймаємо величини зниження (просадки) швидкості диска під час різання, які дорівнюють 20% від швидкості диска, що було підтверджено численними експериментами [5]. Таким чином, кутова швидкість зменшиться за час одного різання з  $90 \frac{1}{\text{с}}$  до  $72 \frac{1}{\text{с}}$

Аналіз впливу такої просадки швидкості та, як наслідок, проковзування ременів двох ремінних передач на строк служби приводу обертання диску, виконаний на одному з металургійних заводів України, де експлуатуються роторні пили, дозволив остаточно встановити, що найбільш схильним до зношування елементом пили є привод, що складається з трьох барабанів, підшипників цих барабанів та ременів на барабанах, вихід зі строю якого складає у середньому приблизно 40 % випадків виходу зі строю серед усіх вузлів роторної пили.

У зв'язку з наявністю вказаної вище проблеми у Приазовському державному технічному університеті був розроблений спосіб [12], який дозволяє зменшити знос ремінної передачі. Зазначений спосіб полягає у використанні запасу кінетичної енергії накопиченого маховиками на валу диска пили.

Для досягнення зазначеного технічного результату диску надають обертання за допомогою електродвигуна і пасової передачі, подальшу подачу дискової пили на різ, властиво розрізання прокату і повернення диска у вихідне положення. Одночасно з початком подачі диска на різ вимикають електродвигун та здійснюють різ за рахунок накопиченої дисковою пилою кінетичної енергії, а потім включають електродвигун для відновлення номінальної швидкості обертання диска і одночасно з цим повертають диск у вихідне положення.

Завдяки тому, що одночасно з початком подачі диска на різ вимикають електродвигун та здійснюють різ за рахунок накопиченої дисковою пилою кінетичної енергії, а потім включають електродвигун для відновлення номінальної швидкості обертання диска і одночасно з цим повертають диск у вихідне положення, стало можливим зменшити інтенсивне проковзування ременів відносно шківів під час розрізання прокату і таким чином значно зменшити зношення ривчаків пасової передачі, а також необхідність частої заміни самих пасів, які зношуються, що збільшує міжремонтний період і відповідно підвищує ефективність процесу різання гарячого прокату.

## ВИСНОВКИ

Під час різання відбувається зниження оборотів дискового валу, так звана просадка за швидкістю, що не тільки зменшує продуктивність роторних пил, але й викликає інтенсивне проковзування ременів в ремінній передачі механізму обертання диска. Це в свою чергу призводить к зносу як шківів так і заміні зношених ременів.

Для вирішення проблем зі швидким зношуванням деталей привода роторної пили, які викликані зниженням оборотів дискового валу під час різання, що дає різницю між кутовими швидкостями дискового валу і валу двигуна, у ПДТУ був розроблений режим роботи приводу пили, який дозволить позбавитись виникаючої різниці швидкостей валів під час різання за рахунок вимикання двигуна на час коли виконується безпосередньо розкрий прокату у процесі різання здійснюється за рахунок кінетичної енергії накопиченої на холостому ході маховиками привода диска пили.

Запропонований спосіб різання гарячого прокату дисковою пилою дозволяє підвищити ефективність процесу розкרוю прокату за рахунок збільшення міжремонтного періоду пристрою завдяки усуненню сильного проковзування ременів приводу роторної пили.

### *Список використаних джерел*

1. Крилов Н.І. Різання гарячого металу дисковими зубчатими пилами на підвищених швидкостях подачі / Н.І. Крилов. Ю.Є. Кім – Науч. Тр. ВНІІметмаш. -1996. - №18.-С.174-180.
2. Аналіз способів розкרוю заготовок в лініях прокатних станів / А.О. Іщенко, С.В. Капустін – Наука та виробництво: Машинобудування і зварювальне виробництво. Дніпро: ДВНЗ «ПДТУ», 2023. № 25. С. 20-26.
3. Іщенко А. О. Ділянки різання прокату дисковими пилами. – К.: Вища школа, 1989,- 61 с.
4. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Часть 6. Ножиці и пили. Під ред. Ширяєва А.В. / Ф.К. Іванченко, В.М. Гребеник, В.И. Ширяєв. – Маріуполь, ПДТУ, 2012. - 84 с.
5. Іщенко А. О., Лоза О. А. Пили гарячого різання прокату. Конструкції та розрахунок: Монографія // ДВНЗ «Приазовський державний технічний університет». – Маріуполь: ДВНЗ «ПДТУ», 2012. – 251 с.
6. Іщенко А.О., Карпенко Т.М., Капустін С.В. Визначення динамічних складових реакцій в підшипниках дискового валу роторних пил (повідомлення 1). Вісник приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки». 2023. № 47. С. 165-169.
7. Іванченко Ф.К., Гребеник В.М., Ширяєв В.И. Розрахунок машин та механізмів прокатних цехів. Частина 6. Ножиці и пили : підручник / за ред. А.В. Ширяєва. Маріуполь : ПДТУ, 2012. 84 с.
8. Гребеник В.И., Іванченко Ф.К., Ширяєв В.И. Расчет металлургических машин и механизмов. - К: Вища школа, 1988. — 448 с
9. Гайдамака А.В. Підшипники кочення. Харків : НТУ «ХПІ», 2009. 248 с.
10. Добронос Ю.К. Механічне обладнання металургійних заводів (устаткування прокатних цехів). Краматорськ : ДДМА, 2019. 50 с.
11. Іщенко А.О., Карпенко Т.М., Капустін С.В. Визначення динамічних складових реакцій в підшипниках дискового валу роторних пил (повідомлення 2). Вісник приазовського державного технічного університету. Серія «Технічні науки». 2024. № 48. С. 39-46.

12. Патент на корисну модель № 155157 від 24.01.2024 «Спосіб різання гарячого прокату дисковою пилою».

**Belodedenko S.V., Ishchenko A.O., Kravchenko V.M., Kapustin S.V.**

## RELIABILITY ISSUES OF BELT TRANSMISSIONS OF HOT CUTTING ROTARY SAWS

*For modern rolling production, the issue of strength and reliability of rotary saw designs, which are intended for cutting rolled metal, is relevant.*

*The issues of reliability of rotary units and improvement of cutting modes, in particular the speed of rotation of the saw blade, remained unresolved. But over the past half century, there have been no significant changes in the issue of improving saw designs and cutting modes.*

*When analyzing the saw designs used, structural and technological shortcomings in the operation of hot cutting saws for rolled metal were identified, therefore it is advisable to continue work on improving both the equipment for cutting rolled metal and the technology of cutting rolled metal.*

*Considering that the cutting duration is a short-term process (lasts 0.1 sec.), when determining the reactions in the disk shaft supports that arise under the action of cutting forces, it is possible to consider the cutting process as a shock phenomenon.*

*During operation, weak links were identified in the designs of hot cutting rotary saws due to specific cutting conditions, which require further improvement. Since during cutting there is a decrease in the speed of the disk shaft, the so-called speed drawdown, which is one of the negative factors that reduces the reliability of the rotary saw. Speed drawdown not only reduces the productivity of rotary saws, but also causes intensive slipping of belts in the belt drive of the disk rotation mechanism. This in turn leads to wear of both pulleys and requires regular replacement of worn belts.*

*To solve the problems with rapid wear of the rotary saw drive parts, which are caused by a decrease in the speed of the disk shaft (speed drop) during cutting, which gives a difference between the angular velocities of the disk shaft and the engine shaft, PSTU developed a saw drive operating mode that will allow getting rid of the resulting difference in shaft speeds during cutting by turning off the engine for the time when the rolled metal is directly cut, which is possible due to the kinetic energy accumulated during idling by the flywheels of the saw disk drive.*

*A method of cutting hot rolled metal with a circular saw is proposed, which will increase the efficiency of the rolled metal cutting process by increasing the device's maintenance interval due to the elimination of strong slippage of the rotary saw drive belts.*

**Keywords:** *cut, cutting, quality, reliability, productivity, metal rolling, saws, shortcomings.*

*Стаття надійшла 06.04.2026р.*

*Стаття прийнята 09.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ НАПРУЖЕНО-ДЕФОРМОВАНОГО СТАНУ ЗУБІВ ЗУБЧАСТОЇ ПЕРЕДАЧІ МЕТОДАМИ, АНАЛІТИЧНИМ І КІНЦЕВИХ ЕЛЕМЕНТІВ

Системи комп'ютерного моделювання (CAE-системи) застосовуються для аналізу вузлів та виробів вже на етапі проектування. Також системи допомагають при синтезі їх параметрів враховувати як конструктивні, так й технологічні аспекти, що впливають їх експлуатаційні характеристики.

У цій роботі розрахована контактна міцність - найважливіший параметр зубчастої передачі, аналітичним способом (пакет MathCAD) та методом кінцевих елементів (Solidworks Simulation). Алгоритми динамічного розрахунку зубчастих передач наведено в літературі та численних публікаціях, проте більшість з них засновані на аналітичних залежностях, спрощеннях та припущеннях, що враховуються узагальненими емпіричними коефіцієнтами. Тому остаточний висновок якості зубчастої передачі можна зробити після динамічних випробувань на стендах - автоматизованих комплексах призначених для імітації умов реальної роботи. У сучасному машинобудуванні, з метою зменшення витрат на підготовку виробництва та якнайшвидшого виходу продукції на ринок, практикується комп'ютерне моделювання CAE системами зубчастих передач. Однак у цьому питанні існує проблема - комп'ютерна модель, що оперує ідеальною геометрією дає контакт евольвентних профілів по відрізку прямої, котра не має площі і товщини, що унеможливорює додати до неї сил тиску або сформувати контакт з урахуванням сил тертя. Таким чином, щоб силовий контакт був коректним CAE-система повинна "бачити" лінію не як тонкий об'єкт, а як елемент з товщиною. В даному випадку моделювання силової взаємодії реалізовано через «контакт» поверхонь зубів із зазором та тертям. Проведений аналіз результатів значень контактних напруг, отриманих двома способами, показали їх тотожність з мінімальною розбіжністю. Також розкрито причини максимального значення контактної напруги в зоні ніжки зуба. Наведені у роботі алгоритми обчислення контактних напруг можуть застосовуватися на етапі прогнозування характеристик міцності конструкції, за умови зниження витрат на випробування з одночасним підвищенням інформативності та достовірності одержуваних результатів.

**Ключові слова:** контактна напруга в зубчастих передачах, CAE системи MathCAD Solidworks Simulation, формула Герца, нерівномірність розподілу напруги по ширині вінця зубчастого, тертя у зубчастих передачах.

**Постановка проблеми.** Аналітичний розрахунок напружень в зубчастих з'єднаннях за формулою Герца та доцільність коригуючих коефіцієнтів, що враховують нерівномірність тиску на поверхню зуба уздовж лінії контакту. Перевірка достовірності отриманих результатів методом кінцевих елементів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Надійність зубчастих зачеплень, що визначає ресурс передачі залежить від багатьох факторів, з яких можна виділити повноту контакту поверхонь зубів, тобто інтегральний показник ступеня їх прилягання в процесі робочих навантажень. Це найбільш істотно в редукторах, приводах важкої техніки, коли зубчасті передачі працюють в умовах екстремальних зусиль і навіть короткочасне перевищення допустимих навантажень може викликати мікротріщини на поверхні зубів.

Передача навантаження в зубчастій парі відбувається в результаті торкання сполучених поверхонь зубів, які під дією сил тиску крім напруги вигину, яке приймає максимальні значення біля основи ніжки зуба на його розтягнутій стороні, відчують ще контактну напругу. Контактна міцність в зубчастій передачі - це найважливіший параметр механізму, такий як здатність робочих поверхонь зубів чинити опір втомному руйнуванню, яке відомо в машинобудуванні і має історичну назву «пінтинг». Шорсткість робочих поверхонь зубів впливають на тертя і як слідство, довговічність передачі і особливо на контактну втомну витривалість. Рельєф шорсткості та його висота мікронерівностей значною мірою визначає динаміку появи та розміри плями контакту.

Залежно від ступеня точності на зубчастій передачі встановлюються ряд показників (ДСТУ ISO/TR 10064-2:2006), у тому числі й норми «плями контакту» зубів, які спочатку з'являються в процесі «притирання» зубчастих коліс під навантаженням на випробувальному стенді. Розміри плями контакту грають двояку роль: з одного боку крутний момент передається через пляму контакту і його зменшення призводить до концентрації навантаження на окремих ділянках поверхонь зубів і, як наслідок їх підвищеному зносу. Разом з тим занадто велика пляма по всій висоті зуба може вказувати на неправильну форму профілю зуба або похибки взаємного положення зубчастих профілів, що призводить до швидкого зносу їх робочих поверхонь. Розміри плями контакту фактично залежать від здатності зубів витримувати контактну напругу, що виникає в зоні контакту при передачі навантаження, яке акумулює нормальна сила та тертя.

Відомо [3], що в процесі роботи зубчастої передачі між взаємодіючими зубами у всіх фазах зачеплення (вважається, що крім зачеплення в полюсній лінії) виникає ковзання, змінна швидкість якого визначається векторами окружних швидкостей точок профілів зубів, що належать сполученим колесам зубчастої пари. Це ковзання породжує тертя, сила якого пропорційною нормальному тиску, причому коефіцієнтом пропорційності служить коефіцієнт тертя. Величина останнього залежить від багатьох параметрів - виду матеріалу зубів, чистоти обробки їх робочих поверхонь, наявності мастила і таке інше. Тертя впливає на напружено-деформований стан зубів, причому не тільки в області контакту, викликаючи перерозподіл контактної напруги, але і в області перехідної зони (галтелі) зубів, впливаючи на згинальні напруги.

Обчислення напруги від сили тертя на поверхні зубів передачі критично для аналізу зносу, заїдання і втоми, так як тертя ковзання створює додаткові дотичні (зсувні) напруги, які накладаються на основні контактні напруги у її розрахунках за формулою Герца [1].

Алгоритми динамічного розрахунку зубчастих передач наведено в літературі та численних публікаціях [1; 3; 4], проте більшість з них засновані на асоціативних залежностях, спрощеннях та припущеннях, що враховуються узагальненими емпіричними коефіцієнтами. Тому остаточний висновок якості зубчастої передачі можна зробити після динамічних випробувань на стендах (наприклад ZwickRoell) - високоточних автоматизованих комплексах призначених для імітації умов реальної роботи, перевірки довговічності і надійності зубчастих передач в умовах розтягування, стиснення і циклічного навантаження. Таке обладнання дуже дороге, при цьому вартість програмного забезпечення для нього можна порівняти з вартістю його апаратної частини.

З метою зменшення витрат на підготовку виробництва, якнайшвидшого виходу продукції на ринок, практикується комп'ютерне моделювання САЕ системами не тільки кінематичних, а й динамічних процесів, що супроводжують роботу зубчастих передач. Однак у цьому питанні існує проблема - комп'ютерна модель, що оперує ідеальною геометрією дає контакт евольвентних профілів по відрізку прямої, котра не має площі і товщини, що унеможливує додати до неї сил тиску або сформувати контакт з урахуванням сил тертя.

Таким чином, щоб силовий контакт був коректним САЕ система повинна "бачити" лінію не як тонкий об'єкт, а як елемент з товщиною. В цьому випадку моделювання силового контакту по відрізка прямої різні в САЕ системах використовують спеціальні алгоритми [2].

У САЕ ANSYS контакт по відрізках прямий може бути реалізований через контактні пари типу «поверхня-поверхня» (Surface-to-Surface), де одна з поверхонь задається як контактна, а інша як цільова. Для цього вибирають елементи, які беруть участь у силовій взаємодії, як Edge (Рєбра) – одне, як контактне (slave), а інше як цільове (master).

САЕ Abaqus використовує алгоритм "General Contact" (загальна взаємодія) для моделювання контакту ребер (edge-to-edge), що дає прийнятний результат для складних конструкцій з балок.

У SolidWorks Simulation для контакту "відрізок-пряма" (наприклад, ребро - Edge) вибирають опцію для контактів "Не стикаються", вказавши для них мінімальний та максимальний діапазон зазору.

Нажаль, такі спрощення можуть знижують можливість отримання результату інженерного аналізу конструкції з достатнім ступенем наближення до реального.

**Основний матеріал дослідження.** Розглянемо прямозубу евольвентну зубчасту передачу (рис. 1) зі стандартним кутом зачеплення  $\alpha=20^\circ$  коліс з центрами  $O_1$  та  $O_2$ , модулем  $m$  і коефіцієнтом торцевого перекриття рівним одиниці, тобто в момент, коли наступна пара зубів входить у зчеплення попередня виходить з нього. Конструкторською основою передачі є початкові кола зубчастих коліс радіусами  $R_{D1}$  (провідного) і  $R_{D2}$  (відомого), які в процесі зачеплення перекочуються одна по одній торкаючись в полюсі зачеплення точці  $S$ , що лежить на лінії центрів.

**Основний матеріал дослідження.** Розглянемо прямозубу евольвентну зубчасту передачу [1] (рис. 1) зі стандартним углом зачеплення  $\alpha=20^\circ$  коліс з центрами  $O_1$  та  $O_2$ , модулем  $m$  і коефіцієнтом торцевого перекриття рівним одиниці, тобто в момент, коли наступна пара зубів входить у зчеплення попередня виходить з нього. Конструкторською основою передачі є початкові кола зубчастих коліс радіусами  $R_{D1}$  (провідного) та  $R_{D2}$  (відомого), які в процесі зачеплення перекочуються одна по одній торкаючись у полюсі зачеплення точці  $S$ , що лежить на лінії центрів. У даному випадку радіуси кіл початкової і ділильної рівні.

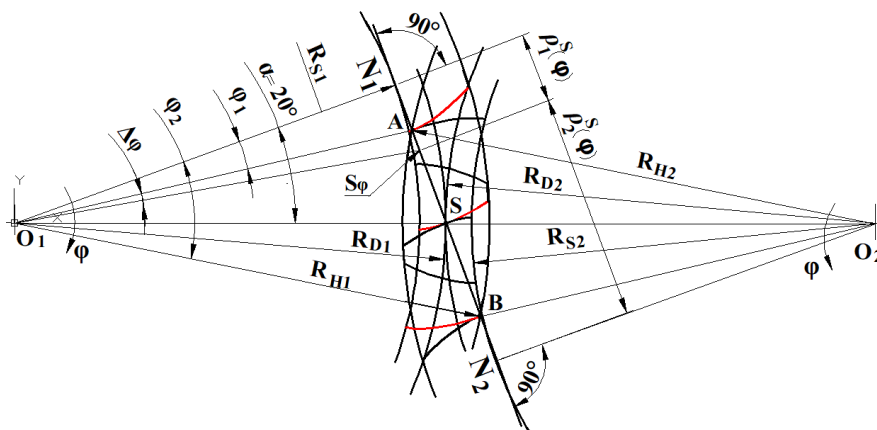


Рисунок 1 – Геометричні елементи евольвентного зачеплення коліс з центрами  $O_1$ - $O_2$  і полюсом  $S$ , радіусами: ділильними  $R_{D1}$ ,  $R_{D2}$ , вершин зубів  $R_{H1}$ ,  $R_{H2}$  та основних кіл  $R_{S1}$ ,  $R_{S2}$ , з поточним контактом у точці  $S_\phi$  при зміні кута контакту  $\Delta\phi$

## Ремонт та відновлення деталей машин

При повороті коліс на угол  $\Delta\varphi$  поточна точка контакту  $S_\varphi$  переміщається по лінії зачеплення  $N_1N_2$  – дотичної до основних кіл  $R_{1S}$  та  $R_{2S}$ , та формує евольвентний профіль зубів. Для однієї пари зубів можна виділити активну (робочу) частину  $AB$  на лінії зачеплення зубчастої передачі в межах: у точці  $A$  - перетин колу зовнішнього профілю зубів колеса  $R_{H1}$  з  $N_1N_2$  та точці  $B$  - перетину колу зовнішнього профілю зубів колеса  $R_{H2}$  з  $N_1N_2$ . Для спрощення подання аналітичних залежностей, як окремий випадок встановлено рівність ділильних радіусів  $R_{D1}=R_{D2}=R_D$ . Центри кривизни твірної зубців лежать на основних колах  $R_S$ , а точка контакту зубів  $S_\varphi$  при поточному  $\Delta\varphi$  ділить лінію  $AB$  на два відрізки рівним радіусам кривизни евольвентних профілів  $\rho_1^S(\varphi), \rho_2^S(\varphi)$  :

$$\begin{aligned} \rho_1^S(\varphi) &= 2 \cdot R_D \cdot \sin(\alpha) - \sqrt{R_D^2 \cdot \sin^2(\alpha) + (2 \cdot R_D \cdot m)^2 + m^2} + R_D \cdot \varphi \cdot \cos(\alpha) \\ \rho_2^S(\varphi) &= 2 \cdot R_D \cdot \sin(\alpha) - \rho_1^S(\varphi). \end{aligned} \quad (1)$$

Довжина активної частини лінії зачеплення  $AB = 2 \cdot R_{D1} \cdot \sin(\alpha) = \rho_1^S(\varphi) + \rho_2^S(\varphi)$ .

Наведений радіус кривизни дорівнює  $\rho_{IP}(\varphi) = \frac{\rho_1^S(\varphi) \cdot \rho_2^S(\varphi)}{\rho_1^S(\varphi) + \rho_2^S(\varphi)} = \frac{\rho_1^S(\varphi) \cdot \rho_2^S(\varphi)}{2 \cdot R_D \cdot \sin(\alpha)}$ . (2)

У передачі, без усунення, геометричні параметри зони контакту зубів можна представити кутовими значення, з початком зачеплення в точці  $A$  - кут  $\varphi_1$  і вихід з зачеплення в точці  $B$  - кут  $\varphi_2$ , тобто поточний кут  $\varphi$  в зачепленні обмежений:

$$\arctg \left[ 2 \cdot \operatorname{tg}(\alpha) - \sqrt{\left( \frac{R_{D1} + m}{R_{D1} \cdot \cos(\alpha)} \right)^2 - 1} \right] = \varphi_1 \leq \varphi \leq \varphi_2 = \arccos \left[ \frac{R_{D1} \cdot \cos(\alpha)}{R_{D1} + m} \right]. \quad (3)$$

Під дією крутного моменту  $M_{KP}$  лінія зачеплення  $N_1N_2$  формує силову взаємодію зубів: нормальної сили:

$$F_N = M_{KP} / (R_D \cdot \cos(\alpha)), \quad (4)$$

та як похідною від неї сили тертя  $F_{TP}$ , що дорівнює:

$$F_{TP} = F_N \cdot \mu, \quad (5)$$

Вектор тертя спрямований у протилежний бік напрямку відносного ковзання поверхонь контактуючих зубів, проте напруга від його дії прийнято підсумовувати до напруги від дії нормальної сили.

$E_{IP} = 2 \cdot E_1 \cdot E_2 / (E_1 + E_2)$  - характеристика податливості системи, як наведений модуль пружності матеріалів зубів колісної пари. Якщо колеса з одного матеріалу  $E$ , то наведений модуль пружності дорівнює:  $E_{IP} = E$ ;

Одним із основних критеріїв працездатності зубів у зачепленні є контактна напруга  $\sigma_H$  для розрахунку якої застосовують формулу Герца [1], в основу якої фактично покладено співвідношення нормального тиску  $q$  на поверхню зуба та площі циліндра радіуса  $\rho_{PP}$  (2):

$$\sigma_H(\varphi) = \sqrt{\frac{q \cdot E_{PP}}{2 \cdot \pi \cdot (1 - \mathcal{G}^2) \cdot \rho_{PP}(\varphi)}}, \text{ де } \mathcal{G} - \text{ коефіцієнт Пуассона.} \quad (6)$$

При передачі крутного моменту, що до двох зубчатих коліс виникає при повороті на крок циклічно змінна сила нормального тиску  $F_N$ , що діє вздовж лінії зачеплення  $N_1N_2$  в точках поверхні зуба шириною  $b$ :

$$q = \frac{F_N}{b} = \frac{M_{KP}}{b \cdot R_D \cdot \cos(\alpha)} \quad (7)$$

Теоретично контакт евольвентних поверхонь зубів відбувається за відрізком прямої  $b$ , забезпечуючи ключову властивість зачеплення даного типу - передачу обертання з постійним передавальним числом. Досвідченим шляхом встановлено, що рівномірний розподіл контактної лінії  $b$  не відповідає дійсності [3; 4]. Тому в сучасних розрахунках є необхідність у формулі Герца уточнити обчислення шляхом введення коефіцієнта нерівномірності розподілу напруги по ширині вінця зубчастого [1]:

$$k(b) = 1 + \left( \frac{b^{K_b}}{2 \cdot R_D} - 1 \right)^{K_v} \quad (8)$$

Враховуючи (6) (7) (8) можна вважати, що зміна контактної напруги відповідає моделі виду:

$$\sigma_H(\varphi, b) = \sqrt{\frac{E_{PP} \cdot M_{KP} \cdot (1 + \mu) \cdot \operatorname{tg}(\alpha)}{\pi \cdot b \cdot (1 - \mathcal{G}^2) \cdot \rho_1^S(\varphi) \cdot \rho_2^S(\varphi)} \cdot \left[ 1 + \left( \frac{b^{K_{Hv}}}{2 \cdot R_D} - 1 \right)^{\Psi_{bq}} \right]} \quad (9)$$

Розрахуймо контактну напругу  $\sigma_H(\varphi, b)$  для зубчастої передачі 9-го ступеня точності коліс [1] з модулем  $m=8$ , розподільчим радіусом  $R_D=0.12$  м і шириною вінця  $b=0.024$  м. Матеріал коліс «сталь 45» з модулем пружності  $E_{PP}=2.1 \cdot 10^5$  МПа, допустимою контактною напругою  $[\sigma]_H = 550$  МПа та коефіцієнтом Пуассона  $\mathcal{G}=0.3$ . До передачі додано крутий момент, що дорівнює  $M_{KP} = 1800$  Нм і при шорсткості зубів  $Ra1.25$  встановлено коефіцієнт тертя ковзання поверхонь зубів  $\mu = 0.15$ . Коефіцієнт, що враховує ширину вінця щодо ділильного діаметру  $\emptyset(2 \cdot R_D)$  встановлений  $K_{Hv} = 0.15$  [1]. Коефіцієнт динамічності [1], що враховує ступінь точності та шорсткість зубів твердістю  $HV < 350$  МПа дорівнює  $\Psi_{bq} = 0.128$ .

Для візуального відображення функціональної залежності контактної напруги, що діє на різних ділянках поверхні зубів коліс будемо 3D графік (9) у програмному середовищі пакету

MathCAD. (рис. 2). Значення контактної напруги  $\sigma_H$  в характеристичних перерізах зуба при його повороті на крок, при ширині зубчастого колеса  $1 \leq b \leq 24$  (мм) і зі зміною кута контакту  $\varphi$  в межах розрахованих (3)  $5.2^\circ \leq \varphi \leq 36.3^\circ$  наведені в таблиці 1.

Основним завданням теорії моделювання є визначення однозначних співвідношень між моделлю і реальним об'єктом, тобто створення моделі процесу ідентичного реальному, поведінка якого повинна відповідати базовим закономірностям. Проведення цього процесу на реальних моделях надто дороге. Тому вибираємо для цієї мети твердотілі моделі, які з деяким наближенням поведуться так, як реальні фізичні об'єкти.

Будуємо в CAD системі SolidWorks твердотільне евольвентне [2] зубчасте зачеплення (рис. 3, б) з міжцентровою відстанню коліс  $O_1-O_2$ , що дорівнює  $\varnothing(2 \cdot R_D)$ , модулем  $m=8$  і всіма іншими характеристиками, встановленими для моделі в пакеті Mathcad. Для прискорення процесу розрахунку, його зручної візуалізації та виходячи з обчислювальної здатності комп'ютера залишаємо в зачепленні лише два зуби коліс та їх осі обертання. До ведучого колеса прикладено крутний момент  $M_{кр}$ , до веденого колеса момент опору  $M_c$ , через контакт зубів з «тертям».

Для SolidWorks Simulation моделювання динамічного контакту зубів типу «поверхня - поверхня» (Surface to Surface) дозволяє визначити напруги, що виникають в евольвентному зачепленні. Для виконання дослідження контактних тисків у зубчастій парі вказуємо матеріал коліс «сталь 45» з його фізико-механічними параметрами з бібліотеки САЕ системи. Задаємо обмеження 3D конструкції: осі, на яких базуються зубчасті колеса, нерухомі – «зафіксовані».

Для контакту зубів – теоретично за відрізком прямої, встановлюємо метод локальної взаємодії (Local Interactions). Simulation може автоматично знаходити та обробляти зазори в межах встановленого допуску. Якщо розрахунок не збігається через зміщення деталей до контакту, можна використовувати в налаштуваннях функцію «Стабілізація контакту» (Contact Stabilization). Такий підхід забезпечує можливість автоматичного вибору системою "мікро" майданчика для силової взаємодії.

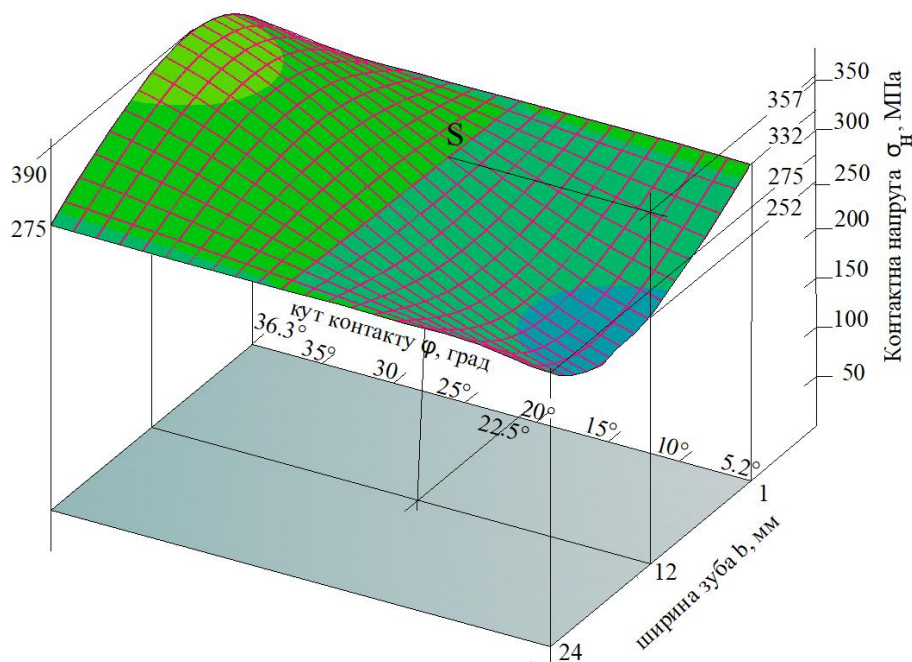


Рисунок 2 – Зміна контактної напруги  $\sigma_H$  по ширині зубчастого колеса  $b$  та при його повороті на кут контакту  $\varphi$

Для контактів маточини коліс з їх осями задані умови: «Без проникнення» (No Penetration), посадка із зазором, з коефіцієнтом тертя  $k=0.08$ . При кутовий швидкості обертання коліс  $\omega < 200 \text{ c}^{-1}$  коефіцієнт тертя між контактуючими поверхнями зубами приймаємо  $\mu = 0.15$ . Для прискорення розрахунків «сітка» (Mesh) побудована з локальним подібненням на зубах у зоні контакту.

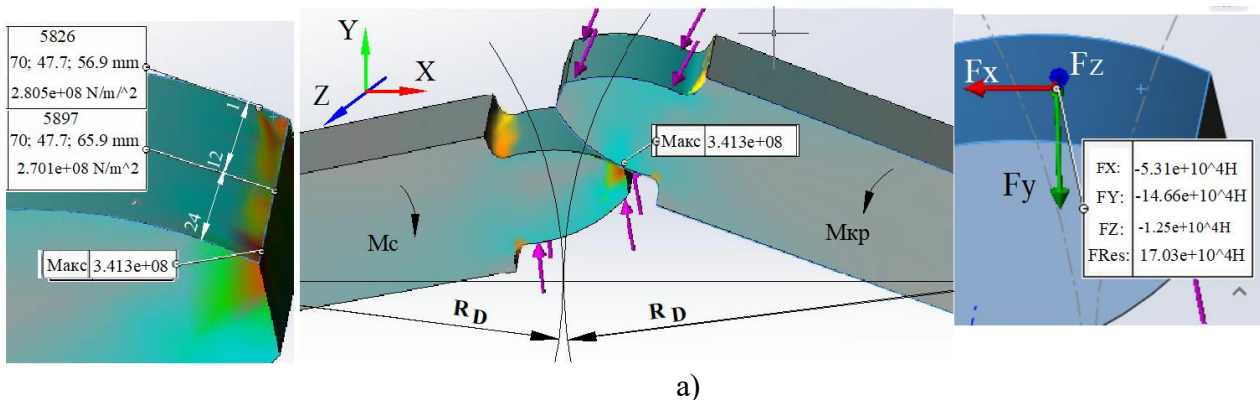
Евольвентне зачеплення двох зубів відбувається по робочих ділянках профілів (рис. 1), які умовно формуються шляхом перенесення кінцевих точок А і В лінії зачеплення на профілі зубів. У процесі зачеплення робочі ділянки профілів зубів одночасно котяться і ковзають один по одному за винятком полюса зачеплення S де вважається, що швидкість ковзання нулю, так як миттєві окружні швидкості початкових кіл у полюсі збігаються за величиною і напрямом.

З метою визначення контактних-силових характеристик поверхні зубів [2] веденого колеса (рис. 3) запускаємо дослідження (Simulation) на трьох ділянках зачеплення: початок зачеплення «вершина зуба веденого колеса – ніжка ведучого» (рис. 3, а), контакт у полюсі зачеплення S (рис. 3, б) і вихід із зачеплення "ніжка веденого - вершина ведучого зуба" (рис. 3, в). На ведене колесо діє момент опору  $M_c(H)$  який долається крутним моментом  $M_{кр}(H)$ , ведучого колеса, викликаючи нормальний тиск  $F_N = F_y(H)$  і силу тертя  $F_{TP} = F_x(H)$ . Напруги  $\sigma_H (N/m^2)$  на ділянках зуба веденого колеса, отримані за допомогою інструмента "Зондування" записуємо в таблицю 1. При цьому "зондуються" три точки на ширині зуба  $b=1, 12, 24$  (мм).

У вершини зуба (рис. 3 а) веденого колеса працюють найбільш віддалені від полюса зачеплення точки евольвентної поверхні, які вступають в контакт першими з нішкою ведучого колеса. Дані дослідження 3D моделі для  $\varphi=5.2^\circ$  записуємо в таблицю 1.

Близько до полюсу (рис. 3 б), коли в зачепленні знаходиться одна пара зубів. Вважається, що у цій точці зуби перекочуються без ковзання, тому значення тертя  $F_x = F_{TP}$  близько до нуля. Дані дослідження 3D моделі для  $\varphi=22.5^\circ$  записуємо в таблицю 1.

У ніжки зуба (рис. 3, в). Найбільш віддалені точки від полюса - це точки активного профілю ніжки, близькі до кола западин, або межі активної лінії зачеплення. Ці точки контактують з вершинами зубів парного колеса і схильні до максимального зносу через високу швидкість ковзання. Дані дослідження 3D моделі для  $\varphi=22.5^\circ$  записуємо в таблицю 1.



a)

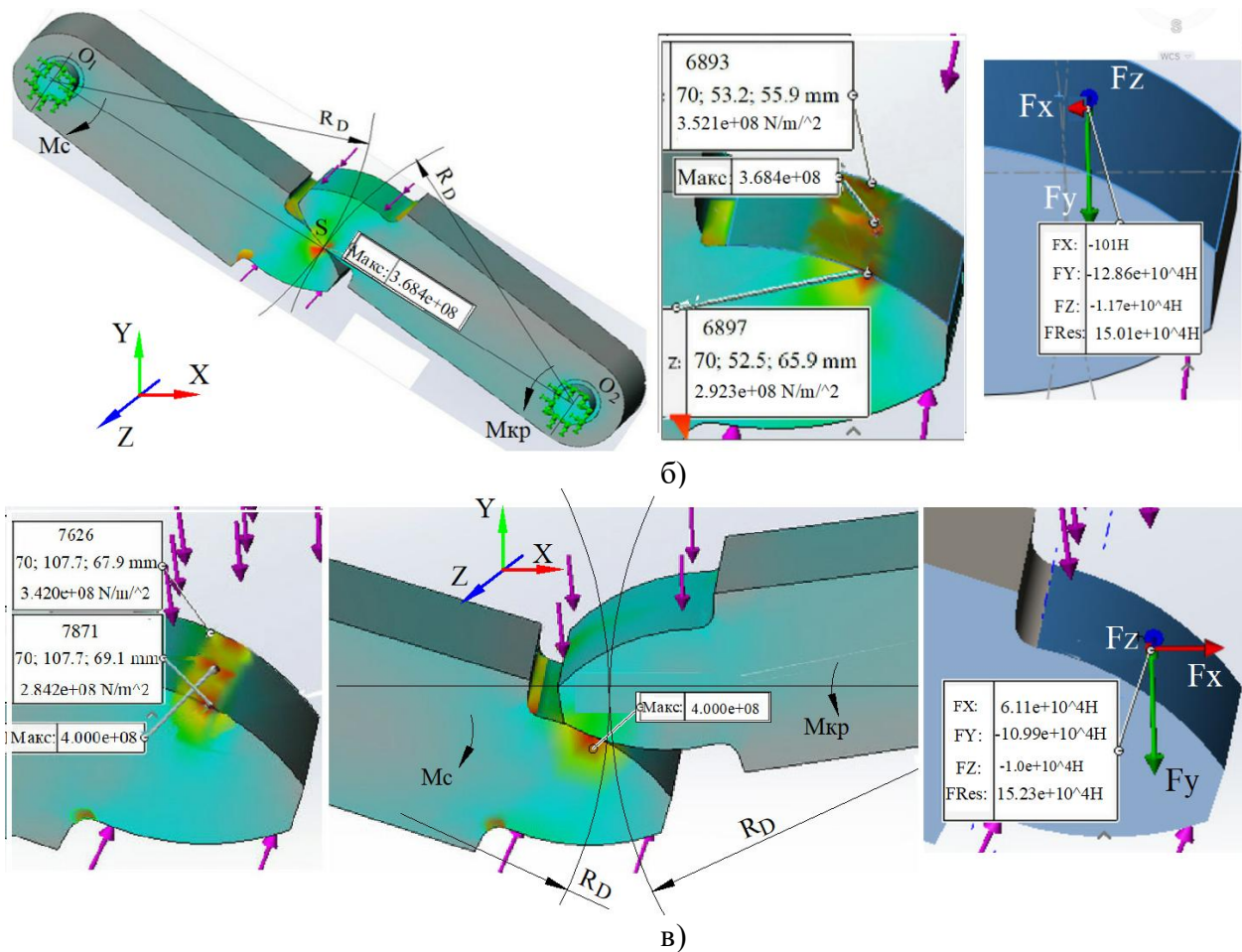


Рисунок 3 – Контактно-силові характеристики зубів колеса з  $R_D$ , на ділянках зачеплення: (а) - початок зачеплення: «вершина зуба веденого колеса – ніжка ведучого» ( $\varphi=5.20$ ), (б) - контакт у полюсі зачеплення ( $\varphi=22.50$ ), (в) вихід із зачеплення: «ніжка веденого колеса – вершина ведучого»; у точках по ширині зуба:  $b=1, 12, 24$  (мм) "Зондування" на 3D моделі напруг ( $N/m^2$ ); чинні сили в зачепленні:  $F_y = F_N, F_x = F_{TP}$ , при кожному куті контакту  $\varphi$

### ВИСНОВКИ

У зубчастій парі опір втоми за дією контактної напруги прийнято розраховувати за формулою Герца, як контакт двох циліндрів з радіусами рівними радіусам кривизни евольвентного профілю зубів у полюсі зачеплення. При цьому не враховується, що перекочування зубів відбувається зі ковзанням і тому в зачепленні відбувається тертя. Крім цього не враховується, що допуски розташування та форми деталей на складальний вузол можуть викликати динамічні сили (рис. 3,  $F_z$ ), як причину нерівномірного розподілу напруги по ширині зубчастого вінця  $b$ .

У цій роботі побудовано дві моделі: аналітичну на основі MathCAD та 3D модель для аналізу методом кінцевих елементів. В аналітичній моделі до формули Герца внесені коригувальні коефіцієнти. У CAD моделі контактної напруги, інтегрованої з CAD системою зубчастої пари крім фізико-геометричних умов, що забезпечують збіжність розрахунку задіяні внутрішні алгоритми, що дають уточнені результати дослідження. Тому значення отримані шляхом зондування 3D моделі зубчастого зачеплення (Soildworks Simulation) можна вважати

більш точними в порівнянні з аналітичним розрахунком пакетом MathCAD (відмінність не більше <6%).

Таблиця 1 – Розрахунково-дослідна контактна напруга  $\sigma_H$ ,  $\sigma_S$ , на поверхні зуба, залежно від кута контакту  $\varphi$  і ширини зуба  $b$

	При вершині зуба ( $\varphi=5.2^0$ ), МПа			В околицях полюса зачеплення ( $\varphi=22.5^0$ ), МПа			Поблизу ніжки зуба ( $\varphi=36.3^0$ ), МПа			Отримані дані з використанням пакетів
	1	12	24	1	12	24	1	12	24	
$\sigma_H$	33	25	27	332	357	275	33	390	27	MathCAD (рис. 2)
	2	1	5				2		5	
$\sigma_S$	34	27	28	352	368	292	34	400	28	Solid Simulation (рис. 3)
	1	0	0				2		4	
$\Delta\sigma$	2.7	7.5	1.8	6.0	3.0	6.8	3.0	2.6	3.3	$100 \cdot (\sigma_{HM} - \sigma_{HS}) / \sigma_{HM} (\%)$

Аналізуючи дані табл. 1 можна зробити такі висновки. Напруги в зоні ніжки зуба зубчастого колеса більші, ніж у зоні вершини і більше ніж у полюсі зачеплення. Причину цього слід шукати у побудові моделі, яка більшою мірою відповідає адекватності реальним фізико-механічним процесам напруженого стану зубів у зачепленні. Крім цього, сила тертя  $F_x = F_{TP}$  в зачепленні зубчастих коліс при переході полюса зачеплення змінює свій напрямок (рис. 3, а), (рис. 3, в): до полюса сила тертя спрямована проти руху точки контакту по профілю зуба - після полюса сила тертя змінює напрямок на протилежний. Таким чином, полюс зачеплення є точкою зміни напрямку сили тертя, де відбувається перехід від тертя, що уповільнює рух у зоні входу, до тертя, що змінює її дію. Ця особливість є додатковим фактором підвищення напруги в зоні ніжки зуба.

### Список використаних джерел

1. Овчаров Б. З., Мінняло А. В., Мазоренко Д. І., Тіщенко Л. М. Розрахунки і проектування деталей машин. Частина 1. Механічні передачі : навч. посіб. Харків : ХНТУСГ, 2006. 366с.
2. Михайленко В.Є. Інженерна та комп'ютерна графіка графіка / В.Є. Михайленко, В.В. Ванін, Ю.С. Ковальов. – Київ: Каравелла: – 2003. – 344 с.
3. Vouaillat, G., Noyel, J.-P., Ville, F., Kleber, X., & Rathery, S. From Hertzian contact to spur gears: Analyses of stresses and rolling contact fatigue. *Mechanics & Industry* 2019, 20, 626.
4. W. J. Qinn and C. Y. Guan, "An investigation of contact stresses and crack initiation in spur gears based on finite element dynamic analysis" *International Journal of Mechanical Sciences*, vol. 83, pp. 96–103, 2014.

**Leshenko O. I.**

## COMPARATIVE ANALYSIS OF STRESS-STRAIN STAND OF GEAR TEETH BY ANALYTICAL AND END ELEMENTS METHODS

*Computer modeling systems (CAE systems) are used to analyze components and components already at the design stage. Also, the systems help in the synthesis of their parameters to include both structural and technological aspects that integrate their operational characteristics.*

*In this robot, the contact value is the most important parameter of the gear transmission, using the analytical method (MathCAD package) and the method of end elements (Solidworks Simulation). Algorithms for the dynamic development of gear transmissions have been suggested in the literature and numerous publications, most of them based on analytical findings, simplified assumptions and assumptions that are based on established empirical data. coefficients. Therefore, the residual strength of the gear transmission can be obtained after dynamic testing on stands - automated*

*An analysis of the results of the values of contact voltages removed in two ways showed their similarity with minimal separation. The reasons for the maximum value of contact stress in the area of the tooth base are revealed.*

*The robot's algorithms for calculating contact voltages can be used at the stage of predicting the characteristics of the value of the structure, in order to reduce the cost of testing with immediate improvements in the information content and reliability of the contents results.*

**Keywords:** *contact stress in gear drives, CAE system MathCAD Solidworks Simulation, Hertz formula, unevenness of stress distribution along the width of the gear rim, friction in gear drives.*

*Стаття надійшла 07.04.2026р.*

*Стаття прийнята 10.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ СОНЯЧНИХ ТЕПЛОВИХ ТА ФОТОЕЛЕКТРИЧНО-ТЕПЛОВИХ СИСТЕМ

Сучасні стратегії декарбонізації енергетичного сектору вимагають інтенсивного впровадження відновлюваних джерел енергії, серед яких сонячні технології посідають провідне місце. Для забезпечення потреб гарячого водопостачання (ГВП) традиційно використовуються сонячні теплові системи, що базуються на перетворенні сонячного випромінювання безпосередньо в теплову енергію. Водночас розвиток фотоелектричних технологій зумовив появу гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) систем, здатних генерувати як електричну, так і теплову енергію одночасно. Це створює нові можливості для підвищення енергетичної щільності систем енергопостачання, проте вимагає ретельного аналізу їхньої порівняльної доцільності в реальних експлуатаційних умовах. Необхідність вибору між традиційними геліосистемами та гібридними PVT-установками часто ускладнюються різними критеріями оцінки: від безпосередньої теплопродуктивності до загальної екологічної ефективності протягом життєвого циклу. В роботі проведено комплексну оцінку енергетичної та екологічної ефективності обох типів систем у мережах ГВП. Метою дослідження є виявлення переваг та обмежень застосування кожної технології, що дозволить сформулювати науково обґрунтовані рекомендації щодо їхнього оптимального вибору для підвищення енергоефективності та зменшення антропогенного впливу на довкілля.

У роботі запропоновано авторську методику розрахунку коефіцієнта підвищення терміну ефективної експлуатації сонячної енергії в гібридних установках. Ключовим елементом методики є впровадження показника «коефіцієнт продовження періоду роботи геліотеплопостачання», який дозволяє кількісно оцінити часове розширення експлуатаційного вікна системи протягом світлового дня та річного циклу. Запропонований підхід базується на порівнянні тривалості активної генерації енергії гібридною PVT-системою та традиційним тепловим колектором за однакових умов інсоляції. Основною перевагою даної методики є можливість обґрунтувати енергетичну доцільність PVT-рішень навіть у періоди низької сонячної активності, коли електрична складова дозволяє компенсувати теплову інерційність системи та забезпечити її раніший старт. Важливою особливістю дослідження є те, що підвищення показників використання енергії досягається при повному збереженні існуючих конструктивних параметрів та технологічних вимог до мережі гарячого водопостачання промислової будівлі. Це робить методику практично цінною для модернізації енергетичних систем підприємства, оскільки вона не потребує радикальної зміни гідравлічної структури ГВП, але суттєво покращує річний енергетичний баланс об'єкта.

**Ключові слова:** геліосистема, тепловий колектор, PVT - панелі, сонячна енергія, гаряче водопостачання, енергоефективність, екологічна ефективність, відновлювані джерела енергії.

**Постановка проблеми.** Сучасні умови роботи підприємств, в Україні стикаються з труднощами енергозабезпечення, що вимагає впровадження ефективних технічних заходів, які спрямовані на економію енергоресурсів та забезпечують безперебійність функціонування технологічних підрозділів. Використання сонячних геліотеплосистем набуло поширення для

забезпечення гарячого тепловодопостачання допоміжних та виробничих будівель, як невеликих так і потужних виробництв. Необхідність цілорічного функціонування систем ГВП на промислових об'єктах вимагає інтеграції додаткових електричних нагрівачів, що в умовах енергодефіциту знижує загальний коефіцієнт корисної дії установки та обмежує тривалість її ефективної роботи. Наряду з цим, у більшості регіонів України, особливо в осінньо-зимовий період, рівень сонячної радіації є недостатнім для забезпечення стабільної роботи систем теплопостачання. Це знижує економічну доцільність та екологічний ефект впровадження геліосистем у промисловому секторі. У зв'язку з цим актуальною науково-технічною задачею є пошук і обґрунтування методів підвищення ефективності використання сонячної енергії та розширення періоду її застосування протягом року для теплопостачання промислових будівель.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Питання максимізації енергетичної віддачі сонячних систем теплопостачання перебувають у центрі уваги наукової спільноти як в Україні, так і за кордоном. Основний акцент у дослідженнях спрямований на оптимізацію термодинамічних параметрів геліосистем, удосконалення методологій розрахунку енергетичного балансу та підвищення сумарного коефіцієнта корисної дії при трансформації сонячного випромінювання [1,2]. Значний потенціал для зростання енергоефективності вбачається у розробці інноваційних матеріалів для абсорберів та високоефективних систем акумулювання теплоти, які дозволяють мінімізувати втрати енергії під час її накопичення та розподілу [2]. На відміну від роздільних фотоелектричних технологій сонячних колекторів PV, принцип комбінованого виробництва PVT-теплових систем забезпечує вищий рівень енергетичної щільності на одиницю площі панелей, що робить їх високоефективним рішенням для об'єктів з одночасним споживанням електроенергії та тепла, включаючи інтегровані в будівлі системи (BIPV/T) та енергоємні промислові процеси [3,4, 5]. Технічна перевага PVT-систем полягає в їхній здатності оптимізувати енергетичний баланс шляхом активного керування тепловими потоками, що неможливо в стандартних фотоелектричних (PV) модулях. Інтеграція теплоприймача дозволяє мінімізувати термічні втрати, утилізуючи побічне тепло для нагрівання теплоносія, або самої поверхні панелі в зимових умовах, що істотно покращує загальний коефіцієнт використання сонячної енергії [3,4]. На відміну від роздільних технологій, комбінований характер PVT-систем забезпечує вищий рівень енергетичної щільності на одиницю площі апертури. *Сучасні дослідження показують, що PVT-системи забезпечують значно вищу сумарну ефективність у порівнянні з окремими системами. Зокрема: теплова ефективність: 30–70%, електрична ефективність: 8–17% [6].*

Енергетичний вихід PVT-систем безпосередньо корелює з теплофізичними властивостями робочого тіла, що визначає ефективність охолодження фотоелементів та потенціал теплогенеруючої частини. Повітряні PVT-установки, попри конструктивну спрощеність, характеризуються низьким коефіцієнтом теплопередачі, що суттєво лімітує їхню загальну термічну потужність [6]. Рідинні системи (на водній основі) мають вищу енергоефективність завдяки кращій теплоємності носія, проте потребують мінімізації теплових втрат через ускладнення гідравлічного контуру. Для подолання енергетичних обмежень однофазних систем розробляються біфлюїдні конфігурації (повітря-вода), які дозволяють максимізувати відведення тепла, підвищуючи тим самим електричний ККД за рахунок глибшого охолодження панелі [7].

Незважаючи на значні успіхи в оптимізації геліосистем, малодослідженими залишаються аспекти пролонгації періоду їх високоефективної експлуатації протягом річного циклу, особливо в умовах значної міжсезонної амплітуди сонячної інсоляції.

Окремої уваги потребує розробка алгоритмів адаптації параметрів сонячних установок до мінливих кліматичних чинників, що є критично важливим для забезпечення стабільного

енергопостачання промислових об'єктів, де технологічні процеси вимагають високої надійності та постійності параметрів теплоносія.

**Мета дослідження.** Комплексна оцінка енергетичної та екологічної ефективності сонячних теплових та гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) систем для потреб тепло та гарячого водозабезпечення промислової будівлі.

**Основний матеріал дослідження.** За базову модель дослідження прийнято традиційну геліосистему (PV) тепло та гарячого водопостачання санітарно-побутового корпусу промислового підприємства, за умовами розрахункової інтенсивності сонячної радіації, (табл. 1).

Конструктивна схема базового варіанта передбачає використання традиційних сонячних колекторів та двоконтурної системи опосередкованого нагріву. До складу інженерного обладнання системи входять: поле сонячних модулів загальною площею  $A = 192 \text{ м}^2$ , двоконтурна система циркуляції з розширювальним баком для антифризу, бак-акумулятор із закритим відбором води, циркуляційний насос колекторного контуру, електричний водонагрівач (для догріву в періоди недостатньої інсоляції), споживачі теплової енергії.

Таблиця 1 –Інтенсивність сонячної радіації за 2025 рік (м. Дніпро)

Місяці	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
$E_{\text{мр}}, \text{ Вт/м}^2$	135	209	281	328	370	376	361	337	289	218	152	120

Розрахунок загального теплового навантаження проведено для фактичних умов, на кількість користувачів в день –  $n = 655$  осіб, при нормі на санітарно - гігієнічне споживання гарячої води  $g = 40$  л/добу на 1 особу [5]. Температура холодної води:  $t_x = 10^\circ\text{C}$ , гарячої води:  $t_r = 55^\circ\text{C}$ . Добова витрата води при  $\Delta t = 45^\circ\text{C}$ , складає  $26,2 \text{ м}^3/\text{добу}$ .

Проведено розрахунок основних показників роботи базової геліосистеми теплопостачання: загального теплованавантаження, коефіцієнта покриття тепло навантаження та коефіцієнта ефективності тепло геліосистеми помісячно. Характеристики вказано на рисунку 1. Отримані результати показують, що виробіток теплової енергії має виражену сезонну залежність, яка прямо корелює з інтенсивністю сонячного випромінювання  $E_{\text{міс}}$ . Максимальна ефективність геліосистеми спостерігається у весняно-літній період (травень–вересень). Середньорічний ККД  $\approx 45\%$ . Спостерігалось зниження цих показників у квітні, що пов'язано з дефіцитом енергопостачання у цей період.

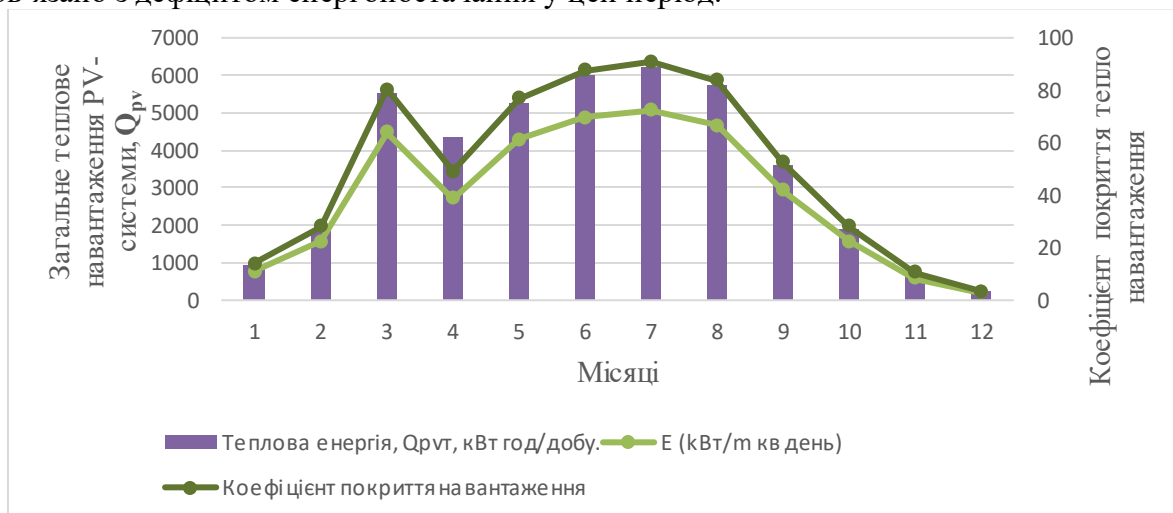


Рисунок 1 – Теплове навантаження установки PV - теплопостачання за 2025 рік

## Енергетичні системи та обладнання

Числовий аналіз розрахунків показав, що ефективність покриття теплонавантаження PVT системи у літній період року досягає 65–70% (рис. 1). У зимові місяці цей показник знижується до 5–10%, що підтверджує виражену сезонність використання сонячної енергії.

З метою максимізації загальної ефективності перетворення сонячної енергії проведено порівняльне дослідження показників базової геліосистеми та гібридних фотоелектрично-теплових (PVT) установок.

Для оцінки енергоефективності використано комплексну систему показників, що базується на аналізі теплової та електричної складових енергетичного балансу. Також, порівняно коефіцієнти покриття теплонавантаження, коефіцієнт корисної дії системи та визначено ступінь заміщення традиційних паливно-енергетичних ресурсів обох варіантів (табл. 2), що дозволяє кількісно оцінити енергетичний та екологічний ефект від впровадження PVT-технологій.

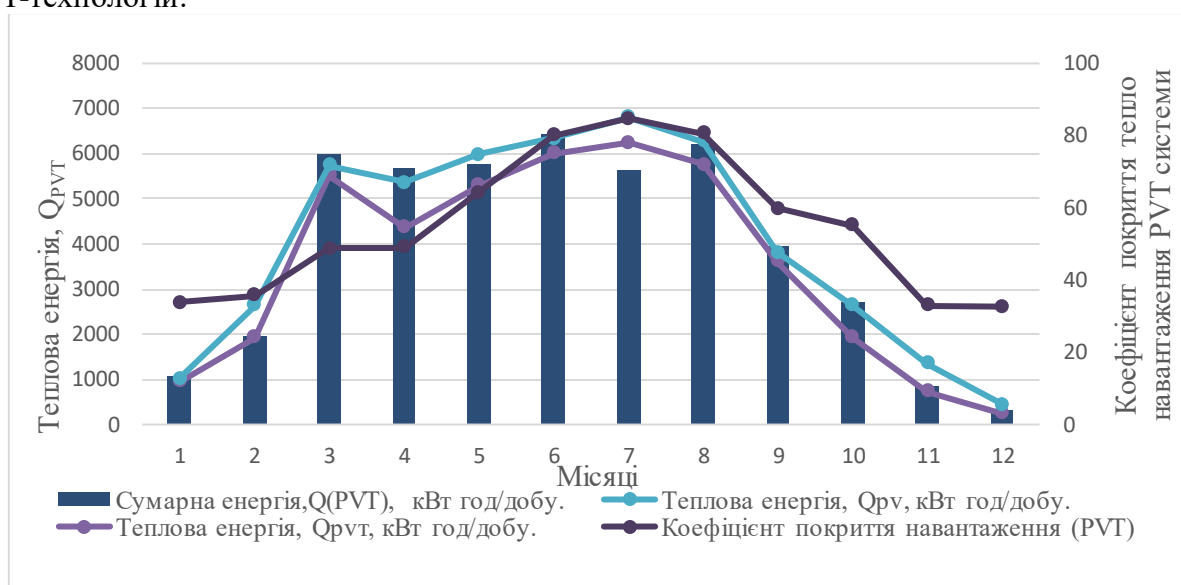


Рисунок 2 - Теплове навантаження установки PVT - теплопостачання

Аналіз результатів моделювання дозволяє оцінити енергетичну ефективність обох систем у різні сезонні періоди.

Зимовий період (листопад – лютий). У цей проміжок спостерігається мінімальна теплопродуктивність (табл. 2). Традиційна геліосистема не забезпечує повного покриття навантаження, особливо у грудні, де коефіцієнт покриття становить лише 10 – 15%. Гібридна PVT-система в цей час також працює в умовах дефіциту теплової енергії (коефіцієнт покриття 25-30%), проте вона демонструє кращу загальну ефективність за рахунок одночасної генерації електроенергії. Вироблену електричну енергію можна спрямувати на живлення циркуляційних насосів або часткову компенсацію дефіциту тепла (на 10–25%) за допомогою пікових електронагрівачів, що дозволяє оптимізувати загальне енергоспоживання об'єкта.

Перехідні періоди (березень – квітень, жовтень). У ці місяці фіксується різке зростання генерації. Коефіцієнт покриття для традиційної системи зростає до 16–28. Для PVT-системи він стабільно перевищує теплове навантаження, забезпечуючи при цьому суттєвий вихід електричної енергії (табл. 2), що створює додатковий енергетичний запас для потреб промислової будівлі.

Літній період (травень – серпень). Цей етап характеризується значним надлишком теплової енергії. Коефіцієнти покриття для обох систем сягають максимальних значень (від 80 до 93). Ключовою перевагою PVT-системи в цей період є пікова генерація електроенергії, яка,

на відміну від надлишкового тепла, може бути легко інтегрована в загальну електричну мережу підприємства або використана для охолодження приміщень, підвищуючи сумарний енергетичний ККД всієї установки.

Для умов Дніпропетровської області встановлено, що використання PVT-панелей дозволяє збільшити час корисної експлуатації установки на 15–20% у зимовий період. Це досягається за рахунок здатності фотоелектричного контуру генерувати енергію при низьких рівнях інтенсивності сонячної радіації ( $E_{\text{мр}} < 200 \text{ Вт/м}^2$ ), коли тепловий контур традиційної системи залишається неефективним через високі втрати в навколишнє середовище.

Коефіцієнт продовження періоду ефективної роботи системи ( $K_{\text{ext}}$ ) визначався як відношення тривалості активної генерації енергії обох систем:

$$K_{\text{ext}} = \frac{T_{\text{PVT}}}{T_{\text{PV}}}, \quad (1)$$

де  $T_{\text{PVT}}$  — кількість годин (або днів) на рік, коли PVT-система видає енергію, достатню для покриття потреб;

$T_{\text{PV}}$  — аналогічний показник для базової системи.

Порівняльний аналіз тривалості роботи показав, що традиційна геліосистема у перехідний період забезпечує ефективне покриття навантаження лише протягом 6 годин пікової інсоляції, тоді як гібридна PVT-система розширює цей інтервал до 9 годин завдяки ранньому старту фотоелектричного контуру.

Таблиця 2 – Порівняльна характеристика енергетичної ефективності та ступеня енергозаміщення базової та гібридної геліосистем

Показник	Мінімальні	Максимальні	Середнє
Теплова енергія PV, кВт·год/добу	240,2	6244,9	3462,7
Теплова енергія PVT (теплова част.), кВт·год/добу	213,5	6151,1	171,6
Електрогенерація PVT, кВт·год	133,5	209,9	171,7
Сумарна енергія PVT, кВт·год/добу	346,96	6360,96	3180,48
Сумарний ККД PVT, %	40	60	50
Коефіцієнт покриття PV	0,7	15,1	9,3
Коефіцієнт покриття PVT	2,6	16,8	10,3
Ступінь заміщення традиційного палива PV	0,7	47,9	19,2
Ступінь заміщення традиційного палива PVT	0,6	43,3	17,4

Використання електричної складової для компенсації теплового дефіциту дозволяє PVT-установці функціонувати на 1,5 години довше на початку та в кінці світлового дня порівняно з інерційною тепловою системою. У результаті розрахований коефіцієнт продовження періоду роботи ( $K_{\text{ext}}$ ) становить 1,5, що підтверджує вищу адаптивність гібридної технології до змінних кліматичних умов при енергозабезпеченні промислових будівель.

## ВИСНОВКИ

Традиційні геліосистеми PV є ефективними лише в тепловому аспекті, але мають обмеження через сезонність. Гібридні PVT-системи забезпечують одночасне виробництво тепла та електроенергії підвищення загального ККД до 60%, більш стабільну роботу протягом року. Підвищення ефективності гібридних PVT-систем у зимовий період року на 10 -15%, обумовлене сукупністю фізичних факторів: більш повним використанням сонячного спектра; зниженням температури фотоелементів і зростанням їх ККД; утилізацією теплових втрат, які в традиційних системах розсіюються; зменшенням теплових втрат з колектору; можливістю комбінованого використання теплової та електричної енергії.

У результаті гібридні системи демонструють вищу сумарну енергетичну ефективність і більший розрахований коефіцієнт продовження періоду роботи ( $K_{ext}$ ), що становить 1,5 та дозволяє збільшити час корисної експлуатації установки на 15–20%, що підтверджує вищу адаптивність гібридної технології до змінних кліматичних умов при енергозабезпеченні промислових будівель. Такий підхід дозволяє адаптувати систему теплопостачання до мінливих кліматичних умов регіону, забезпечуючи стабільність енергогенерації протягом року.

### Список використаних джерел

1. Кудря С. О. Відновлювані джерела енергії: підручник. – Київ: Інститут відновлюваної енергетики НАН України, 2020. – 392 с.
2. Каплун В. В., Бойко Р. В. Аналіз ефективності сонячних теплових колекторів у системах гарячого водопостачання // Відновлювана енергетика. – 2019. – № 3. – С. 45–52.
3. Петренко В. О., Іваненко І. М. Дослідження гібридних фотоелектрично-теплових колекторів (PVT) для систем теплопостачання // Теплоенергетика. – 2021. – № 2. – С. 67–74.
4. Басанец В. Г., Ткаченко С. Й. Порівняльний аналіз енергетичної ефективності сонячних систем різних типів // Енергетика та електрифікація. – 2020. – № 5. – С. 23–29.
5. ДСТУ 4034-2001.
6. Гелетуха Г. Г., Железна Т. А. Перспективи використання відновлюваних джерел енергії в Україні. – Київ: Біоенергетична асоціація України, 2018. – 84 с.
7. Adam Samsudin Recent advances in photovoltaic thermal collectors (PVT): from conventional designs to high insulation glazing and semi-transparent PVT for building applications / Adam Samsudin, Hasila Jarimi Wardah Fatimah Mohammad Yusoff Ubaidah Syafiq, Tajul Rosli Razak, Emy Zairah Ahmad, Shafidah Shafian, Muaz Mohd Zaini Makhtar, Yuehong Su/ Journal of Building Engineering. Vol. 116, 2025, 114500. URL <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2025.114500>.

Yelistratova N.Y.

## COMPREHENSIVE EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF SOLAR THERMAL AND PHOTOTHERMAL SYSTEMS

*Modern strategies for decarbonising the energy sector require the widespread adoption of renewable energy sources, with solar technologies playing a leading role. Solar thermal systems, which convert solar radiation directly into thermal energy, are traditionally used to meet hot water supply (HWS) needs. At the same time, the development of photovoltaic technologies has led to the emergence of hybrid photovoltaic-thermal (PVT) systems capable of generating both electrical and*

*thermal energy simultaneously. This creates new opportunities for increasing the energy density of power supply systems, but requires a thorough analysis of their comparative feasibility under real operating conditions. The need to choose between traditional solar thermal systems and hybrid PVT systems is often complicated by various evaluation criteria: ranging from direct thermal output to overall environmental performance over the life cycle. This study provides a comprehensive assessment of the energy and environmental performance of both types of systems in DHW networks.*

*The aim of the research is to identify the advantages and limitations of each technology, thereby enabling the formulation of scientifically sound recommendations regarding their optimal selection to enhance energy efficiency and reduce anthropogenic impact on the environment. This paper proposes an original method for calculating the coefficient of extension of the effective operating life of solar energy in hybrid systems. A key element of the methodology is the introduction of the 'solar thermal supply operating period extension coefficient', which allows for a quantitative assessment of the extension of the system's operational window during daylight hours and over the annual cycle. The proposed approach is based on a comparison of the duration of active energy generation by a hybrid PVT system and a conventional solar thermal collector under identical insolation conditions. The main advantage of this methodology is the ability to demonstrate the energy efficiency of PVT solutions even during periods of low solar activity, when the electrical component compensates for the system's thermal inertia and ensures an earlier start-up. An important feature of the study is that improved energy efficiency is achieved whilst fully retaining the existing design parameters and technical requirements for the hot water supply network of an industrial building. This makes the methodology practically valuable for the modernisation of an enterprise's energy systems, as it does not require a radical change to the hydraulic structure of the DHW system, but significantly improves the facility's annual energy balance.*

**Keywords:** solar system, heat collector, PVT panels, solar energy, hot water supply, energy efficiency, environmental efficiency, renewable energy sources.

*Стаття надійшла 02.04.2026р.*

*Стаття прийнята 05.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

275 – Транспортні технології  
УДК 656.022:656.1

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359347](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359347)

Клецька О.В., Іванченко Д.А., Фалендиш А.П.,  
Васильніченко О.С., Шикаловський Д.Г.

## МЕТОДИКА ВИЗНАЧЕННЯ ТРАНСПОРТНОГО ЗАСОБУ ДЛЯ ПЕРЕВЕЗЕННЯ ЗАДАНОЇ КІЛЬКОСТІ ПАСАЖИРІВ

У роботі розглянуто питання визначення транспортного засобу для пасажирських перевезень. Виконання пасажирських перевезень в сучасних умовах України залежить від багатьох факторів та ризиків. Одним із способів підвищення ефективності пасажирських перевезень являється правильний та раціональний вибір транспортного засобу для перевезення пасажирів, який залежить від багатьох факторів, до основних з яких входять їх кількість, дальність перевезення, умови комфорту та інші. Виконаний аналіз підходів до вибору наземних транспортних засобів. Запропонована методика вибору транспортного засобу для перевезення заданої кількості пасажирів. Вона складається з трьох складових. Спочатку запропоновано підхід для визначення виду транспорту для перевезення, який базується на використанні методу аналізу ієрархій та складається з трьох рівнів. На першому рівні сформулюється мета розрахунків. На другому рівні експертним методом вибираються показники, які характеризують транспортний засіб при перевезенні та розробляється матриця порівнянь видів транспорту по даним показникам. На третьому рівні розраховуються коефіцієнти критеріїв вибору для кожного виду транспорту. На другому етапі запропонована методика вибору конкретного транспортного засобу для вибраного виду транспорту. В роботі наведений вибір автомобільного транспортного засобу для перевезення пасажирів. Для вирішення цієї складової методики був використаний метод аналізу ієрархій або методи оцінки технічного рівня транспортних засобів. Кінцевою операцією являється вибір кількості транспортних засобів для задоволення заданих пасажирських перевезень. На основі розробленої методики були виконані розрахунки вибору типу та кількості транспортних засобів для перевезення десяти не великих груп пасажирів за кордон. Запропонована методика вибору транспортного засобу для перевезення пасажирів дозволяє визначати вид транспорту і серію та технічні характеристики транспортних засобів з врахуванням їх технічного стану на підприємстві на момент розрахунків.

**Ключові слова:** автомобільний транспорт, пасажирські перевезення, автобус, міжнародні перевезення, метод аналізу ієрархій, технічний рівень.

**Постановка проблеми.** Вибір транспортного засобу, його типу та кількості для регулярних та нерегулярних перевезень пасажирів в теперішній час має велике значення. Правильний вибір залежить від багатьох факторів, які впливають на перевезення і повинні бути враховані. Тому дана науково-практична проблема в теперішній час має велике значення.

Для вирішення даної проблеми необхідно розробити методику по визначенню транспортних засобів по перевезенню пасажирів. В ній повинні вирішуватися наступні питання та завдання:

- визначити вид транспорту для перевезення заданої кількості пасажирів;
- визначити тип транспортних засобів для перевезення;
- розробити підхід по визначенню кількості транспортних засобів для перевезення пасажирів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Пасажирські перевезення визначаються рядом Законів України та інших нормативних документів [1-6]. Згідно з ними вони підрозділяються на внутрішні перевезення та міжнародні перевезення паса-жирів. При організації міжнародних перевезень не-обхідно враховувати і правила перетину кордону, які представлені в [7-9].

Організація пасажирських перевезень надана в нормативних документах, а також описана в підручниках і наукових працях, як для автомобільного транспорту [10], так і для залізничного [11, 12].

Проблемі підвищення ефективності пасажирських перевезень приділяється багато робіт.

Згідно з цими джерелами підвищення ефективності пасажирських перевезень в великій мірі залежить від вибору транспортного засобу для перевезень. Колектив В роботі [10] науковці під керівництвом Шморгуна Л.Г. не виділяють окремо від транс-порту для пасажирських перевезень, а приділяють увагу усім видам перевезень. Їх роботи в основному направлені на правові відносини між перевізниками та пасажирами відповідно до міжнародних правил перевезень. Основне питання в них прикуто до пасажирських перевезень в країнах співдружності незалежних держав.

В роботі [13] Босняка М.Г. широко розглядаються пасажирські перевезення. Автор виділяє багато факторів, які впливають на структуру пасажирських перевезень не залежно від виду. Особливу увагу приділено сегментації в залежності від принципу та виду транспорту. Проте автор основну увагу приділяє пасажирським перевезенням в середині країни [13].

В роботі [14] Новицького О.В. основну увагу приділено міським пасажирським перевезенням та розрахункам показників роботи пасажирського автотранспорту.

В роботі [15] науковці Кристопчук М.Є. та Лобашов О.О. приділяють увагу приміським пасажирським перевезенням. В ній описані основи технології і організації роботи в приміському пасажирському русі. В роботі [16] Соловійова О.О. в колективі з співавторами виділяють особливості пасажирських перевезень автомобільним транспортом. Транспортний засіб для перевезення пасажирів рекомендується виконувати за результатом порівняння приведених витрат за рік на перевезення.

В роботі [17] викладачі Вінницького державно-го аграрного університету приділяють велику увагу вибору транспортного засобу для сільськогосподарських робіт по перевезенню зерна. Аналогічний підхід представлений і в роботі [18] авторами Хаврук В.О. та Пархоменко О.О.

В роботах [19-20] науковці Приазовського державного технічного університету розглядали вибір транспортних засобів для перевезення зерна та пасажирів за кордон з використанням методів оцінки технічного рівня. Але узагальнюючої методики по вибору транспортного засобу для пасажирських перевезень в наведених роботах не має.

**Мета дослідження.** Розробити методику визначення транспортних засобів для перевезення заданої кількості пасажи-рів, яка б враховувала вид транспорту, регіон перевезення, техніко-економічні характеристики транспортних засобів та умови сервісу для пасажирів.

**Матеріали та методи** Об'єктом нашого дослідження є процес пасажирських перевезень як в середині країни, так і за рубіж. Предметом дослідження є методи та моделі по визначенню основних характеристик транспортних засобів та самих їх типів.

При розробці методики використовуються методи аналізу ієрархій, методи оцінки технічного рівня транспортних засобів, методи аналізу та син-тезу. При проведенні розрахунків та моделюванні використовуються програмні продукти Microsoft Office.

**Основний матеріал дослідження.** Вибір транспортного засобу для перевезення необхідної кількості пасажирів залежить від багатьох факторів, серед яких можна виділити наступні:

- потужність пасажиропотоку на маршруті;
- нерівномірність розподілу заявок пасажирів;
- раціональний інтервал слідування транспорту;
- дорожні умови,
- пропускну здатність прикордонних пунктів при перевезеннях за кордон;
- собівартість перевезень та ін.

Аналіз існуючих підходів до вибору транспортного засобу для перевезення групи пасажирів, які викладені в працях [16-20] привів до висновку розробки загальної методики визначення засобу для пасажирських перевезень. Запропонована методика складається з трьох взаємо пов'язаних складових (рис.1):

- визначення виду транспорту для перевезення пасажирів;
- визначення типу транспортного засобу для перевезення;
- визначення парку транспортних засобів для виконання запланованих перевезень.

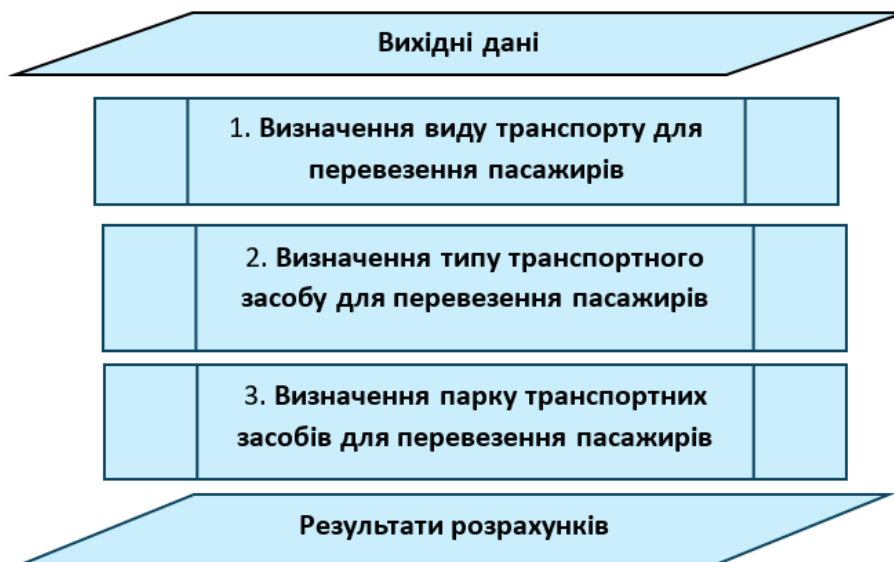


Рисунок 1 – Алгоритм методики визначення транспортного засобу для перевезення пасажирів

Для кожної складової запропонована окрема методика розрахунку.

Вихідними даними для вирішення поставленої проблеми є наступний масив показників Мвх.дані:

$$\text{Мвх.дані} = \{Q_{zer}, P_{poch}, P_{otr}, L_{v-p}, T_{v-p}, R_{uz}\}, \quad (1)$$

де  $Q_{zer}$  – загальна кількість пасажирів, пас;

$P_{poch}$  - початковий пункт відправлення пасажирів;

$P_{otr}$  - пункт призначення для пасажирів;

$L_{v-p}$  – відстань між пунктом відправлення та прибуття, км;

$T_{v-p}$  – тривалість поїздки, год;

$R_{uz}$  – ризики.

Розглянемо першу складову методики. Вона передбачає визначення виду транспорту для перевезення пасажирів. В основу розрахунків взятий метод аналізу ієрархій, що представляє собою один з багатьох математичних апаратів прийняття рішень [21-23].

Він дозволяє в інтерактивному режимі знаходити вид транспорту для перевезення пасажирів, який в даний момент часу найкраще підходить. Вирішення завдання складається з трьох кроків.

Крок 1. Визначення основної мети нашого завдання,  $M_1$  мета. Він представляє перший рівень ієрархії.

Крок 2. Визначення множини критеріїв важливості,  $M_{2кр.важл.}$ ,

$$M_{2кр.важл.} = \{M_{2кр.1}, M_{2кр.2}, \dots, M_{2кр.n}\}, \quad (2)$$

де  $M_{2кр.i}$  –  $i$ -ий критерій важливості на другому рівні;

$n$  – кількість критеріїв важливості.

Крок 3. Визначення альтернати, тобто виду транспорту для пасажирських перевезень,  $VYDs$ .

На першому кроці визначається основна мета нашого дослідження – вибір виду транспорту для перевезення пасажирів.

На другому кроці з використанням методу парних порівнянь визначаються пріоритети усіх елементів ієрархії. З використанням шкали Сааті [22] встановлюються відносні важливості елементів усіх рівнів.

Зробивши припущення, що  $A, A_2, \dots, A_n$  – множина з  $n$  елементів, то  $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n$  будуть представляти відповідно їх інтенсивності. Згідно з методом матриця парних порівнянь має властивість зворотної симетрії, тобто

$$\mu_{ji} = 1/\mu_{ij}. \quad (3)$$

Множина векторів пріоритетів критеріїв являється результатом обробки матриць попарних порівнянь. Для цього оцінюються елементи верхнього рівня ієрархії. На завершальному етапі оцінюються безпосередньо альтернативи.

На третьому кроці в результаті послідовного визначення векторів пріоритетів альтернатив пасажирських перевезень щодо критеріїв їх оцінки виконується їх ієрархічний синтез. При цьому визначення значень векторів пріоритетів виконується в напрямку від нижнього рівня до верхнього з врахуванням конкретних зав'язків між критеріями, що належать різним рівням. Розрахунки виконуються шляхом множення відповідних векторів на матриці.

Для визначення показника можливості використання конкретного виду транспорту для перевезення пасажирів використовують експертний метод. При цьому враховують регіони розміщення пунктів відправлення та прибуття по найбільшому вектору пріоритетності.

Для вирішення задачі другої складової методики будемо використовувати також метод аналізу ієрархій та методи оцінки технічного рівня транспортних засобів.

Вибір конкретного пасажирського транспортного засобу виконується експертним методом з врахуванням результатів розрахунку по методу аналізу ієрархій та методів визначення технічного рівня транспортних засобів.

Вибір варіанту раціонального транспортного засобу для перевезення пасажирів знаходиться для існуючих видів транспорту. При цьому вибір зупиняється на тому засобі, який в даний момент часу найкраще підходить для перевезення пасажирів.

Розглянемо методику вибору автотранспортного засобу на основі методу аналізу ієрархій, яка складається з трьох етапів, аналогічних, які описані при вирішенні першої складової методики. Розглянемо використання цієї методики для нашого випадку.

Згідно з [20] для вибору раціонального транспортного засобу для пасажирських перевезень необхідно враховувати наступні фактори:

- Транспортні;
- Дорожні;
- Природно-кліматичні;
- Конструкційні;
- Експлуатаційні якості;
- Економічні й натуральні критерії та ін.

Дані фактори представляють масив показників  $M_{тзп}$ ,

$$M_{тзп} = \{M_{тзпi}\} \quad (4)$$

У відповідності з методологією кваліметричних розрахунків даний масив повинен містити від 4 до 11 показників. Оскільки ці показники мають різну розмірність, то їх порівнювати між собою не можна. Для можливості порівняння цих показників будемо використовувати відносні показники  $m'_{ij}$ . Вони будуть представляти відношення даного показника  $M_i$  до базового показника  $M_{ікрп.баз}$ ,

$$m'_{ij} = M_{ij} / M_{ікрп.баз} \quad (5)$$

Оскільки показники мають різну вагу при формуванні узагальненого критерію по вибору транспортного засобу введемо показник значущості, який будемо називати «рангом»,  $Rang_{ij}$ . Ранг визначається експертним методом, а його вагу ві будемо визначати за формулою,

$$v_{ij} = 1 / Rang_{ij}. \quad (6)$$

Коефіцієнт рівня транспортного засобу для перевезення пасажирів визначаємо за формулою,

$$K_{тзпj} = \sum_{i=1}^n v_{ij} * m'_{ij}. \quad (7)$$

Транспортний засіб для перевезення пасажирів вибирають по найбільшому коефіцієнту рівня, тобто,

$$TrZac_{opt} = TrZac_j (K_{тзj} = \max) \quad (8)$$

Вибраний транспортний засіб необхідно перевірити на відповідність дорожнім умовам по габаритним розмірам та допуску руху по визначених маршрутах.

Другий підхід вибору транспортного засобу для перевезення пасажирів базується на методах оцінки технічного рівня транспортних засобів. Він дозволяє оцінити транспортні засоби з технічної сторони, тобто степінь їх технічної досконалості.

Для вирішення задачі третьої складової методу будемо використовувати загальноприйняті підходи [10, 13], [17]. Загальну необхідну кількість транспортних засобів для виконання заданого обсягу перевезень пасажирів будемо визначати за формулою,

$$N_{\text{тр.зас}} = \frac{Q_{\text{пас}} * l_{\text{маршр}}}{m_{\text{пас}} * \gamma_{\text{нап}} * v_{\text{маршр}} * T_{\text{нар}}}, \quad (9)$$

де  $Q_{\text{пас}}$  – кількість пасажирів, яких необхідно перевезти, чол;  
 $l_{\text{маршр}}$  – середня відстань поїздки, км;  
 $m_{\text{пас}}$  – середня місткість транспортного засобу, чол;  
 $\gamma_{\text{нап}}$  – коефіцієнт наповнення;  
 $v_{\text{маршр}}$  – експлуатаційна швидкість, км/год;  
 $T_{\text{нар}}$  – час перебування транспортного засобу в наряді, год.

Якщо необхідно буде визначити кількість транспортних засобів для обслуговування певного маршруту з урахуванням нерівномірності руху, то тоді кількість транспортних засобів будемо визначати за формулою,

$$N_{\text{тр.зас}} = \frac{Q_{\text{пас}} * l_{\text{маршр}} * k_{\text{н\_доб}} * k_{\text{н\_міс}} * k_{\text{н\_напр}} * k_{\text{н\_діл}}}{m_{\text{пас}} * \gamma_{\text{нап}} * v_{\text{маршр}} * T_{\text{нар}}}, \quad (10)$$

де  $k_{\text{н\_доб}}$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність перевезення пасажирів по годинах доби;

$k_{\text{н\_міс}}$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність перевезень пасажирів на протязі місяця;

$k_{\text{н\_напр}}$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність перевезення пасажирів по напрямку слідування;

$k_{\text{н\_діл}}$  – коефіцієнт, який враховує нерівномірність перевезення пасажирів на ділянках слідування.

На основі розробленої методики був визначений вид транспортного засобу для перевезення десяти груп пасажирів в кількості від п'яти до семи чоловік в групі на відстань 340 км з пересіченням кордону в районі західних областей України.

На початку був визначений вид транспорту, яким будуть перевозити пасажирів.

На основі розробленої раніше методики побудуємо ієрархічну форму вирішення нашої проблеми. Згідно розробленої методики метою вирішення першої її складової являється визначення виду транспорту для пасажирських перевезень, яка буде представляти перший рівень ієрархії проблеми. Другий рівень ієрархії будуть представляти критерії оцінювання пасажирських перевезень, які можна виразити масивом.,

$$M2_{\text{крп. важл}} = \left\{ \begin{array}{l} M2_{\text{кр. 1}}; \\ M2_{\text{кр. 2}}; \\ M2_{\text{кр. 3}}; \\ M2_{\text{кр. 4}}. \end{array} \right\} \quad (11)$$

де  $M2_{\text{кр.1}}$  - можливості посадки висадки пасажирів;

$M2_{\text{кр.2}}$  - довжина шляху перевезення;

$M2_{\text{кр.3}}$  - вартість перевезення;

$M2_{\text{кр.4}}$  – кількість пасажирів в групі.

Третій рівень ієрархії визначення виду транспорту для перевезення пасажирів буде представляти масив видів транспорту  $M3_{\text{вид.трп.}}$ ,

## Транспортні технології

$$M3\text{вид. трп.} = \begin{cases} M31; \\ M32; \\ M33; \\ M34; \\ M35. \end{cases} \quad (12)$$

де M31-автомобільний транспорт;  
 M32-залізничний транспорт;  
 M33-водний транспорт;  
 M34-повітряний транспорт;  
 M35-комбіновані перевезення.

На другому етапі були визначені з використанням методу парних порівнянь та шкали Сааті пріоритети усіх елементів ієрархії. Розрахунки ведуться в табличній формі та представлені в табл.1.

Таблиця 1 – Вибір виду транспорту: матриця порівнянь для другого рівня

	Можливість посадки/висадки пасажирів	Довжина шляху	Вартість перевезення	Кількість пасажирів в групі	Вектор пріоритетів
1	2	3	4	5	6
Можливість посадки / висадки пасажирів	1	2	1	7	0.36
Довжина шляху	1/2	1	1/5	2	0.12
Вартість перевезення	1	5	1	7	0.46
Кількість пасажирів в групі	1/7	1/2	1/7	1	0.06

Оцінку варіантів рішення по вибраному набору характеристик будемо виконувати по множині матриць третього рівня, які представлені в табл.2.

На третьому етапі здійснюється послідовне визначення векторів пріоритетів перевезення пасажирів, тобто виконується ієрархічний синтез. Розрахунки виконуються множенням відповідних векторів та матриць (дивись етап 2). Результати розрахунків представлені в табл.3.

Таблиця 2 – Вибір виду транспорту: матриця порівнянь для третього рівня

	Автомобільний	Залізничний	Водний	Повітряний	Комбінований	Вектор пріоритетів
1	2	3	4	5	6	7
<b>Можливість посадки/висадки пасажирів</b>						
автомобільний	1	3	0	8	0,5	0,34
залізничний	1/3	1	0	8	0,5	0,27
водний	0	0	0	0	0	0,00
повітряний	0,125	0,125	0	1	0,125	0,04
комбінований	2	2	0	8	1	0,35

<b>Довжина шляху перевезення</b>						
автомобільний	1	3	5	1/3	0,5	0,22
залізничний	1/3	1	4	1/3	0,5	0,14
водний	1/5	0,25	1	1/6	1/6	0,04
повітряний	3	3	6	1	3	0,35
комбінований	2	2	6	1/3	1	0,25
<b>Вартість перевезення</b>						
автомобільний	1	0,5	1/3	6	1/2	0,16
залізничний	2	1	1/2	7	1/2	0,21
водний	3	2	1	8	1/4	0,27
повітряний	1/6	1/7	1/8	1	1/8	0,03
комбінований	2	2	4	8	1	0,33
<b>Кількість пасажирів у групі</b>						
автомобільний	1	1/4	1/8	0,5	1	0,06
залізничний	4	1	1/4	2	1	0,18
водний	8	4	1	8	1	0,47
повітряний	2	1/2	1/8	1	1/6	0,08
комбінований	1	1	1	6	1	0,33

Таблиця 3 – Вибір виду транспорту: результуюча таблиця

	Можливість посадки / висадки пасажирів	Довжина шляху	Вартість перевезення	Кількість пасажирів у групі	Вектор пріоритетів
Коефіцієнти критеріїв вибору	0,36	0,12	0,46	0,06	
автомобільний	0,123	0,026	0,073	0,004	0,23
залізничний	0,097	0,017	0,097	0,010	0,21
водний	0,000	0,005	0,126	0,027	0,16
повітряний	0,014	0,043	0,014	0,005	0,08
комбінований	0,128	0,030	0,150	0,012	0,22

В результаті розрахунків було отримано, що виконувати задані перевезення доцільно автомобільним транспортом. Тому наступним кроком був вибір типу автотранспортного засобу для перевезення.

Пасажирські автотранспортні засоби умовно можна розділити на чотири групи: автобуси великої місткості для далекого слідування; автобуси середньої місткості; автобуси малої місткості; мікроавтобуси підвищеної комфортності.

В результаті огляду розповсюджених транспортних засобів для перевезення пасажирів автомобільним транспортом [24-26] були вибрані наступні автобуси: Neoplan N2216 SHD Tourliner; MAN Lion's Star (R03); IVECO FENIKSBUS FBI86T; Mercedes-Benz Sprinter.

Дані пасажирські автотранспортні засоби характеризуються наступними основними показниками: вартість, тис. грн.; середня витрата палива, л/100 км; максимальна швидкість, км/год.; пасажиромісткість, тис. км (табл.4).

Таблиця 4 – Загальні технічні характеристики транспортних засобів

п/п	Показники, відносних одиниць	Neoplan N2216 SHD Tourline	MAN Lion's Star (R03)	IVECO FENIKSBUS FBI86T	Mercedes-Benz Sprinter
1	Вартість, тис. грн	620	740	300	250
2	Середня витрата палива, л/100 км	25-35	30	25	21
3	Ресурс, тис. км	1500	2500	2000	2000
4	Макс. швидкість, км/год	100	100	100	120
5	Кількість пасажирів, пас	55	27	30	14

Наступним кроком було визначення відносних показників (визначаються, як відношення даного показника до базового показника) та їх рангів. Результати розрахунків занесено в табл.5. При цьому «ранг» для кожного показника визначався експертним методом.

Таблиця 5 – Розрахунки вибору транспортного засобу для перевезення пасажирів

№ п/п	Показники, відносних одиниць	Neoplan N2216 SHD Tourliner	MAN Lion's Star (R03)	IVECO FENIKSBUS FBI86T	Mercedes-Benz Sprinter 319 CDI	Ранг
1	2	3	4	5	6	7
<b>Загальні технічні характеристики транспортних засобів</b>						
1	Вартість, тис. грн	620	740	300	250	
2	Середня витрата палива, л/100 км	25-35	30	25	21	
3	Ресурс, тис. км	1500	2500	2000	2000	
4	Максимальна швидкість, км/год	100	100	100	100	
5	Кількість пасажирів, пас	55	27	30	34	
<b>Абсолютні значення показників автобусів для міжнародних перевезень</b>						
6	Вартість, тис. грн	0,952	0,740	1	0,889	1
7	Середня витрата палива, л/100 км	0,857	1	0,9375	0,937	2
8	Пасажиромісткість, пас	0,6	1	0,8	0,8	4
9	Максимальна швидкість, км/год	1	1	1	1	5
<b>Визначення ваги показників</b>						
10	Вартість, тис. грн	1	1	1	1	
11	Середня витрата палива, л/100 км	0,5	0,5	0,5	0,5	
12	Пасажиромісткість, пас	0,25	0,25	0,25	0,25	

13	Максимальна швидкість, км/год	0,2	0,2	0,2	0,2	
<b>Визначення коефіцієнта рівня автомобіля</b>						
14	Вартість, тис. грн	0,952	0,741	1	0,889	1
15	Середня витрата палива, л/100 км	0,428	0,5	0,469	0,469	2
16	Пасажиromісткість, пас	0,15	0,25	0,2	0,2	4
17	Максимальна швидкість, км/год	0,2	0,2	0,2	0,2	5
18	Сумарний коефіцієнт	1,731	1,691	1,769	1,858	

При цьому показники мають і різну вагу при формуванні узагальненого критерію по вибору пасажирського транспортного засобу. Тому для врахування цієї ваги вводиться показник значущості, який визначається експертним методом. Ваги показника віз визначаємо за формулою (6) для кожного показника і заносимо їх в табл. 5.

Коефіцієнти рівня автобусів для міжнародних пасажирських перевезень розраховуємо за формулою (7) та заносимо в табл. 5.

В результаті розрахунків кращим варіантом для перевезення малої групи пасажирів (до 7 чоловік) буде Mercedes-Benz Sprinter 319 CDI (рис.2). Даний транспортний засіб був перевірений на його відповідність дорожнім умовам по габаритним розмірам для доріг по маршруту слідування та отримав позитивні результати.



Рисунок 2 – Mercedes-Benz Sprinter 319 CDI [28]

Загальну кількість автобусів, які необхідні для перевезень, розраховували за формулою (9), і вона становила 6 автобусів з врахуванням одного резервного автобуса.

### ВИСНОВКИ

В результаті проведеного дослідження по вибору транспортних засобів по перевезенню пасажирів можна зробити наступні висновки.

Аналіз праць виробничників та науковців показав доцільність розробки методики по визначенню типу транспортного засобу для перевезення пасажирів з врахуванням усіх видів транспорту.

На основі існуючих підходів була запропонована методика визначення транспортного засобу, яка складається з трьох частин. Спочатку визначається вид транспорту, яким доцільно виконувати перевезення за рахунок розробленої методики. Потім визначається сам тип транспортного засобу з використанням методу аналізу ієрархій. Завершає методику розрахунок кількості транспортних засобів для виконання заданих перевезень.

Апробація методики була виконана на розрахунок кількості транспортних засобів для перевезення груп пасажирів на відстань 340 км з перетином кордону.

В подальшому методику бажано перевірити для змішаних видів перевезень та інших підходів по визначенню транспортних засобів для перевезення.

### Список використаних джерел

1. Закон України "Про транспорт"/ Постанова Верховної Ради України від 10 листопада 1994 року N 233/94-ВР. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-%D0%B2%D1%80#Text>
2. Закон України «Про автомобільний транспорт» від 23.02.2006 р. №3492IV: [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2344-14#Text>
3. Про затвердження Правил надання послуг пасажирського автомобільного транспорту. Постанова Кабінету Міністрів України від 18.02.1997 р. №176. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/176-97-%D0%BF#Text>.
4. Конвенція про міжнародні автомобільні перевезення пасажирів і багажу Статус Конвенції див. (997\_747) (Конвенцію ратифіковано Законом N581-XIV (581-14) від 08.04.99) [Електронний ресурс]. Режим доступу: [https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/997\\_034#Text](https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/997_034#Text).
5. Збірник законодавчих і нормативних документів, що регламентують діяльність підприємств автомобільного транспорту всіх форм власності, випуск 3. – К., 1999.
6. Порядок організації регулярних, нерегулярних і маятникових перевезень пасажирів автомобільним транспортом у міжнародному сполученні (наказ Міністерства транспорту України від 09.02.2004 №75, зареєстрований в Міністерстві юстиції України 22 червня 2004 р. за №759/9358).
7. Державна прикордонна служба України. Офіційний вебсайт. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://dpsu.gov.ua/uk/>
8. Agreement on the international occasional carriage of passengers by coach and bus (Interbus Agreement). ELI: [http://data.europa.eu/eli/agree\\_international/2002/917/oj](http://data.europa.eu/eli/agree_international/2002/917/oj)
9. 2002/917/EC: Council Decision of 3 October 2002 on the conclusion of the Interbus Agreement on the international occasional carriage of passengers by coach and bus ELI: <http://data.europa.eu/eli/dec/2002/917/oj>
10. Маруніч В.С., Шморгун Л.Г. та ін. Організація та управління пасажирськими перевезеннями: підручник/ за ред. доц. В.С. Маруніч, проф. Л.Г. Шморгуна – К.: Міленіум, 2017. – 528 с. ISBN 978-966-8063-80-1.
11. Особливості розвитку пасажирських перевезень на залізничному транспорті України // Полякова О.М., Іванченко Ю.В. / Вісник економіки транспорту і промисловості. -№ 57, 2017. -С.91-97. URI: <http://lib.kart.edu.ua/handle/123456789/458>
12. Вертель В.В. Оцінка конкурентоспроможності залізничного транспорту на ринку пасажирських перевезень / В.В. Вертель, О.С. Калюжний // Збірник наукових праць

Державного економіко-технологічного університету транспорту. Сер. : Економіка і управління, 2013. – Вип. 23-24. – С. 118-122.

13. *Босняк М.Г.* Управління процесами і системами пасажирських перевезень. Конспект лекцій. -Кривий Ріг: КрФКНАУ. 2021. -117с.

14. *Новицький О.В.* Основи теорії транспортних процесів і систем: Конспект лекцій. - Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ». 2014. -103с.

15. *Кристочук М.Є., Лобашов О.О.* Приміські пасажирські перевезення: навчальний посібник. -Х.: НТМТ, 2012, -224с. URI:

[https://www.academia.edu/Приміські\\_пасажи́рські\\_перевезення](https://www.academia.edu/Приміські_пасажи́рські_перевезення) .

16. *Соловйова О.О.* Загальний курс транспорту : навч. посібник / *О. О. Соловйова, І. І. Висоцька, І. М. Герасименко.* – К. : НАУ, 2019. – 244 с.

17. Методичні рекомендації до виконання лабораторно-практичної роботи на тему „Розрахунок потреби в транспортних засобах”. Укладачі: *А.Д. Гарькавий, Д.Г. Кондратюк, В.В. Войтенко, О.В. Холодюк* / -Вінниця. ВінДАУ. 2005. -32с.

18. Критерії оцінки й вибору рухомого складу АТП. //*В. О. Хаврук, О. О. Пархоменко* / Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту, 2021, № 2 (92) -С.17-28. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2021/235411>.

19. *Клецька О.В., Васильніченко О.С., Шикаловський Д.Г., Франків А.М.* Визначення типу пасажирського автомобіля для перевезення пасажирів у міжнародному сполученні. The 7th International scientific and practical conference “Modern science: trends, challenges, solutions” (February 12-14, 2026) Cognum Publishing House, Liverpool, United Kingdom. 2026. 137-142 p. URI:: <https://sci-conf.com.ua/vii-mizhnarodna-naukovo-praktichna-konferentsiya-modern-science-trends-challenges-solutions-12-14-02-2026-liverpul-velikobritaniya-arhiv/>

20. Визначення виду транспорту для експорту зерна в середніх об’ємах / *О.В. Клецька, В.Я. Регуш, О.В. Джус* / The 2nd International scientific and practical conference “Innovations of modern science and education” (October 29-31, 2025) Perfect Publishing, Vancouver, Canada. 2025. 354-357 p. URI: <https://sci-conf.com.ua/wp-content/uploads/2025/10/INNOVATIONS-OF-MODERN-SCIENCE-AND-EDUCATION-29-31.10.25.pdf>

21. *Стрілець В. Є.* Методи прийняття рішень : практикум. У 2-х частинах. Частина 1 [Електронне видання] / *В. Є. Стрілець, Н. С. Бакуменко, С. І. Шматков.* – Харків : ХНУ імені В. Н. Каразіна, 2024. URI: <https://ekhnuir.karazin.ua/items/3227b57c-7ea7-476f-b116-c3f9ed36cab0> .

22. *Кульчицька Х. Б.* Застосування методу аналізу ієрархій при виборі проекту в поліграфії / *Х. Б. Кульчицька, Л. С. Предко* // Поліграфія і видавнича справа. – 2018. – № 1(75). – С. 51–60. URI: <https://vlp.com.ua/node/16352> .

23. Теорія прийняття рішень : підручник / за заг. ред. *Бутка М. П.* – К. : Центр учбової літератури, 2015. – 360 с. URI: <https://djvu.online/file/25UEr8NiciSUc>.

24. KLR Bus About the company. [Electronic resource]. Access mode: <https://klr.com.ua/about-us>

25. Green Elephant 7 Company [Electronic resource]. Access mode: <https://zs7.com.ua/>

26. Like Bus Company [Electronic resource]. Access mode: <https://likebus.ua>

27. Mercedes Benz Sprinter 2019 L4H3 RWD 319 CDI Specs [Electronic resource]. Access mode: <https://www.ultimatespecs.com/car-specs>

28. Truck1.eu [Electronic resource]. Access mode:<https://www.truck1.com.ua/txt/about>

**Kletska O.V., Ivanchenko D.A., Falendysh A.P.,  
Vasylnichenko O.S., Shykalovskyi D.G.**

## **METHOD OF DETERMINING A VEHICLE FOR CARRYING A GIVEN NUMBER OF PASSENGERS**

*The paper considers the issue of defining a vehicle for passenger transportation. Passenger transportation in modern conditions of Ukraine depends on many factors and risks. One of the ways to increase the efficiency of passenger transportation is the correct and rational choice of a vehicle for transporting passengers, which depends on many factors, the main ones of which include their number, transportation distance, comfort conditions, etc. An analysis of approaches to the selection of ground vehicles is performed. A methodology for selecting a vehicle for transporting a given number of passengers is proposed. It consists of three components. First, an approach is proposed for determining the type of transport for transportation, which is based on the use of the analysis of hierarchies method and consists of three levels. At the first level, the purpose of the calculations is formulated. At the second level, indicators that characterize the vehicle during transportation are selected by expert method and a matrix of comparisons of types of transport is developed according to these indicators. At the third level, the coefficients of the selection criteria for each type of transport are calculated. At the second stage, a methodology for selecting a specific vehicle for the selected type of transport is proposed. The paper presents the choice of a motor vehicle for transporting passengers. To solve this component of the methodology, the method of hierarchy analysis or methods for assessing the technical level of vehicles was used. The final operation is the selection of the number of transport vehicles to meet the specified passenger transportation. Based on the developed methodology, calculations were made to select the type and number of vehicles for transporting ten small groups of passengers abroad. The proposed methodology for selecting a vehicle for transporting passengers allows you to determine the type of transport and the series and technical characteristics of vehicles, taking into account their technical condition at the enterprise at the time of calculations.*

**Keywords:** road transport, passenger transportation, bus, international transportation, hierarchy analysis method, technical level.

*Стаття надійшла 03.03.2026р.*

*Стаття прийнята 06.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

275 – Транспортні технології

УДК 621.311.6:621.316.717:34.01/.09

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359374](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359374)

**Кулагін Д.О., Маслов І.З., Дєвочкін В.Ф.**

## **НОРМАТИВНО-ТЕХНІЧНІ ОСОБЛИВОСТІ ВРАХУВАННЯ ВЗАЄМНОГО ВПЛИВУ ЕЛЕМЕНТІВ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНОЇ СИСТЕМИ МОБІЛЬНОЇ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ УСТАНОВКИ З АВТОНОМНИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕЛЕКТРОЖИВЛЕННЯ**

*У роботі розглянуто актуальні питання підвищення енергоефективності та надійності мобільних енергетичних установок на основі дизель-генераторних агрегатів. Автор аналізує сучасні транспортні засоби як складні багатокомпонентні системи, де механічні, електромагнітні та термодинамічні процеси перебувають у нерозривному взаємозв'язку.*

Особливу увагу приділено дослідженню взаємного впливу елементів електромеханічного ланцюга в умовах змінних навантажень, що є характерним для автономних мобільних платформ. У ході дослідження обґрунтовано переваги переходу до інверторних систем з ланкою постійного струму, які дозволяють реалізувати режим змінних обертів дизельного двигуна. Такий підхід забезпечує роботу первинного привода в зоні мінімальної питомої витрати палива, що сприяє зниженню експлуатаційних витрат на 40% та зменшенню шкідливих викидів на чверть. На основі аналізу функцій ККД підсистеми редуктор-рушій доведено доцільність використання багатоступінчастих трансмісій, впровадження яких дозволяє підвищити загальний коефіцієнт корисної дії на 4% за рахунок оптимізації витрат на тертя. Окремий акцент зроблено на питаннях електромагнітної сумісності та конструктивної міцності генераторних вузлів. Визначено умови максимізації ККД електричних машин через раціональний розподіл постійних і змінних витрат, а також запропоновано схеми паралельного підключення перетворювачів зі спільним керуванням для стабілізації вихідних параметрів енергії. Результати роботи створюють наукове підґрунтя для побудови адаптивних систем керування, що інтегрують методи математичного моделювання та багатокритеріальної оптимізації для гарантування стабільної роботи транспортних засобів в екстремальних експлуатаційних режимах.

**Ключові слова:** система електропостачання, електричні машина та апарати, математичне моделювання, транспорт, енергетика, джерело живлення, електропривод, енергетичне законодавство.

**Постановка проблеми.** Сучасні транспортні засоби, в основі яких лежать дизель-генераторні енергетичні установки, слід розглядати не просто як автономні одиниці, а як складні багатокомпонентні системи [1]. Вони являють собою динамічне поєднання енергетичних джерел, теплообмінних апаратів, розгалужених мереж трубопроводів та механічних вузлів, які працюють у єдиному технологічному циклі. Головне завдання такої інтеграції полягає не лише у забезпеченні тягових характеристик для руху, а й у безперебійному живленні численних допоміжних систем та внутрішніх процесів [1, 2]. Саме тому в загальній номенклатурі транспортних засобів техніка з дизель-генераторним приводом займає одну з ключових позицій, залишаючись базовим рішенням для багатьох галузей економіки [3].

Аналіз наявних наукових досліджень підкреслює незмінний інтерес фахівців до вивчення експлуатаційних параметрів такої техніки. Наукова спільнота зосереджує увагу на пошуку кореляцій між технічними характеристиками окремих вузлів та загальною продуктивністю всієї установки [4]. Це дозволяє встановити фундаментальні кількісні та якісні показники, які безпосередньо впливають на ефективність роботи. Розуміння цих залежностей є критично важливим для прогнозування поведінки системи в різних режимах навантаження та для оптимізації її функціональних можливостей ще на етапі проектування або модернізації.

Питання надійності функціонування дизель-генераторних установок на транспорті нерозривно пов'язане з цілим комплексом факторів, що діють одночасно. Сюди належить технічний стан обладнання, специфіка зовнішніх умов експлуатації, фізико-хімічні властивості використовуваного палива, а також загальна кількість та потужність енергоспоживачів на борту [3, 5]. Нехтування будь-яким із цих аспектів може призвести до стрімкого зростання операційних витрат, які часто додають до вартості палива до 80% непередбачуваних витрат. Оскільки кожен споживач електричної енергії розрахований на роботу в межах чітко визначених значень напруги, сили струму та номінальної частоти,

забезпечення високої якості електроенергії стає базовою вимогою для підтримання справності всього обладнання та запобігання передчасним відмовам [6].

В умовах сьогоденної економічної нестабільності, коли ціни на енергоносії стабільно зростають щонайменше на 15–20% щороку, проблема енергоефективності стає надзвичайно гострою [7]. Пошук шляхів для ощадливого використання ресурсів є вимогою часу, проте цей процес має бути виваженим. Будь-яке впровадження технологій економії або зменшення споживання палива не повинно відбуватися за рахунок зниження експлуатаційної безпеки чи виходу за межі допустимих ризиків щодо надійності транспортної енергоустановки. Таким чином, сучасна інженерна думка спрямована на створення таких алгоритмів керування, які дозволяють досягти максимальної економії без втрати робочого ресурсу системи.

Проблема дослідження особливостей взаємного впливу елементів електромеханічної системи мобільної енергетичної установки з автономним джерелом енергії є критично важливою через складність перехідних процесів, що виникають у замкненому енергетичному контурі. На відміну від стаціонарних систем, мобільні установки працюють у режимах постійної зміни навантаження, що провокує виникнення зворотних зв'язків між дизельним двигуном, генератором та системою перетворювальної техніки [2, 8]. Електромагнітні процеси в генераторному вузлі безпосередньо впливають на термодинамічні показники двигуна внутрішнього згоряння, викликаючи нерівномірність крутного моменту та зміну питомої витрати палива. Водночас динаміка споживачів енергії через силову електроніку створює гармонійні спотворення, які негативно позначаються на ресурсі ізоляції та загальній надійності системи [4, 9]. Розуміння цих взаємозалежностей дозволяє відійти від проектування окремих вузлів до створення інтегрованої інтелектуальної системи, де кожен елемент адаптується до стану іншого. Це не просто питання технічної сумісності, а фундаментальна основа для досягнення максимального ККД та стабільності роботи транспортного засобу в умовах екстремальних експлуатаційних навантажень, що в кінцевому підсумку визначає економічну життєздатність усієї мобільної платформи.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Гарантування безперервної роботи транспортних енергоустановок неможливе без впровадження інтелектуальних систем діагностування та постійного контролю технічних параметрів безпосередньо в процесі експлуатації [7, 10]. Сучасний підхід до вирішення цих завдань полягає у проектуванні принципово нових конструкцій агрегатів та джерел енергії, які б відповідали жорстким вимогам надійності [11]. Інженерна думка сьогодні зосереджена на переході від реактивного обслуговування (ремонт за фактом поломки) до проактивних стратегій, що базуються на глибокому аналізі стану об'єкта в реальному часі [9, 12].

Важливим кроком у модернізації транспортного сектору є інтеграція новітніх дизельних агрегатів у поєднанні з сучасною напівпровідниковою перетворювальною технікою [12]. Оновлення елементної бази дозволяє не лише розширити функціонал систем управління, а й впровадити алгоритми прогнозування несправностей ще до їх критичного прояву. Практичні переваги такого підходу є очевидними: використання передової перетворювальної техніки дає змогу скоротити експлуатаційні витрати майже на сорок відсотків, одночасно знижуючи рівень шумового забруднення та спрощуючи процедури сервісного обслуговування [6, 13]. Крім того, екологічний аспект такої модернізації дозволяє зменшити обсяг шкідливих викидів у повітря на чверть, що є критично важливим для сучасних стандартів безпеки [14].

Центральною проблемою транспортної галузі залишається висока енергоємність процесів, тому підвищення енергетичної ефективності дизель-генераторних установок стає пріоритетним вектором досліджень. Вирішення цієї задачі вимагає комплексного підходу, який включає розробку оптимізованих конструкцій двигунів, створення високоефективних електричних мереж та впровадження унікальних алгоритмів цифрового керування елементами

установки [15]. Лише за умови гармонійного поєднання механічної досконалості двигуна з інтелектуальним керуванням електричною частиною можна досягти реального зниження витрат палива [16].

Постійне здорожчання дизельного пального та інших енергоресурсів ставить перед науковцями виклик: як максимально використати наявний енергетичний потенціал транспортних засобів, який наразі залишається недовикористаним [17]. В основі цієї науково-прикладної проблеми лежить необхідність подолання технічних бар'єрів, що заважають реалізації високого ККД при збереженні експлуатаційної стійкості. З огляду на стратегічне значення водного та залізничного транспорту, підвищення енергоефективності цих секторів дозволить значно знизити їхню залежність від коливань світового ринку ресурсів та інших зовнішніх дестабілізуючих факторів [10, 18].

Варто розуміти, що проблема зниження енергетичних витрат на транспорті є багатогранною та комплексною за своєю природою. Вона не може бути вирішена точковими методами, оскільки вимагає синтезу фундаментальних досліджень та практичних інженерних рішень [19]. Створення єдиної системи, яка б об'єднувала методи підвищення енергоефективності з інструментами забезпечення надійності, є єдиним шляхом до побудови автономної та економічно стійкої транспортної інфраструктури, здатної ефективно функціонувати в умовах сучасних викликів [20].

Одним із найбільш перспективних векторів підвищення енергоефективності сучасних транспортних комплексів є перехід до інверторних автономних електричних систем. Основна концепція такого підходу полягає у відмові від жорсткої фіксації частоти обертання дизельного двигуна [8, 21]. В інверторних установках агрегат працює у режимі змінних обертів, а стабілізація вихідних параметрів напруги до стандартних значень здійснюється за допомогою силового напівпровідникового каскаду, що складається з випрямляча та перетворювача частоти. Ключовою перевагою такої архітектури є можливість автоматичної адаптації роботи дизеля до поточного електричного навантаження [22]. Це дозволяє системі постійно підтримувати оптимальну частоту обертання валу, орієнтуючись на критерій мінімальної питомої витрати палива, що дає суттєву економію порівняно з класичними установками загальнопромислового типу.

Окрім паливної економічності, автономні системи інверторного типу відкривають широкі можливості для побудови гібридних енергетичних комплексів. Завдяки використанню єдиної мережі постійного або регульованого змінного струму стає можливим просте інтегрування різнотипних джерел енергії, таких як установки відновлюваної енергетики або буферні накопичувачі [23-25]. Проте реалізація такого потенціалу потребує створення високоефективних пристроїв автоматичного регулювання. Розробка алгоритмів управління, що базуються на складних законах мінімізації витрат ресурсів, вимагає побудови всеосяжних математичних моделей. Такі моделі мають враховувати динаміку дизельного двигуна, характеристики синхронного генератора, режими роботи силових перетворювачів та специфіку поведінки автономного споживача [24-26].

Особливе місце у цьому процесі посідає математичне моделювання саме дизельного двигуна, оскільки воно дозволяє досліджувати як миттєві перехідні процеси, так і тривалі режими роботи всієї установки. Незважаючи на те, що питання електромагнітних процесів у транспортних машинах загалом висвітлені в науковій літературі, досі спостерігається певний дефіцит комплексних моделей, які б одночасно описували функціонування синхронного генератора та частотного перетворювача в межах єдиної транспортної системи. Існуючі імітаційні моделі часто фокусуються лише на залежності витрати палива від моменту на валу та положення паливної рейки, залишаючи поза увагою складні взаємодії в електричній частині системи [25, 27].

Паралельно з енергетичною оптимізацією гостро постає питання інтелектуального діагностування обладнання. Традиційні логічні та алгебраїчні алгоритми, засновані на пошуку мінімальних функцій або маніпуляціях з матрицями суміжності, демонструють свою обмеженість при роботі зі складними транспортними об'єктами. Висока взаємопов'язаність функціональних параметрів та значна потужність графів станів роблять такі підходи надто громіздкими або неточними [28, 29]. Навіть використання евристичних методів із перенумерацією вершин часто призводить до надмірної кількості переборів та неоднозначності результатів, не даючи чіткого обґрунтування для вибору єдиного оптимального рішення [30].

Узагальнюючи наявний досвід, можна стверджувати, що найбільш перспективним шляхом вирішення цієї багатогранної проблеми є застосування багатокритеріальних методів прийняття рішень. Зокрема, метод покриття таблиць відстаней дозволяє більш глибоко проаналізувати та оптимізувати складні процеси в енергоустановках, долаючи недоліки попередніх алгоритмів. Саме такий системний підхід, що поєднує в собі точне математичне моделювання силових агрегатів та сучасні методи прийняття рішень, створює підґрунтя для реального підвищення енергоефективності та надійності мобільних енергетичних систем.

**Постановка завдання.** Функціонування мобільних енергетичних установок визначається складними перехідними процесами, що виникають у замкненому контурі між первинним двигуном, синхронним генератором та силовою перетворювальною технікою. Ключовою науковою проблемою на сьогодні залишається дефіцит системних досліджень саме взаємного впливу цих елементів, коли зміна робочого стану одного вузла викликає ланцюгову реакцію в усьому електромеханічному ланцюзі. Зокрема, виникає необхідність розв'язання фундаментальної суперечності між високодинамічними режимами споживання енергії та механічною інерційністю агрегатів, що потребує детального вивчення зворотного зв'язку електромагнітних процесів генератора та їхнього впливу на механічні характеристики привода.

Важливим етапом дослідження є математичне моделювання взаємодії між генератором та перетворювачем частоти з урахуванням нелінійності напівпровідникових елементів. Це дозволяє встановити межі стійкості системи при різких змінах параметрів керування інвертором та оцінити вплив якості електроенергії на виникнення додаткових втрат у залізі й обмотках електричної машини, що часто призводить до локальних перегрівів та прискореної деградації ізоляції.

Сформульовані умови мають забезпечити такий режим роботи, за якого взаємний негативний вплив елементів буде мінімізовано, що гарантуватиме максимальну енергетичну віддачу та безаварійність мобільної платформи. Вирішення цих питань дозволить створити цілісну фізико-математичну картину процесів, необхідну для побудови систем адаптивного керування енергоблоками в екстремальних умовах експлуатації.

**Мета досліджень.** Дослідження особливостей взаємного впливу елементів електромеханічної системи мобільної енергетичної установки з автономним джерелом електроживлення.

**Основний матеріал дослідження.** При сталому моменті тертя функція ККД для редуктора матиме вигляд, показаний на рис. 1.

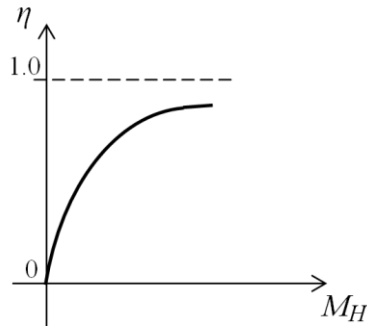


Рисунок 1 – Функція ККД від моменту навантаження транспортного редуктора

Виконаємо побудову залежності ККД редуктора за умови змінного моменту тертя (рис. 2.).

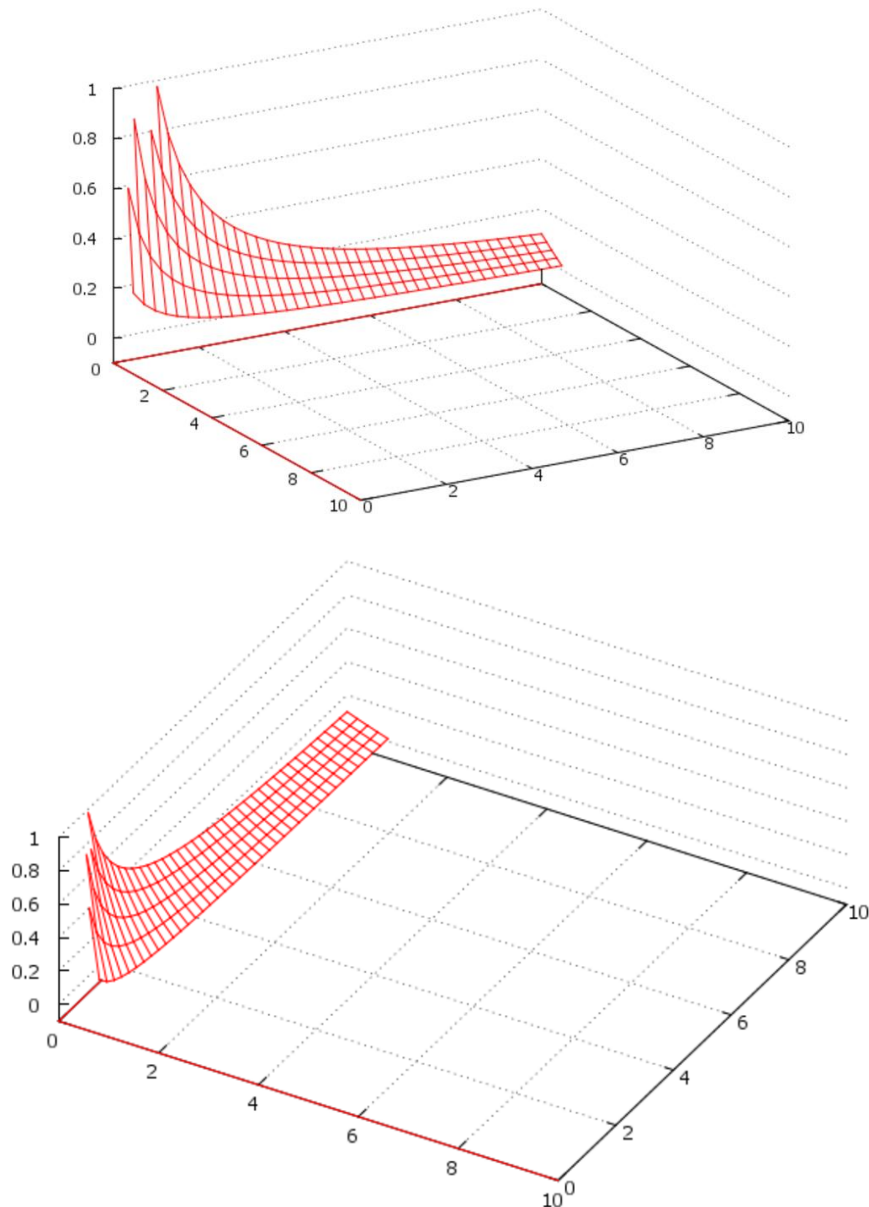


Рисунок 2 – Функція ККД (вісь аплікат у в.о.) від моменту навантаження (вісь абсцис у в.о.) та моменту тертя (вісь ординат у в.о.)

Аналіз графіків на рис. 1 та 2 свідчить, що зі зростанням навантажувального моменту ККД підсистеми двигун–редуктор–рушій також підвищується, поступово наближаючись до свого максимального значення. Таким чином, найвищий ККД підсистеми редуктор–рушій досягається при оптимальному рівні механічної потужності на вихідному валу, який відповідає характеристикам конкретного редуктора.

Залежність ККД підсистеми редуктор-рушій в залежності від кількості ступенів редуктора показано на рис. 3 виходячи з принципу ККД послідовно з'єднаних ланок.

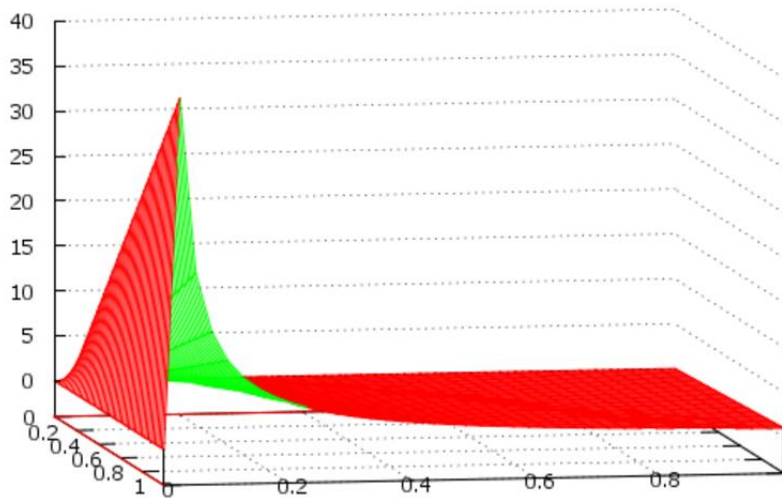


Рисунок 3 – Функція коефіцієнта втрат на тертя (відсоткового – вісь апікат) від моменту навантаження (вісь абсцис у в.о.) та моменту приводного двигуна (вісь ординат у в.о.)

На основі аналізу рис. 3 приходимо до висновку, що найбільш раціональним є використання багатоступінчатого редуктора, передаточне число якого можна змінювати в залежності від навантаження системи. Відповідно до рис. 4 такий підхід (на прикладі 4 ступенів редуктора) дозволяє збільшити ККД на 4%. При цьому значення коефіцієнта втрат на тертя змінюється як показано на рис. 4.

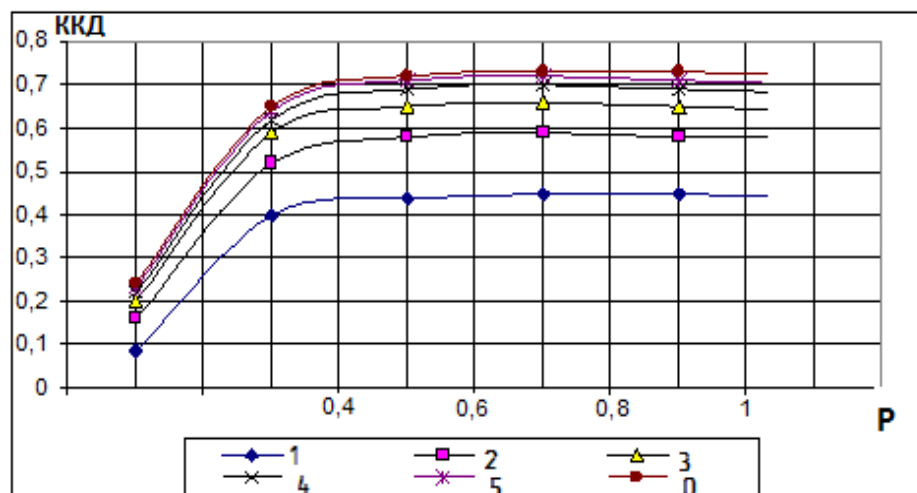


Рисунок 4 – Залежність ККД підсистеми редуктор-рушій в залежності від кількості ступенів редуктора

Збільшення потужності перетворювачів з автономними інверторами напруги здійснюється шляхом послідовного з'єднання ключів або паралельного включення перетворювачів. Через відмінності зовнішніх характеристик вирівнювання струмів здійснюється за допомогою регуляторів струму, як це показано на структурній схемі рис. 5.

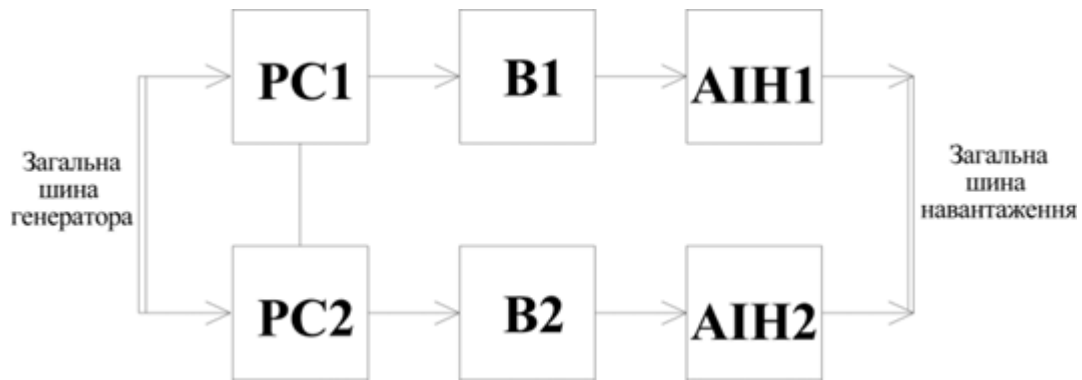


Рисунок 5 – Структурна схема паралельного підключення перетворювачів частоти з регуляторами струму

Дана схема є вельми ефективною при наявності гальванічної розв'язки з боку живлення, або навантаження. При відсутності гальванічної розв'язки дана схема практично не придатна через наявність внутрішніх зрівнювальних контурів. Для виключення появи таких контурів перетворювачі керуються однією системою, яка одночасно формує імпульси керування на відповідні ключі, що показано на рис. 6.

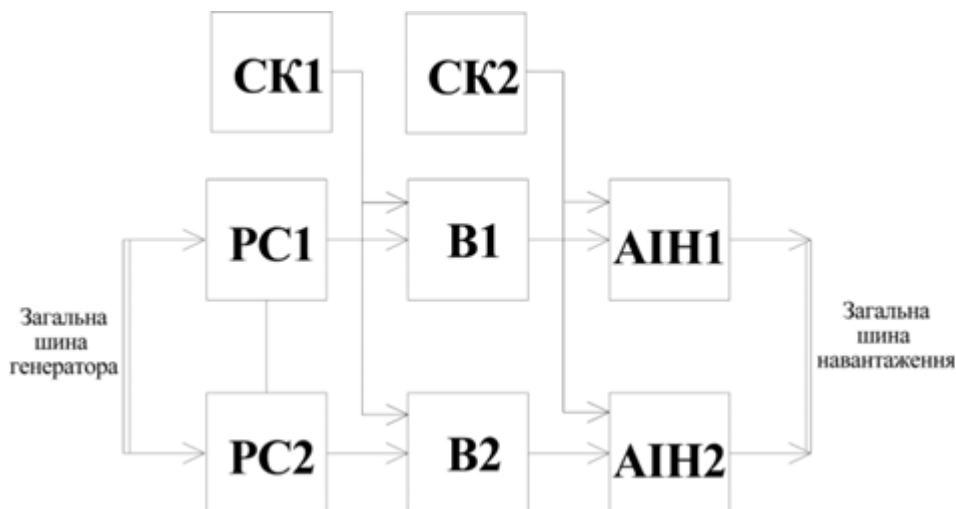


Рисунок 6 – Структурна схема паралельного підключення перетворювачів частоти зі спільними системами регулювання

В даному випадку нерівність струмів, які протікають по перетворювачам, визначається розкидом внутрішніх параметрів елементів схеми і носить сталий характер. Дещо збільшене завантаження перетворювачів з меншим внутрішнім опором є несуттєвим недоліком схеми, який виправдовується порівняно простою системою керування.

У разі змінювання навантаження асинхронного двигуна окремі види втрат змінюються по-різному: електричні втрати  $P_{el}$  в обмотках статора і ротора, а також додаткові втрати  $P_0$

змінюються пропорційно квадрату струму навантаження. Інші види втрат – механічні  $P_{\text{мех}}$  і магнітні  $P_{\text{м}}$  – залишаються практично незмінними, тобто такими самими, як і у разі холостого ходу, якщо напруга машини  $U_1$  і частота її обертання  $n_2$  не змінюються. За цією ознакою всі види втрат поділяють на дві групи:

– постійні втрати  $P_{\text{пост}} = P_{\text{м}} + P_{\text{мех}}$

– змінні втрати  $P_{\text{зм}} = P_{\text{ел}} + P_{\text{щ,ел}} + P_{\text{д}}$ , тобто втрати, що змінюються приблизно пропорційно квадрату струму навантаження.

Потужність  $P_2$  ( $P_2 = P_{\text{мех}}$  – в двигунах) пропорційна струму навантаження  $I$  в першому ступені. Отже, залежність ККД машини від струму навантаження можна виразити у вигляді:

$$\eta(I) = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{(P_2 + P_{\text{пост}} + P_{\text{зм}})} = \frac{AI}{(AI + B + CI^2)}, \quad (1)$$

де  $A, B, C$  – сталі значення.

Зі збільшенням струму навантаження ККД двигуна зростає за рахунок збільшення потужності  $P_2$ , але водночас швидше, ніж  $P_2$ , зростають і змінні втрати  $P_{\text{ем}}$ . Тому, після досягнення струмом певного значення  $I_{\text{кр}}$ , зростання ККД припиняється, і надалі він починає

зменшуватись. Взявши похідну  $\frac{d\eta}{dI}$  і прирівнявши її до нуля, можна отримати умову

максимуму ККД:  $\eta$  приймає максимальне значення за такого навантаження, коли  $P_{\text{ем}} = P_{\text{пост}}$ . Тому під час вибору двигуна для транспортної системи слід розподілити втрати потужності таким чином, щоб умова  $P_{\text{ем}} = P_{\text{пост}}$  виконувалась у разі найбільш ймовірного навантаження машини, трохи меншого за номінальне навантаження. В машинах середньої і великої потужності ця умова виконується тоді, коли навантаження становить (60 ÷ 85) % номінального. У цьому разі в діапазоні навантажень (0,6 ÷ 1,0) номінального навантаження ККД залишається приблизно однаковим.

Розглянемо основні варіанти реалізації загальної шини постійного струму, використовуючи дослідження.

Для засобів транспорту із передачею змінного струму найбільш доцільним рішенням є використання синхронного генератора. У разі застосування на засобах транспорту малої потужності можливе використання генератора постійного струму. Хоча експлуатаційні умови для такого генератора загалом сприятливіші, ніж для тягових електродвигунів, наявність колектора є суттєвим недоліком, що обмежує його використання лише окремими випадками при невеликих потужностях.

Перший тип системи передачі змінного струму (рис. 7) включає синхронний генератор та групу асинхронних короткозамкнених двигунів. Така схема має назву «прозора», оскільки обертальний момент асинхронних двигунів прямо пропорційний моменту, що створюється на валу синхронного генератора. Зміна частоти живильної напруги здійснюється переважно шляхом регулювання частоти обертання дизельного двигуна. Для точнішого регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів також змінюють кількість полюсів як синхронного генератора, так і асинхронного двигуна. У такій системі перетворювач не використовується, а регулювання напруги здійснюється за допомогою регулятора у колі збудження генератора.

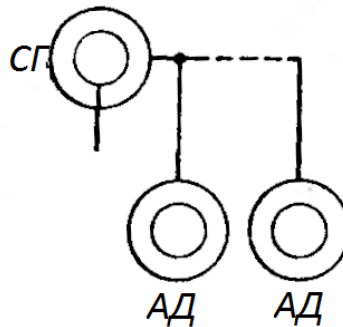


Рисунок 7 – Структурна схема побудови кола синхронний генератор-тяговий двигун без перетворювача частоти

Перевагою такої системи є її відносна конструктивна простота. Водночас вона має низку суттєвих недоліків: низьку точність налаштування координат, відсутність спільної шини постійного струму, а також необхідність роботи синхронних генераторів у швидкозмінних режимах, що зумовлює значні енергетичні втрати та неефективну роботу теплового двигуна. Усе це обмежує застосування такої системи лише електромеханічними установками невеликої потужності.

Для виконання передачі рис. 8 використовується генератор постійного струму, автономний інвертор і асинхронний двигун і вона може називатися передачею постійного та змінного струму одночасно.

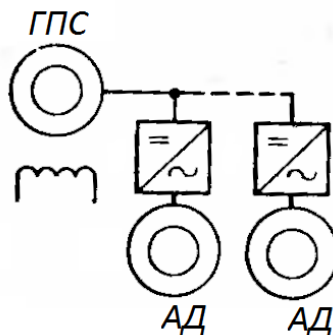


Рисунок 8 – Структурна схема передачі з індивідуальним перетворювачем

Незалежно від частоти обертання валу генератора, інвертор змінює частоту напруги статора двигуна. Як і у всіх інших варіантах, в ланцюзі збудження генератора передбачений регулятор. Кожен інвертор у системі має власну систему керування. Окрім цього, регулятори частоти мають бути індивідуально передбачені для кожного електродвигуна або для групи двигунів. Двигуни можуть підключатися як до окремих інверторів, так і паралельно до спільної шини постійного струму.

Серед переваг такої конструкції – висока точність налаштування координат електроприводу та робота генератора у майже сталому режимі, що сприяє підвищенню енергоефективності. Водночас існують і недоліки: відсутність єдиної шини постійного струму для всього засобу транспорту (напруга в ланках випрямлячів може відрізнятись), а також наявність рухомих контактів у генераторах. Ці особливості зумовлюють доцільність використання даної схеми в електромеханічних системах середньої потужності.

Система, зображена на рис. 9, відрізняється від попередньої тим, що генератор постійного струму замінено синхронним генератором та випрямлячем, який може бути як некерованим, так і керованим. Кожен інвертор у цій схемі використовується окремо або, зазвичай, є спільним для всіх інверторів.

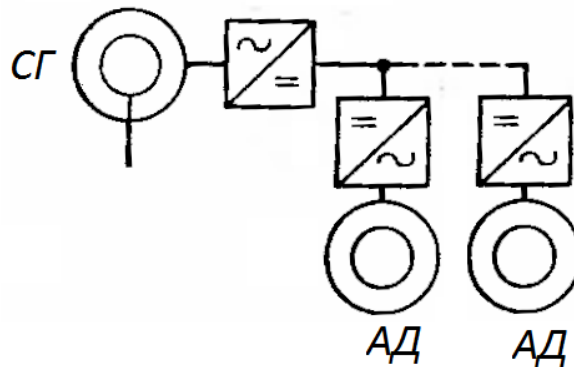


Рисунок 9 – Структурна схема передачі з індивідуальним автономним інвертором напруги та загальним випрямлячем

Якщо випрямляч є керованим, до системи додається система керування, яка або інтегрується з системою керування синхронним генератором чи інвертором, або передбачає окремий регулятор. Усі ці компоненти разом утворюють систему передачі АС-DC-АС.

Перевагами такої конструкції є точне регулювання координат електроприводу, генератор працює практично в постійному робочому режимі, відсутність рухомих контактів в колі. Все це обумовлює використання даної системи в електромеханічних системах середньої та великої потужності.

У системі рис. 10, показано використання прямого перетворювача частоти замість перетворювача з ланкою постійного струму.

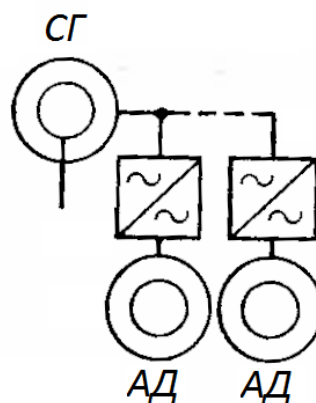


Рисунок 10 – Структурна схема передачі з безпосередніми перетворювачами частоти

У цьому типі перетворювача процес випрямлення напруги відбувається на заданій генератором частоті. Система управління такого типу перетворювача набагато складніша, ніж у інвертора. Цю систему іноді називають передачею АС-АС. Перевагою такої системи є вища ефективність. Однак суттєвим недоліком є відсутність можливості побудови загальної шини постійного струму, що обмежує її застосування лише на засобах транспорту малої потужності. В таких випадках система потребує живлення від окремого генератора.

Проаналізуємо основне розрахункове рівняння синхронної машини:

$$S = \frac{60^2 \cdot v^3}{\pi \cdot n^2} \cdot \lambda \cdot \alpha_i \cdot k_o \cdot k_B \cdot A \cdot B_\delta, \quad (2)$$

де  $v$  – окружна швидкість ротора;

$n$  – частота обертання вала дизеля;

$\lambda$  – відносна довжина;

$k_o, k_B$  – коефіцієнти полюсного перекриття, обмотки, форми ЕРС;

$A$  – лінійне навантаження,

$B_\delta$  – максимальне значення магнітної індукції в зазорі.

На рис. 11 покажемо залежність потужності генератора від окружної швидкості ротора та частоти обертання вала дизеля.

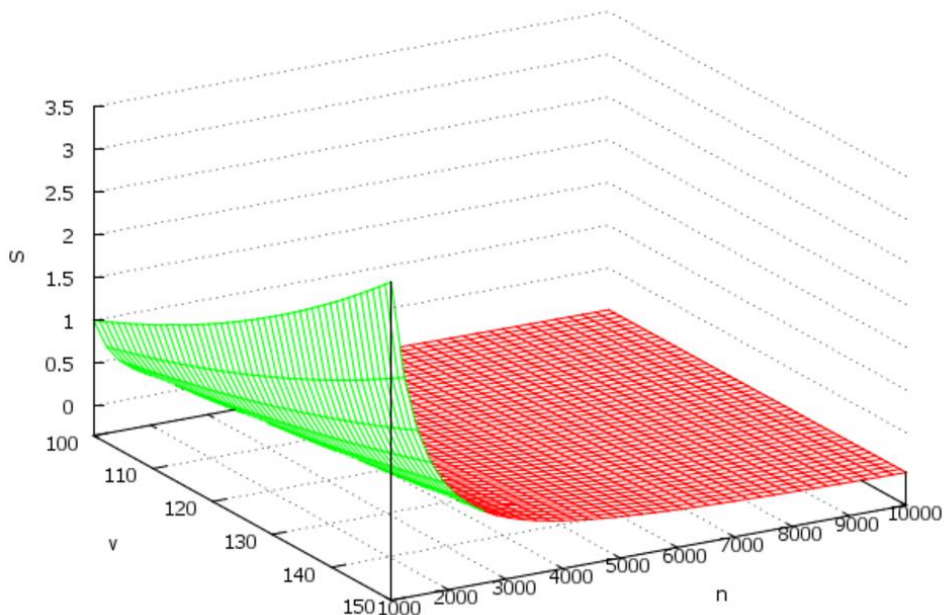


Рисунок 11 – Залежність потужності генератора від окружної швидкості ротора та частоти обертання вала дизеля

Приходимо до висновку, що гранична потужність генератора заданої частоти обертання залежить від конструктивної схеми ротора, і вибір конструктивної схеми, що дозволяє підвищити  $v$  на 25%, веде до збільшення  $S$  в 1,95 рази.

До синхронних генераторів, що використовують підвищену частоту обертання, пред'являються вимоги високих електромагнітних навантажень і міцності конструкції, що є суперечливими. Специфіка роботи з підвищеними частотами обертання вимагає виключення механічного контакту обертових і нерухомих деталей і забезпечення механічної міцності роторів. Перша вимога може бути задоволена шляхом застосування безконтактних підшипникових опор, що накладає обмеження на масу роторів і зусилля одnobічного магнітного притягання. Для задоволення другої вимоги необхідний пошук і застосування раціональних конструктивних схем роторів.

Нормативне регулювання питань взаємного впливу елементів електромеханічних систем у складі мобільних енергоустановок є складним процесом, оскільки такі об'єкти знаходяться

на перетині кількох галузевих стандартів: машинобудування, електротехніки та транспортної безпеки. Особливість нормативного підходу полягає в тому, що більшість чинних стандартів зазвичай розглядають компоненти системи – дизельний двигун, синхронний генератор та перетворювач частоти – як окремі одиниці обладнання. Однак для мобільних установок з автономним джерелом живлення критично важливим є врахування саме їхньої системної взаємодії, що вимагає звернення до спеціалізованих регламентів щодо електромагнітної сумісності та механічної тривкості.

Згідно з міжнародними стандартами серії IEC 60034, що регламентують роботу обертових електричних машин, особлива увага приділяється допустимим рівням вібрації та гармонійних спотворень. Проте в контексті мобільних систем нормативи вимагають враховувати не лише власні характеристики генератора, а й вплив на нього нелінійного навантаження з боку напівпровідникових перетворювачів. Нормативні вимоги до якості електроенергії (наприклад, IEEE 519 або аналогічні державні стандарти) встановлюють жорсткі межі для коефіцієнта нелінійних спотворень напруги. Для автономних систем ці норми є ще суворішими, оскільки через обмежену потужність джерела будь-яке спотворення форми струму, викликане роботою інвертора, миттєво спричиняє появу зворотних завод, що впливають на систему збудження генератора та стабільність крутного моменту первинного двигуна.

Важливим аспектом нормативного забезпечення є регламентація механічної взаємодії в системі «вал двигуна – ротор генератора». Стандарти з вібраційної безпеки та технічної діагностики (серії ISO 10816) передбачають проведення розрахунків на крутильні коливання. У мобільних установках з інверторним керуванням частота обертання постійно змінюється, що підвищує ризик потрапляння системи в зону резонансу. Нормативні документи вимагають, щоб власні частоти електромеханічної системи не збігалися з робочими частотами в усьому діапазоні регулювання, враховуючи при цьому пульсації моменту, що генеруються електричною машиною під впливом перетворювача. Це змушує розробників проводити комплексну перевірку динамічної міцності, яка виходить за межі стандартних випробувань окремих агрегатів.

Крім того, сучасні нормативи у сфері екологічної безпеки та енергоефективності опосередковано впливають на вимоги до взаємодії елементів системи. Стандарти типу Tier або Stage для дизельних приводів вимагають точного дотримання паливних карт, що можливо лише за умови ідеальної синхронізації електричного навантаження та механічної відповіді двигуна. Отже, нормативна база поступово еволюціонує від простої перевірки параметрів окремих вузлів до вимог щодо сертифікації всієї енергетичної установки як єдиного функціонального модуля. Такий підхід дозволяє гарантувати, що взаємний вплив елементів не призведе до виходу параметрів викидів, шуму або надійності за встановлені межі під час інтенсивної експлуатації в автономному режимі.

## ВИСНОВКИ

Сучасні мобільні енергоустановки на базі дизель-генераторів трансформувалися у складні багатокomпонентні системи, де кожна зміна в електричному ланцюзі миттєво відбивається на механічних характеристиках привода. Традиційне розділення проектування паливних систем та електричних мереж втрачає актуальність, оскільки електромагнітні процеси в генераторному вузлі через зворотні зв'язки безпосередньо впливають на термодинамічні показники двигуна. Це вимагає переходу до створення інтегрованих інтелектуальних платформ, де кожен елемент адаптується до стану суміжних вузлів у

реальному часі, забезпечуючи стабільність крутного моменту та мінімізацію питомої витрати палива.

Аналіз енергетичних характеристик підсистеми редуктор-рушій свідчить про пряму залежність ККД від моменту навантаження та моменту тертя. Найбільш раціональним рішенням для підвищення ефективності механічної трансмісії є впровадження багатоступінчастих редукторів із можливістю зміни передаточного числа залежно від режиму роботи. Розрахунки підтверджують, що використання чотирьох ступенів редукції дозволяє збільшити загальний ККД системи на 4%, одночасно знижуючи коефіцієнт втрат на тертя. Такі конструктивні заходи у поєднанні з роботою двигуна в зоні 60–85% від номінальної потужності забезпечують оптимальний розподіл постійних та змінних втрат енергії.

Найбільший потенціал для модернізації мають інверторні автономні системи, що дозволяють відмовитися від фіксації частоти обертання вала. Робота дизельного агрегату в режимі змінних обертів забезпечує його функціонування в точці максимальної паливної економічності, що разом із використанням сучасної напівпровідникової техніки знижує операційні витрати на 40% та рівень шкідливих викидів на чверть. При цьому для нарощування потужності найбільш доцільною є схема паралельного підключення перетворювачів зі спільною системою керування, яка мінімізує внутрішні зрівнювальні струми без ускладнення конструкції гальванічною розв'язкою.

Забезпечення надійності таких високодинамічних систем можливе лише через комплексний аналіз електромагнітної сумісності та стійкості валопроводів до крутильних коливань. Оскільки гранична потужність генератора суттєво залежить від окружної швидкості ротора, вибір раціональних конструктивних схем безконтактних опор дозволяє підвищити енергетичну віддачу майже вдвічі. Тільки гармонійне поєднання методів багатокритеріальної оптимізації, точного математичного моделювання та адаптивного цифрового керування дозволяє досягти максимальної енергоефективності без ризику передчасної деградації ресурсів мобільної платформи в екстремальних умовах експлуатації.

### Список використаних джерел

1. *Kulagin D. O.* Mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation. *Technical Electrodynamics*. 2014. No. 6. P. 49–55.
2. *Liu C., Chau K. T., Jiang J. Z.* A Permanent-Magnet Hybrid Brushless Integrated Starter-Generator for Hybrid Electric Vehicles. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2010. Vol. 57, no. 12. P. 4055–4064. doi: 10.1109/TIE.2010.2044128.
3. *Chen Z., Wang H., Yan Y.* A Doubly Salient Starter/Generator With Two-Section Twisted-Rotor Structure for Potential Future Aerospace Application. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*. 2012. Vol. 59, no. 9. P. 3588–3595. doi: 10.1109/TIE.2011.2159951.
4. *Fahimi B., Emadi A., Sepe R. B.* A switched reluctance machine-based starter/alternator for more electric cars. *IEEE Transactions on Energy Conversion*. 2004. Vol. 19, no. 1. P. 116–124. doi: 10.1109/TEC.2003.822322.
5. The importance of environmental education for effective environmental management / *S. Yekimov et al.* *E3S Web of Conferences*. 2021. Vol. 296. 08002. doi: 10.1051/e3sconf/202129608002.
6. *Maslov I., Tymoshchuk O., Kulagin D.* Determining the Causes of Major Energy Losses in a Ship's Unified AC power system. *AIP Conference Proceedings*. 2025. Vol. 3428, iss. 1. 020021. doi: 10.1063/1.510038611.

7. *Chau K. T., Chan C. C.* Emerging Energy-Efficient Technologies for Hybrid Electric Vehicles. Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95, no. 4. P. 821–835. doi: 10.1109/JPROC.2006.890114.
8. Battery choice and management for new-generation electric vehicles / *A. Affanni et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2005. Vol. 52, no. 5. P. 1343–1349. doi: 10.1109/TIE.2005.855664.
9. *Kulagin D., Maslov I.* Synthesis of Automatic Control System of Traction Asynchronous Motor of Transport Diesel-Generator Power Plant. Problemele Energeticii Regionale. 2025. Issue 4. P. 18–31. doi: 10.52254/1857-0070.2025.4-68.02.
10. *Finch J. W., Giaouris D.* Controlled AC Electrical Drives. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 2. P. 481–491. doi: 10.1109/TIE.2007.911209.
11. *Kulagin D. O.* The mathematical model of asynchronous traction motor taking into account the saturation of magnetic circuits. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2014. No. 6. P. 103–110.
12. *Cai W.* Comparison and review of electric machines for integrated starter alternator applications. Conference Record of the 2004 IEEE Industry Applications Conference. 39th IAS Annual Meeting (Seattle, WA, USA, 2004). 2004. P. 393. doi: 10.1109/IAS.2004.1348437.
13. *Nitsenko V. V., Kulahin D. O.* Research on effect of differential-phase protection of busbars system with voltage of 110-750 kv. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2017. No. 4. P. 72–79.
14. Novel permanent magnet motor drives for electric vehicles / *C. C. Chan et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1996. Vol. 43, no. 2. P. 331–339. doi: 10.1109/41.491357.
15. *Kulagin D., Maslov I.* Construction of a mathematical model of an induction motor for a transport power plant incorporating magnetic saturation processes. EEJET. 2025. Vol. 6, no. 8 (138). P. 24–35. doi: 10.15587/1729-4061.2025.345066.
16. *Korobko B., Kivshyk A., Kulagin D.* Experimental Study of the Efficiency of the Differential Pump of Electromagnetic Action on the Basis of Mathematical Modeling of the Parameters of Its Operation. Proceedings of the 3rd International Conference on Building Innovations. ICBI 2020. Lecture Notes in Civil Engineering. Vol. 181. Springer, Cham, 2022. doi: 10.1007/978-3-030-85043-2\_20.
17. Energy Storage Systems for Automotive Applications / *S. M. Lukic et al.* IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2008. Vol. 55, no. 6. P. 2258–2267. doi: 10.1109/TIE.2008.918390.
18. Starter-alternator for hybrid electric vehicle: comparison of induction and variable reluctance machines and drives / *J. M. Miller et al.* Conference Record of 1998 IEEE Industry Applications Conference. Thirty-Third IAS Annual Meeting (St. Louis, MO, USA, 1998). 1998. Vol. 1. P. 513–523. doi: 10.1109/IAS.1998.732360.
19. *Ehsani M., Rahman K. M., Toliyat H. A.* Propulsion system design of electric and hybrid vehicles. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 1997. Vol. 44, no. 1. P. 19–27. doi: 10.1109/41.557495.
20. *Nitsenko V., Kulagin D.* Improvement of methods for implementing relay protection of busbar systems in distribution installations. Technical Electrodynamics. 2017. No. 6. P. 61. doi: 10.15407/techned2017.06.061.
21. *Kulahin D. O.* Rolling electrical complex on the basis of the criterion of minimizing the area under the curve of motion. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2016. No. 2. P. 60–67.
22. *Khan F. H., Tolbert L. M., Webb W. E.* Hybrid Electric Vehicle Power Management Solutions Based on Isolated and Nonisolated Configurations of Multilevel Modular Capacitor-

Clamped Converter. IEEE Transactions on Industrial Electronics. 2009. Vol. 56, no. 8. P. 3079–3095. doi: 10.1109/TIE.2009.2022074.

23. Using a phase-differential busbar protection for switchgears of power system facilities / D. O. Kulagin et al. Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu. 2019. No. 4. P. 63–67. doi: 10.29202/nvngu/2019-4/10.

24. Analysis Of Current Approaches to Modernizing the Electric Power Scheme of Diesel Generator Transport / D. Kulagin et al. 2023 IEEE 4th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2023. P. 1–6. doi: 10.1109/KhPIWeek61412.2023.10312881.

25. Zhu Z. Q., Howe D. Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles. Proceedings of the IEEE. 2007. Vol. 95, no. 4. P. 746–765. doi: 10.1109/JPROC.2006.892482.

26. Chan C. C. The state of the art of electric and hybrid vehicles. Proceedings of the IEEE. 2002. Vol. 90, no. 2. P. 247–275. doi: 10.1109/5.989873.

27. Detailed design of a 30-kW switched reluctance starter/generator system for a gas turbine engine application / C. A. Ferreira et al. IEEE Transactions on Industry Applications. 1995. Vol. 31, no. 3. P. 553–561. doi: 10.1109/28.382116.

28. Kulagin D., Maslov I. Mathematical Model of Electromagnetic Transients of a Frequency-Controlled Propeller's Induction Motor. 2024 IEEE 5th KhPI Week on Advanced Technology (KhPIWeek). 2024. P. 1–5. doi: 10.1109/KhPIWeek61434.2024.10877991.

29. Simulink model for economic analysis and environmental impacts of a PV with diesel-battery system for remote villages / R. W. Wies et al. IEEE Transactions on Power Systems. 2005. Vol. 20, no. 2. P. 692–700. doi: 10.1109/TPWRS.2005.846084.

30. Estimation of Optimization Approaches of the Energy Intensive Equipment's Power-Time Diagrams of Industrial Enterprises / K. Bratkovska et al. 2022 IEEE 8th International Conference on Energy Smart Systems (ESS). 2022. P. 277–281. doi: 10.1109/ESS57819.2022.9969248.

**Kulagin D.O., Maslov I.Z., Dievchkin V.F.**

## **REGULATORY AND TECHNICAL ASPECTS OF ACCOUNTING FOR THE MUTUAL INFLUENCE OF ELECTROMECHANICAL SYSTEM ELEMENTS IN MOBILE POWER UNITS WITH AUTONOMOUS POWER SOURCES**

*This paper addresses critical issues in enhancing the energy efficiency and reliability of mobile power units based on diesel-generator sets. The authors analyze modern vehicles as complex multi-component systems where mechanical, electromagnetic, and thermodynamic processes exist in an inseparable interconnection. Particular attention is devoted to investigating the mutual influence of electromechanical circuit elements under variable load conditions, which is characteristic of autonomous mobile platforms. The study substantiates the advantages of transitioning to inverter-based systems with a DC link, enabling the implementation of variable-speed operation for the diesel engine. This approach ensures that the primary prime mover operates within the zone of minimum specific fuel consumption, contributing to a 40% reduction in operating costs and a 25% decrease in harmful emissions. Based on an analysis of the efficiency functions of the "gearbox-propulsion" subsystem, the feasibility of using multi-stage transmissions is proven; their implementation allows for a 4% increase in overall efficiency through the optimization of friction losses. Specific emphasis is placed on electromagnetic compatibility and the structural integrity of generator units. Conditions for maximizing the efficiency of electrical machines through the rational distribution of constant and variable losses are determined, and parallel connection schemes for converters with common control*

are proposed to stabilize output power parameters. The results of this work establish a scientific foundation for developing adaptive control systems that integrate mathematical modeling and multi-objective optimization methods to guarantee the stable operation of vehicles under extreme operational regimes.

**Keywords:** power supply system, electrical machines and apparatus, mathematical modeling, transport, power engineering, power source, electric drive, energy legislation.

Стаття надійшла 23.03.2026р.

Стаття прийнята 25.03.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р.

275 – Транспортні технології

УДК 656.19: 656.084

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359376](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359376)

Молоштан Д. В., Загорянський В. Г.

## МОДЕЛЮВАННЯ АВАРІЙНИХ СИТУАЦІЙ ДОРОЖНЬОГО РУХУ ПРИ НАЇЗДІ ЛЕГКОВОГО АВТОМОБІЛЯ НА ВОДІЯ ЕЛЕКТРОСАМОКАТА

У роботі розглянуто проблему моделювання аварійних ситуацій дорожнього руху за участю легкових автомобілів та водіїв електросамокатів – категорії учасників, правовий статус якої в Україні досі не врегульований. Незважаючи на швидке зростання популярності електросамокатів, нормативна база щодо їх експлуатації залишається неповною, що ускладнює формування правил безпеки та проведення експертних досліджень ДТП. Аналіз статистичних даних показує, що значну частку аварій із залученням електросамокатів становлять наїзди легкових автомобілів. Метою роботи є аналіз діапазону габаритних розмірів і швидко-силових характеристик основних типів електросамокатів, що обумовлені особливостями їх компоновки, та розробка наближеної математичної моделі наїзду легкового автомобіля на водія електросамоката, навести діапазони значень для відомих параметрів моделі та визначити ті, які потребують оцінки. У контексті відсутності спеціалізованих методик експертизи ДТП даного типу запропоновано використовувати моделі, розроблені для наїздів на велосипедистів, як найбільш близькі за кінематичними та конструктивними характеристиками. У роботі проведено огляд сучасних електросамокатів за їх габаритними, конструктивними та швидко-силовими параметрами, що дозволило визначити їх типові діапазони маси, розмірів, потужності, швидкості та ефективності гальмування. Розглянуті особливості основних типів електроприводів, акумуляторів, коліс та гальмівних систем, які істотно впливають на поведінку електросамоката в екстрених ситуаціях. На основі узагальнення відомих залежностей запропоновано наближену математичну модель гальмування електросамоката та умови уникнення зіткнення під час поперечного або поздовжнього наїзду автомобіля. Визначено параметри моделі, які можуть бути отримані за аналогією з даними для велосипедів, а також ті, що потребують експериментальної оцінки. Результати роботи створюють методичне підґрунтя для подальшого розвитку експертних підходів до аналізу ДТП за участю водіїв електросамокатів.

**Ключові слова:** електросамокати, габаритні розміри, швидко-силові характеристики, легковий автомобіль, дорожньо-транспортні пригоди, наїзд, моделювання.

**Постановка проблеми.** Дорожній рух на електросамокатах ніяк не регулюється – річ у тому, що в законі такі учасники руху, як водії електросамокатів, не позначені, а тому не мають правового статусу, офіційних правил та обов'язків [1, 2]. Хоча легкий електротранспорт продається в Україні досить давно, набирати популярності він почав лише з початком цього десятиліття. Не маючи можливості вільно пересуватися на громадському транспорті та боячись у ньому заразитися коронавірусом, багато хто перейшов на велосипеди та електросамокати.

Запитань до регулювання руху електросамокатів багато: з якого віку дозволяти на них їздити, якою має бути максимальна швидкість такого транспорту, де дозволити на ньому пересуватися – на дорозі чи тротуарі, чи прирівняти самокати до велосипедів чи мопедів, чи потрібно вводити для них номери тощо. На частину з них має відповісти законопроект №3023 [3], який Верховна Рада ухвалила у першому читанні ще восени 2020 року. Проте чекати на прийняття цього закону найближчим часом не варто [1].

Документ встановлює для водіїв («райдерів») легкого електротранспорту певні правила: забороняє їздити п'яним чи під наркотиками, користуватися телефоном під час руху та перевозити пасажирів, якщо це не передбачено конструкцією транспорту. Також у темряві, у разі туману або поза містом/селом, користувачі повинні закріпити на одязі та транспорті світловідбивні елементи. Документ зобов'язує їздити велодоріжжками, а якщо їх немає – краєм проїжджої частини, вулиці або на узбіччі.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Аналіз статистики аварійних ситуацій на дорогах України [4, 5] показує, що найпоширенішими видами ДТП є: зіткнення, наїзд на транспортний засіб, що стоїть, наїзд на перешкоду, наїзд на пішохода, з'їзд з проїзної частини з перекиданням транспортного засобу.

Приведена в [6, 7] статистика характеристик пацієнтів і нечастих випадків з участю електросамокатів свідчить, що із загальної кількості зіткнень електросамокатів з іншими транспортними засобами і пішоходами, – близько половини становлять зіткнення з легковими автомобілями.

У вітчизняній літературі з експертизи ДТП [8-11], із зрозумілих причин, відсутня інформація щодо моделювання ДТП за участю водіїв електросамокатів. Відомо, що рух усіх двоколісних транспортних засобів незалежно від конструктивних відмінностей описується рівняннями однакової структури. Тому за основу моделювання пропонується взяти залежності щодо наїзду легкового автомобіля на велосипедиста, як близького за характеристиками випадку.

**Мета дослідження** Метою роботи є аналіз діапазону габаритних розмірів і швидкісно-силових характеристик основних типів електросамокатів, що обумовлені особливостями їх компоновки, розробка наближеної математичної моделі наїзду легкового автомобіля на водія електросамоката, наведення діапазонів відомих параметрів моделі та визначення тих, що потребують оцінки.

**Основний матеріал дослідження.** Електросамокати за умовами експлуатації можна поділити на міські та позашляхові [12]. Міські призначені для пересування рівними дорогами, бетоном, асфальтом, плиткою тощо. Як правило, вони не надто потужні, але при цьому компактні, легкі, маневрені. Багато міських самокатів з електроприводом мають механізм складення, а деякі оснащені зручним сидінням. У базову комплектацію входить кілька елементів: бортовий комп'ютер, фара, а іноді – додаткове підсвічування деки. Позашляхові призначені для поїздок нерівними дорогами/бездоріжжям (у лісі, по гравію, бруду тощо). Це відносно важка, досить потужна техніка, оснащена широкими колесами, м'якою підвіскою. Як правило, електросамокати цього типу мають велику дальність ходу завдяки надійному,

енергоємному акумулятору. Позашляховики часто мають таку ж комплектацію, як і у міських моделей.

Електросамокати відрізняються і за іншими характеристиками: типом двигуна, акумулятора, підвіски, потужністю, швидкістю, дальністю ходу, видам, кількості, розміру коліс, вагою, вантажопідйомністю; наявністю механізму складання, сидіння.

В одних моделях самокатів електричний двигун працює за допомогою ланцюгового механізму, а в інших він вбудований безпосередньо в колесо.

Ланцюгові мають підвищену потужність, тому вони можуть розвивати досить велику швидкість, і на них можна перевозити відносно важкі вантажі. Однак варто відзначити, що в цих моделях є кілька недоліків. По-перше, електросамокати з цепним видом двигуна створюють високий рівень шуму під час руху. Це може бути особливо помітно в тихих, спокійних районах. По-друге, конструкція такого двигуна швидше зношується, а для її заміни потрібні спеціальні навички. По-третє, ланцюг збільшує масу всього пристрою.

Електричні самокати з мотор-колесом відрізняються високою потужністю, надійністю, відносною безшумністю.

Один із основних компонентів електросамокату – батарея, яка визначає дальність ходу техніки. Найпоширеніші типи акумулятора: свинцевий – він більше важить, довше заряджається, має невелику енергоємність, зате він відносно недорогий і має добру стійкість до низьких температур (до  $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ ), і літєвий (літій-іонний) – він компактний, легкий і має велику енергоємність, тому з ним можна вирушити в тривалу поїздку. Це надійний тип акумулятора, витримує до 1000 зарядок (близько трьох років роботи). Однак, літєві батареї коштують більше свинцевих і погано переносять холод (на морозі можуть вийти з ладу).

Потужність двигуна впливає на швидкість, прохідність та вантажопідйомність електросамокату. Цей параметр є важливим при виборі дорослого або дитячого виду електросамокату для поїздок в умовах різної складності (по місту/бездоріжжю). Дорослі можуть мати різну потужність залежно від вантажопідйомності: 300 Вт для перевезення ваги до 100 кг, 600 Вт – до 120 кг. Позашляховики, як правило, мають двигуни з потужністю від 600 Вт, і розвивають високу швидкість (до 120 км/год.). Дитячі моделі – для дітей/підлітків (вагою до 50 кг) у більшості мають потужність до 150 Вт. Часто такі самокати мають обмежувачі швидкості та розганяються до 15 км/год.

Електросамокати також розрізняють:

– за видами коліс: литі не сприйнятливі до випадкових проколів (наприклад, при наїзді на камінь чи цвях), не здуваються з часом, але з ними відчувається будь-яка нерівність дороги (бажана додаткова амортизація), пневматичні (надувні) не відрізняються високою міцністю та надійністю, тому що їх досить просто проколоти (незважаючи на це, вони підходять для пересування бездоріжжям, тому що зменшують вібрації при наїзді на ямки, купини та інші дрібні перешкоди);

– за кількістю коліс: двоколісні – універсальні, надійні, легкі, компактні моделі, але вони мають слабку сторону: при пересуванні райдеру доводиться утримувати рівновагу.

– за розміром коліс: великі, широкі колеса (10...14 дюймів) покращують прохідність та забезпечують хорошу амортизацію техніки, але при цьому збільшують її вагу (підходять для пересування бездоріжжям або нерівними дорогами з дрібними перешкодами), колеса меншого розміру (8...10 дюймів) встановлюють на міські моделі – вони менше важать, і з ними краще кататися за рівним дорожнім покриттям (асфальтом, бетоном).

Діапазони габаритних розмірів електросамокатів такі [12].

Довжина  $L_{e/c}$ , м: 1,1...1,17.

Ширина  $B_{e/c}$ , м: 0,6...0,8 (ширина керма має бути трохи вужчою або збігатися з шириною плечей райдера), ширина декі (платформи для ніг), м: 0,14...0,2.

Висота (з користувачем)  $H_{e/c}$ , м: зріст користувача +

+ 0,203...0,254 (міські моделі),

+ 0,254...0,356 (моделі для бездоріжжя).

Висота керма  $H_{ke/c}$ , м: 0,78...0,85 (залежно від зросту користувача (для зросту 1,60...1,72 м)).

Довжина декі (платформи для ніг)  $L_{de/c}$ , м: 0,45...0,55 (для дорослих моделей).

Діаметр коліс  $D_k$ : 8...10 дюймів (0,203...0,254 м) – міські моделі, 10–14 дюймів (0,254...0,356 м) – моделі для бездоріжжя.

Власна маса електросамоката  $m_{e/c}$ , кг: близько 13 кг (середні моделі), може збільшуватися до 25...28 кг.

Повна маса електросамоката  $M_{e/c}$ , кг: близько 63...85 кг (середні моделі), може збільшуватися до 75 (97)...78 (100) кг.

Розглянемо також швидко-силові характеристики електросамокатів.

Вантажопідйомність: більшість моделей витримують вагу до 120 кг, але деякі розраховані на перевезення 260 кг.

Відзначимо, що у спеціалізованих магазинах сьогодні представлений великий вибір електросамокатів різної маси: в залежності від моделі – 5...50 кг. Розрізняють такі види:

– суперлегкі (до 8 кг);

– легкі (8...12 кг);

– середні (12...16 кг);

– важкі (16...35 кг);

– суперважкі (35...50 кг).

На розміри та вагу електросамокатів впливають такі чинники:

– акумулятор. Найчастіше при виробництві електросамокатів використовують літєві та свинцеві джерела живлення. Перший варіант менший за вагою, але при цьому має більшу ємність, тому самокати з акумуляторами літєвими більш затребувані;

– розмір та тип коліс. Що менше колеса, то легше транспорт, але при цьому погіршується керування. Відповідно великі колеса (від 7 дюймів і вище) позитивно впливають на амортизацію та керованість, але при цьому збільшують вагу та розмір самокату. Лита гума лише додасть ваги, проте надувні шини легше проколоти;

– тип двигуна. Мотор-колесо вбудованого типу зручніше, легше та потужніше, але такі моделі дорожчі. Зовнішній мотор, з'єднаний із колесом спеціальним пристроєм, трохи легший, але менш зручний.

У відомій методиці В. О. Іларіонова показники гальмівної динамічності велосипеда (зупинний шлях і час), необхідні для моделювання наїзду на велосипедиста, розраховують відповідно до того, як діє гальмо – на всіх колесах, на передньому або на задньому. За аналогією зупинимося на особливостях гальмівних систем електросамокатів [12].

Типів гальм електросамоката два – механічні та електричні.

Механічні гальмівні системи, які використовують фізичний механізм для уповільнення самоката – це дискові, барабанні та ножні гальма. Механічні гальмівні системи зазвичай набагато потужніші, ніж електричні гальмівні системи.

Електричні гальмівні системи, які включають як суто електронні, так і рекуперативні гальмівні системи, використовують сам двигун для забезпечення гальмування. Ці системи мають перевагу в тому, що не потребують частих модифікацій.

Гальмівні механізми багатьох самокатів будуть поєднанням електричних та механічних. Ми віддаємо перевагу самокатам, які мають щонайменше дві гальмівні системи на випадок, якщо одна з них вийде з ладу з міркувань безпеки.

Електрофрикційна гальмівна система використовує електричний ресурс для припинення руху. При активації ротор мотора починає рухатися в протилежний бік, завдяки чому електросамокат зупиняється. При використанні даної гальмівної системи спостерігається мінімальне зношування гальмівних колодок, а також економічне витрачання заряду акумулятора. Однак, електричне гальмо при використанні залишає досить великий гальмівний шлях, тому часто встановлюється спільно з барабанним або дисковим гальмом на задньому колесі. Ряд моделей електричних самокатів з подібним гальмом мають функцію рекуперації, яка дозволяє збільшити дальність ходу за рахунок перетворення енергії, що накопичується при гальмуванні.

Барабанна гальмівна система є закритою, яка знаходиться у втулці. Колодки розводяться убік, примикають до барабана і рахунок сили тертя колесо електросамоката зупиняється. Барабанні гальма довговічні, вони захищені від зовнішнього впливу, тому працюють безвідмовно будь-якої пори року. Ще однією перевагою є простота установки та налаштування, а також відносно низька вартість. Тим не менш, барабанні гальма мають відчутно більшу вагу, ніж інші системи, а також схильні до перегріву при інтенсивному і тривалому використанні. Якщо між барабаном і колодками буде недостатньо щільний дотик, то ефективність гальмування буде вкрай низькою.

Дискова гальмівна система складається з гальмівного диска та каліпера (він же супорт). Дискові гальма бувають гідравлічні та механічні. Гідравлічне гальмування діє рахунок гальмівної рідини. При натисканні ручки гальма циліндр з поршнем видавлює гальмівну рідину по гідролінії до колодок. Механічний гальмо працює дещо інакше: зусилля передається за допомогою тросиків, які притискають колодки до гальмівного диска.

Перевага дискових гідравлічних гальм полягає у високій ефективності та маленькому гальмівному шляху, вони найкраще підходять для екстреного гальмування в абсолютно будь-яких умовах, але відрізняються дорожнечою при встановленні та складністю ремонту та обслуговування. Механічні дискові гальма хоч і більше зношують колодки, але прості у догляді та експлуатації, а також мають низьку вартість.

Зупинка колеса електросамокату ногою здійснюється за рахунок натискання нею на гальмо-крило, внаслідок чого відбувається притискання до задньої покришки. Чим більше зусилля райдер надає ногою, тим ефективнішим буде гальмування. Звичайно, цю систему встановлюють виключно на міські моделі електросамокатів з невеликою потужністю мотора, тому що на високій швидкості ножний гальмо не допоможе зробити різке гальмування. Переваг у цього виду гальмівної системи небагато, але варто відзначити простоту її встановлення та експлуатації, а також відсутність додаткового навантаження на конструкцію електросамокату – крило на задньому колесі є абсолютно на будь-якій моделі.

Ободні гальма можна встановити як на задньому, так і на передньому колесі. Зупинка електросамоката у разі відбувається рахунок стиснення ободів коліс з допомогою колодок. Існують V-brake та кліщові гальма, які відрізняються кутом тиску на обід та кріпленням. V-brake гальма є більш сучасним та популярнішим варіантом. Поширеність такого типу гальмівної системи полягає в їх невисокій вартості, ефективності гальмування та простоті обслуговування. До недоліків можна віднести: підвищений знос ободів, постійне забруднення ободів та гальмівних колодок.

Таким чином, для електросамоката з гальмом на задньому колесі, зупинний шлях, м, пропонується визначити за залежністю:

$$S_o = v_{elc}T + \frac{v_{elc}^2 (L + \varphi_x h_{elc}) K_{ez} \delta_{об}}{2ga_{elc}\varphi_x}, \quad (1)$$

де  $v_{elc}$  – швидкість електросамоката, м/с;  $T$  – сума часу реакції водія, часу запізнення гальмівного приводу та половини часу наростання уповільнення, с;  $\varphi_x$  – коефіцієнт

поздовжнього зчеплення шин електросамоката з дорогою;  $K_{ef}$  – коефіцієнт ефективності гальмування;  $\delta_{об}$  – коефіцієнт урахування мас, що обертаються;  $g$  – прискорення сили тяжіння;  $a_{e/c}$  – емпіричний коефіцієнт.

Значення  $\delta_{об}$  пропонується визначати за залежністю:

$$\delta_{об} = \frac{1 + (0,03 + 0,05u_k^2)G_{e/c}}{G}, \quad (2)$$

де  $u_k$  – передаточне число коробки передач;  $G_{e/c}$  – повна вага електросамоката, Н;  $G$  – фактична вага електросамоката, Н.

Зупинний час,  $s$ , пропонується визначати за залежністю:

$$t_o = T + \frac{v_{e/c}(L + \varphi_x h_{e/c})K_{ez}\delta_{об}}{ga\varphi_x}, \quad (3)$$

Час реакції велосипедиста експериментально не визначений і, за аналогією з велосипедистом, пропонується приймати його рівним часом реакції водія автомобіля.

Час спрацьовування гальмівного приводу електросамоката також невідомий, для велосипедів зазвичай вважають рівним 0,2 с.

Коефіцієнт ефективності гальмування гумових шин для сухого асфальтобетону приймають в межах 1,1...1,2. Для покриттів інших типів  $K_{ef} = 1$ .

Коефіцієнт обліку обертів мас для електросамокатів невідомий. Для велосипедів  $\delta_{об}$  приблизно дорівнює 1,05.

Відомо, що максимальне уповільнення велосипеда з гальмом на одному задньому колесі при гальмуванні на сухому асфальтобетоні ( $\varphi = 0,8$ )  $j = 2,7 \text{ м/с}^2$ .

Щодо часу наростання уповільнення велосипеда при екстремому гальмуванні також немає надійних експериментальних відомостей. За непрямыми даними можна припустити, що він дорівнює 0,1...0,2 с.

При аналізі наїзду автомобіля на велосипедиста зазвичай враховують лише габаритну довжину велосипеда, нехтуючи його шириною. Момент виникнення небезпечної дорожньої обстановки визначають за тими самими ознаками, що у випадках наїзду автомобіля на пішохода. Експертне дослідження поперечного наїзду автомобіля на велосипедиста проводиться у тій же послідовності, що й дослідження наїзду на пішохода.

Умови можливості зупинки автомобіля та своєчасності гальмування залишаються без зміни. Умова перетину велосипедом смуги руху автомобіля при своєчасному гальмуванні, здійсненому водієм останнього, має такий вигляд:

$$S'_{e/c} > \Delta_y + B_a + L_{e/c} + \Delta_{\delta}, \quad (4)$$

де  $S'_{e/c}$  – шлях рівномірного руху електросамоката у разі екстремого загальмовування автомобіля.

Можливість у користувача електросамоката пропустити автомобіль при екстремому своєчасному гальмуванні залежить від того, чи виконується умова:

$$S'_a > \Delta'_y + B_{e/c} + L_a + \Delta_{\delta}, \quad (5)$$

де  $S'_a$  – шлях рівномірного руху автомобіля у разі екстремого загальмовування електросамоката, м;  $\Delta'_y$  – інтервал між електросамокатом і межею небезпечної зони, м;  $B_{e/c}$  – габаритна ширина електросамоката, м.

Можливість зустрічного запобігти зустрічному або попутному зіткненню автомобіля з електросамокатом пропонується досліджувати за допомогою формул, наведених для випадку зіткнення автомобіля з велосипедом. І в цьому випадку прогнозується, що уникнути зіткнення можна лише шляхом зупинки як автомобіля, так і електросамоката.

## ВИСНОВКИ

Правила дорожнього руху щодо водіїв електросамокатів в Україні законодавчо не врегульовані. Приблизно половину випадків аварій з водіями електросамокатів складають зіткнення їх з легковими автомобілями.

На основі аналізу публікацій в мережі Інтернет визначений діапазон габаритних розмірів найбільш розповсюджених моделей електросамокатів.

Визначений діапазон швидко-силових характеристик електросамокатів залежно від їх призначення і компоновки.

На основі наявних моделей наїзду автомобіля на велосипедиста, розроблено, в першому наближенні, математичну модель наїзду легкового автомобіля на водія електросамоката. Значення деяких параметрів, що входять до моделі, мають бути визначені.

### Список використаних джерел

1. Аварій з е-самокатами все більше: в чому проблема і як врятуватися від їхньої навали пішоходам. URL: <https://delo.ua/business/na-ukrainskih-trotuarah-vse-bolshe-elektrosamoka-383742/> (дата звернення: 24.11.2025).

2. Кіріченко І. С. Персональний електротранспорт і нюанси ПДР. *Сучасні тенденції розвитку автомобільного транспорту та галузевого машинобудування*: наукові праці Міжнародної науково-практичної конференції присвяченої 90-річчю Харківського автомобільно-дорожнього університету та 90-річчю автомобільного факультету (Харків, 16-18 вересня 2020 р.). Харків: ХНАДУ, 2020. С. 274–275.

3. Проект Закону про внесення змін до деяких законодавчих актів щодо вдосконалення регулювання відносин у сфері забезпечення безпеки окремих категорій учасників дорожнього руху (користувачів персонального легкого електротранспорту, велосипедистів та пішоходів). URL: [http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4\\_1?pf3511=68074](http://w1.c1.rada.gov.ua/pls/zweb2/webproc4_1?pf3511=68074) (дата звернення: 24.11.2025).

4. Статистика. Офіційний сайт патрульної поліції України. URL: <http://patrol.police.gov.ua/statystyka/>

5. Кашканов А. А., Кашканова А. А., Нахімчук А. О. Безпека руху як складова забезпечення ефективного функціонування автомобільного транспорту. *Сучасні технології та перспективи розвитку автомобільного транспорту*: тези XV міжнародної науково-практичної конференції (Житомир, 24-26 жовтня 2022 року). Житомир: Житомирська політехніка, 2022. С. 51–53.

6. Electric Scooter Accidents: Emerging Legal Challenges in Urban Areas. URL: <https://injuriesarepersonal.com/blog/electric-scooter-accidents-emerging-legal-challenges-in-urban-areas/> (дата звернення: 24.11.2025).

7. Tommaso Scquizzato, Lorenzo Gamberini, Federica Stella, et al. (2022). Analysis of road traffic accidents involving standing electric scooters reported in newspapers in Italy. *Clin. Exp. Emerg. Med.* 2022 Mar 31;9(1):36–40. doi: 10.15441/ceem.21.078

8. Гевко І. Б., Ляшук О. Л., Хорошун Р. В. Авто-технічна експертиза дорожньо-транспортних пригод. Конспект лекцій. Тернопіль: ТНТУ, 2016. 164 с.

9. Туренко А. М., Клименко В. І., Сараєв О. В., Данець С. В. Автотехнічна експертиза. Дослідження обставин ДТП. Підручник для вищих навчальних закладів. Харків: ХНАДУ, 2013. 320 с.

10. Ребедаило В. М., Кашканов В. А. Експертиза дорожньо-транспортних пригод: навч. посіб. Вінниця: Вінниц. нац. техн. ун-т, 2012. 157 с.

11. Кашканов А. А., Грисюк О. Г., Гуменюк І. І. Безпека дорожнього руху: навчальний посібник. Вінниця: ВНТУ, 2017. 90 с.

12. Electric Scooter Parts. URL: [https://rapidscooter.co.uk/breakdown-of-an-electric-scooter-uk-2022?srsId=AfmBOopofolAo9yZGtZvS5JDz5bDI9XM60Rd0ucjdnQKDvs\\_88RT4vr9](https://rapidscooter.co.uk/breakdown-of-an-electric-scooter-uk-2022?srsId=AfmBOopofolAo9yZGtZvS5JDz5bDI9XM60Rd0ucjdnQKDvs_88RT4vr9) (дата звернення: 24.11.2025).

**Moloshtan D. V., Zahorianskyi V.G.**

## **MODELING OF TRAFFIC EMERGENCY SITUATIONS IN THE CASE OF A CAR RIDING ON AN ELECTRIC SCOOTER DRIVER**

*The paper considers the problem of modeling traffic emergency situations involving cars and electric scooter drivers – a category of participants whose legal status in Ukraine is still not regulated. Despite the rapid growth in the popularity of electric scooters, the regulatory framework for their operation remains incomplete, which complicates the formation of safety rules and expert studies of road accidents. Analysis of statistical data shows that a significant proportion of accidents involving electric scooters are collisions with cars. The purpose of the work is to analyze the range of overall dimensions and speed-power characteristics of the main types of electric scooters, which are due to the peculiarities of their layout, and to develop an approximate mathematical model of a passenger car crash into an electric scooter driver, to list the ranges of values for known model parameters and to determine those that require evaluation.*

*In the context of the lack of specialized methods for the examination of road accidents of this type, it is proposed to use models developed for crashes into cyclists, as the closest in terms of kinematic and design characteristics.*

*The work reviews modern electric scooters by their overall, design and speed-power parameters, which allowed us to determine their typical ranges of mass, size, power, speed and braking efficiency. The features of the main types of electric drives, batteries, wheels and brake systems, which significantly affect the behavior of an electric scooter in emergency situations, are considered. Based on the generalization of known dependencies, an approximate mathematical model of electric scooter braking and collision avoidance conditions during a transverse or longitudinal collision of a car is proposed. The model parameters that can be obtained by analogy with data for bicycles, as well as those that require experimental evaluation, are determined. The results of the work create a methodological basis for the further development of expert approaches to the analysis of road accidents involving electric scooter drivers.*

**Keywords:** *electric scooters, overall dimensions, speed-force characteristics, passenger car, road accidents, collision, modeling.*

*Стаття надійшла 23.03.2026р.*

*Стаття прийнята 25.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

Хара М.В., Ніколаєнко І.В., Маслак Г.В., Семченко Н.О.

## РИЗИК-ОРІЄНТОВАНЕ УПРАВЛІННЯ ЗАПАСАМИ КОМПЛЕКТУЮЧИХ ВУЗЛІВ І ДЕТАЛЕЙ ВАГОНІВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

Сучасні умови діяльності промислових підприємств характеризуються високою невизначеністю зовнішнього середовища, розривами логістичних ланцюгів та фінансовими обмеженнями, що актуалізує необхідність забезпечення не лише ефективності, а й стійкості ремонтних систем вагонних депо до виникнення ризиків. Традиційні підходи до нормування запасів комплектуючих вузлів і деталей вагонів недостатньо враховують ризик як фактор, що впливає на систему ремонту рухомого складу. У цьому контексті значної актуальності набуває організація управління на основі визначення прийняттого для підприємства рівня ризику. Метою дослідження є розроблення концептуальних та методичних підходів до ризик-орієнтованого управління ремонтною системою вагонів, що передбачають інтеграцію аналізу надійності, сценарного моделювання, оцінювання втрат, управління резервами та кількісного визначення показників стійкості. Тематика дослідження знаходиться на стику логістики, теорії надійності та методів управління ризиками. У статті досліджено теоретико-методичні засади ризик-орієнтованого управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів у межах ремонтних підрозділів промислових підприємств в умовах невизначеності попиту та нестабільності постачання. Ремонтну систему вагонів розглянуто як відкриту адаптивну виробничо-логістичну систему, функціонування якої визначається взаємодією матеріальних, інформаційних і фінансових потоків. Визначено розрахункову залежність для кількісного обґрунтування середнього обсягу інвестицій, необхідних для підтримання цільового рівня запасів. Результати апробації підтверджують, що дефіцит комплектуючих формує додаткову інвестиційну потребу та знижує технічну готовність вагонів, тоді як надлишкові запаси обмежують фінансову гнучкість підприємства. Оптимізація страхових резервів має здійснюватися з урахуванням варіативності попиту, інтенсивності відмов рухомого складу і встановленого рівня ризику. Запропонований підхід дозволяє перейти від реактивної моделі управління до проактивної, забезпечуючи довгострокову стабільність та адаптивність підприємства.

**Ключові слова:** комплектуючі вузли та деталі, логістичний ланцюг, невизначеність попиту, промислове підприємство, ремонтна система вагонів, ризик, стійкість, страховий запас, управління запасами.

**Постановка проблеми.** Сучасні умови функціонування промислових підприємств характеризуються високим рівнем турбулентності зовнішнього середовища, розривами логістичних ланцюгів, нестабільністю постачань, фінансовими обмеженнями та зростанням вимог до безперервності виробничих процесів. В умовах високої турбулентності зовнішнього середовища ключовою характеристикою ефективності ремонтної системи вагонних депо стає не лише її економічність, а й стійкість (resilience) ланцюгів постачання – здатність системи прогнозувати, протидіяти, адаптуватися та відновлюватися після впливу дестабілізуючих чинників [1, 2]. Стійкість визначається здатністю системи адаптуватися до розривів логістичних зв'язків та мінімізувати вплив дестабілізуючих чинників.

Ремонтну систему вагонів доцільно розглядати як відкриту адаптивну виробничо-логістичну систему, в межах якої відбувається постійна взаємодія матеріальних,

інформаційних і фінансових потоків в умовах невизначеності. Порушення ритмічності постачання комплектуючих вузлів і деталей, варіативність інтенсивності відмов рухомого складу, обмеженість оборотного капіталу та скорочення ресурсного забезпечення формують комплекс операційних і фінансових ризиків, що безпосередньо впливають на рівень технічної готовності вагонів.

Традиційні підходи до нормування запасів орієнтовані переважно на мінімізацію витрат або забезпечення заданого рівня обслуговування, проте вони недостатньо враховують ризик як системоутворюючий фактор. У цьому контексті значної актуальності набуває управління на основі визначення допустимого рівня ризику, який підприємство готове прийняти задля досягнення стратегічних і операційних цілей. Саме співвідношення між рівнем прийнятного ризику, обсягом резервів та очікуваними втратами повинно стати основою формування політики управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів. Сучасна ремонтна система вагонів має розглядатися як інтегрований логістичний ланцюг, де ключовим завданням є баланс між витратами та рівнем сервісу [3, 4]. Важливо враховувати, що управління запасами сьогодні – це не просто складська операція, а стратегічний інструмент конкурентоспроможності підприємства [1].

Недостатній рівень запасів підвищує ймовірність простоїв і втрат доходів, тоді як їх надлишок знижує фінансову гнучкість і обмежує інвестиційні можливості підприємства. Таким чином, проблема полягає не лише в пошуку оптимального обсягу запасів, а у формуванні збалансованої моделі управління, яка забезпечує необхідний рівень стійкості системи при узгодженні виробничих потреб із фінансовими можливостями та визначеним рівнем прийнятного ризику.

У зв'язку з цим важливою є необхідність розроблення концептуальних та методичних підходів до ризик-орієнтованого управління ремонтною системою вагонів, що передбачають інтеграцію аналізу надійності, сценарного моделювання, оцінювання втрат, управління резервами та кількісного визначення показників стійкості. Такий підхід дозволить перейти від реактивної моделі управління до проактивної, орієнтованої на забезпечення довгострокової стабільності, адаптивності та конкурентоспроможності промислового підприємства.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Теоретичні та прикладні аспекти управління запасами в умовах невизначеності та ризику висвітлено у дослідженні E. A. Silver, D. F. Pyke та D. J. Thomas [5], де обґрунтовано моделі оптимізації політики поповнення запасів з урахуванням стохастичного попиту. Значний внесок у розвиток концепції управління ланцюгами постачання зробили D. Simchi-Levi, P. Kaminsky та E. Simchi-Levi [6], які розглянули інтегровані підходи до проектування та управління логістичними системами з позицій мінімізації сукупних витрат і підвищення гнучкості.

Проблематика стійкості логістичних систем набула розвитку у роботі M. Christopher та H. Peck [1], де визначено ключові характеристики стійкого ланцюга постачання: адаптивність, гнучкість, диверсифікація ризиків та стратегічне резервування. Методологічні засади ризик-орієнтованого управління в логістичних системах розкрито у працях S. Y. Ponomarev та M. C. Holcomb [2], які визначили resilience як інтегральну характеристику здатності системи передбачати, протидіяти та адаптуватися до порушень. У сфері технічного обслуговування й ремонту значний внесок зробив A. K. S. Jardine [7], який дослідив моделі оптимізації запасів запасних частин з урахуванням показників надійності та інтенсивності відмов.

Дослідження сучасних українських науковців Є. В. Крикавського, О. М. Колодізева, В. В. Чмута, А. М. Загорулько, О. В. Харченко, І. В. Черниш, Н. В. Чернопиській, Ю. О. Стадника, П. В. Шквира [8, 9] сфокусовані на питаннях адаптивного управління запасами в умовах військових та економічних ризиків, цифровізації логістичних процесів, інтеграції ERP-систем у виробниче планування, а також оцінюванню прийнятних для підприємства ризиків як

складових стратегічного управління ресурсами. У цих роботах наголошується на необхідності переходу від нормативного підходу до сценарного моделювання та багатокритеріальної оптимізації запасів.

Аналіз наукових праць свідчить, що більшість досліджень зосереджено або на класичних моделях управління запасами, або на загальних питаннях логістичної інтеграції та ризик-менеджменту. Водночас недостатньо розробленими залишаються питання формування системи управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів у межах ремонтних підрозділів промислових підприємств з урахуванням показників стійкості та визначеного ризику підприємства.

Отже, існує потреба у розвитку інтегрованої логістично-ризик-орієнтованої концепції управління запасами в системі ремонту рухомого складу, яка б поєднувала моделі оптимізації резервів, аналіз надійності, оцінювання ризиків та фінансові обмеження підприємства.

**Мета дослідження.** Запропонувати підприємствам заходи управління запасами ремонтних підрозділів, розмір яких залежить від коливань обсягів виробництва.

**Основний матеріал дослідження.** Відповідно до принципів логістики у межах дослідження систему управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів розглянуто як складову відкритої адаптивної ремонтної системи промислового підприємства, концептуальна модель якої наведена на рис. 1. Основна мета її функціонування полягає в підтримці такого рівня запасів, при якому досягається висока надійність системи запасів, прийнятне обслуговування ремонтних підрозділів та оптимальні витрати на зберігання комплектуючих вузлів і деталей вагонів. На відміну від традиційного підходу, де акцент робиться переважно на мінімізації витрат або досягненні нормативного рівня обслуговування, у даному дослідженні система інтерпретується як ризик-орієнтована логістично-виробнича структура, функціонування якої визначається співвідношенням між інтенсивністю відмов, параметрами постачання, рівнем резервів та встановленим прийнятним для підприємства рівнем ризику.

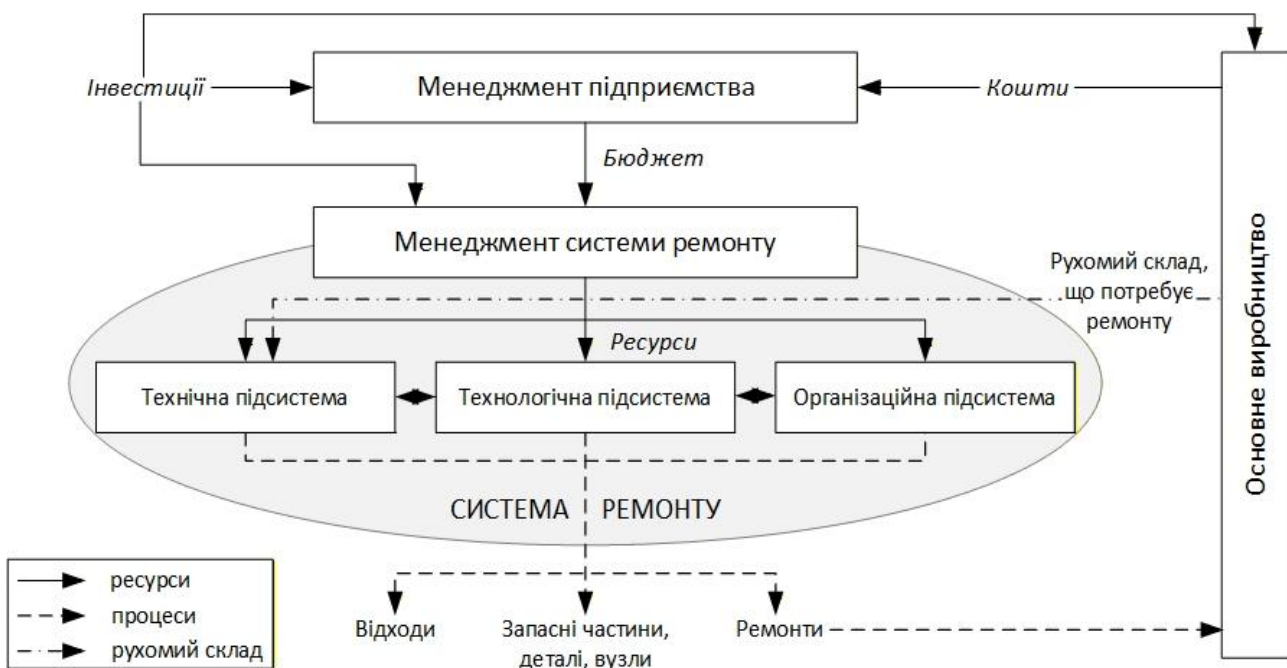


Рисунок 1 – Структурна схема взаємозв'язку елементів ремонтної системи

Об'єктом дослідження є процеси формування та використання запасів комплектуючих вузлів і деталей вагонів у межах ремонтного підрозділу промислового підприємства. Предмет дослідження – це закономірності впливу рівня запасів на показники стійкості ремонтної системи та її здатність забезпечувати заданий рівень технічної готовності вагонів в умовах невизначеності попиту й постачання комплектуючих вузлів і деталей.

Методологічну основу дослідження становлять: аналіз надійності рухомого складу та варіативності інтенсивності відмов; сценарне моделювання дефіцитних і профіцитних станів запасів; оцінювання очікуваних втрат від простоїв вагонів; розрахунок середнього обсягу інвестицій у підтримання необхідного рівня запасів комплектуючих вузлів і деталей; узгодження параметрів страхового запасу з прийнятним рівнем ризику підприємства.

Результати аналізу процесів управління матеріальними запасами на промислових підприємствах дозволяють стверджувати, що традиційні стратегії управління запасами не відповідають сучасним ринковим умовам та невизначеності зовнішнього середовища:

1. Відсутній цільовий підхід до формування та зберігання запасів.
2. Раціоналізація запасів не сприймається як великий резерв економічного зростання.
3. Промислові підприємства недостатньо використовують чинник підвищення конкурентоспроможності, обмежуючись лише констатацією нестачі чи надлишку запасів.
4. Відсутня інформація, що дає змогу дати кількісну оцінку впливу рівня запасів на кінцевий результат економічної діяльності підприємства.

Вирішення проблеми підвищення ефективності управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів у сучасному економічному середовищі вимагає переходу від традиційних методів управління до логістичних, що дозволяє включити управління запасами до складу основних напрямів стратегії своєї ринкової поведінки, що активно здійснюється підприємствами.

Відповідно до структурної схеми взаємозв'язку елементів ремонтної системи (рис. 1), основним матеріальним потоком системи є потік комплектуючих вузлів і деталей вагонів, що циркулює між складськими, ремонтними та управлінськими ланками. Вхідним потоком є надходження вагонів у ремонт і поставки комплектуючих із зовнішнього середовища; вихідним – потік вагонів із відновленим ресурсом. Стійкість системи визначається здатністю підтримувати безперервність цього потоку з урахуванням коливань параметрів попиту та пропозиції.

Крім вищенаведених, є інші фактори, що знижують ефективність та працездатність системи ремонту. Найбільш суттєвим є невизначеність у системі управління ремонтними підрозділами. Мінімізація впливу цього фактору можлива за умови впровадження сучасних логістичних структур та технологій.

У процесі дослідження встановлено, що за умови стохастичної зміни інтенсивності відмов і нестабільності постачань система може переходити у:

- дефіцитний стан, коли рівень запасів є недостатнім для забезпечення планового обсягу ремонтів, що спричиняє простої та втрати доходу;
- надлишковий стан, який супроводжується зростанням витрат на зберігання та зниженням фінансової гнучкості підприємства.

Тому виникає потреба в обґрунтування не тільки оптимального, а й раціонального з точки зору прийнятого рівня ризику для підприємства, розміру запасу комплектуючих вузлів і деталей вагонів. У сучасній логістиці існує низка методів, що дозволяють оптимізувати рівень запасів [5, 7, 10, 11]. Оптимізація роботи системи управління запасами вагонного депо металургійного підприємства у сучасних економічних умовах здійснюється шляхом оперативної зміни розміру страхового запасу. Розмір страхового запасу розраховується, як правило, на середньостроковий період з наступним регулярним коригуванням. Проте надто

часта зміна параметрів системи управління запасами ускладнює ритмічність роботи логістичного ланцюга забезпечення і робить її нестійкою. Для оптимізації рівня запасів комплектуючих у ремонтних депо доцільно використовувати математичні моделі прогнозування попиту та розрахунку страхових резервів [5, 10]. Зокрема, перехід до методики планування, орієнтованої на реальний попит (Demand-driven material requirements planning – DDMRP), дозволяє уникнути як дефіциту, так і надлишку ресурсів [11].

У цьому випадку контроль за запасами необхідно здійснювати відповідно до таких принципів:

- 1) постачати комплектуючих вузлів і деталей вагонів необхідно лише ті, що використовуються для ремонту вагонів конкретних видів;
- 2) розмір запасу кожного виду комплектуючих вузлів і деталей вагонів встановлювати з урахуванням середнього виробничого запасу, що містить поточну потребу, підготовчий та гарантійний запаси;
- 3) зберігання запасів організувати за сучасними ресурсозберігаючими технологіями;
- 4) запаси повинні підлягати повному обліку, маркуванню.

Для кількісного визначення середнього обсягу інвестицій, необхідних для підтримання цільового рівня запасів  $Z$ , запропоновано розрахункову залежність, що враховує залишки запасів на початок і кінець періоду, а також обсяг комплектуючих вузлів і деталей вагонів, встановлених на відремонтованих вагонах:

$$Z = \frac{\sum d_0 f_0 + \sum d_1 f_1}{\sum f_0 + \sum f_1}, \text{ грн.}$$

де  $d_0 f_0$  – сума залишків запасів комплектуючих вузлів і деталей у системі ремонту на початок періоду в грошовому вираженні, грн.;

$d_1 f_1$  – сума залишків запасів комплектуючих вузлів і деталей вагонів у системі ремонту на кінець періоду в грошовому вираженні, грн.;

$\sum f_0$  – сума комплектуючих вузлів і деталей вагонів, встановлена на вагонах, що пройшли систему ремонту в натуральних показниках на початок (кінець) періоду, розрахованих по кожному  $i$ -му виду запасів, грн.;

$\sum f_1$  – сума комплектуючих вузлів і деталей вагонів, встановлена на вагонах, що пройшли систему ремонту в натуральних показниках на кінець періоду, розрахованих по кожному  $i$ -му виду запасів, грн.

Результати апробації запропонованого підходу (на основі статистичного аналізу даних щодо кількості та видів ремонтів, а також обсягів постачання запасних частин) показали, що сумарна величина дефіциту комплектуючих вузлів і деталей вагонів безпосередньо формує додаткову інвестиційну потребу в межах близько 10 % від середнього обсягу оборотних коштів, спрямованих на забезпечення ремонтного процесу. При цьому найбільша частка дефіциту припадає на підрозділи з найбільш інтенсивними умовами експлуатації рухомого складу (аглодомений та сталеплавильний підрозділи виробництва), що підтверджує необхідність диференційованого формування страхових запасів залежно від експлуатаційного навантаження.

## ВИСНОВКИ

Отримані в ході досліджень результати свідчать, що надмірно часта зміна параметрів системи управління запасами знижує її структурну стійкість і ускладнює забезпечення

ритмічності логістичного ланцюга. Отже, коригування страхового запасу повинно здійснюватися в межах допустимого інтервалу, визначеного рівнем прийняттого ризику для підприємства та прогнозною варіативністю попиту. Ефективне управління запасами в межах ремонтного підрозділу вимагає чіткої класифікації деталей та впровадження алгоритмів регулярного контролю залишків. Раціоналізація цих процесів є суттєвим резервом економічного зростання підприємства.

Таким чином, отримані результати підтверджують доцільність переходу від нормативної моделі управління запасами до інтегрованої логістично-ризик-орієнтованої моделі, у якій рівень резервів визначається не лише економічними критеріями, а й показниками стійкості системи, ймовірністю дефіциту та допустимим рівнем втрат. Це забезпечує підвищення адаптивності ремонтної системи, узгодження виробничих і фінансових параметрів та формування проактивної політики управління запасами комплектуючих вузлів і деталей вагонів.

### *Список використаних джерел*

1. Christopher M., Peck H. Building the Resilient Supply Chain. *International Journal of Logistics Management*. 2004. Vol. 15, No. 2. – Pp. 1–14. DOI: <https://doi.org/10.1108/09574090410700275>
2. Ponomarov S. Y., Holcomb M. C. Understanding the concept of supply chain resilience. *The International Journal of Logistics Management*. 2009. Vol. 20, No. 1. Pp. 124–143. DOI: <https://doi.org/10.1108/09574090910954873>
3. Bowersox D. J., Closs D. J., Cooper M. B., Bowersox J. C. *Supply Chain Logistics Management*. 5th ed. New York : McGraw-Hill Education. 2019. 496 p. URL: <https://www.mheducation.com/unitas/highered/sample-chapters/9780078096648.pdf>
4. Christopher M. *Logistics & Supply Chain Management*. 5th ed. Financial Times : Pearson Education. 2016. 328 p. URL: <https://www.pearson.com/en-gb/subject-catalog/p/logistics-and-supply-chain-management/P200000007134>
5. Silver E. A., Pyke D. F., Thomas D. J. *Inventory and Production Management in Supply Chains*. Boca Raton : CRC Press. 2016. 788 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b17612>
6. Simchi-Levi D., Kaminsky P., Simchi-Levi E. *Managing the Supply Chain: The Definitive Guide for the Business Professional*. New York : McGraw-Hill. 2004. 320 p. URL: <https://www.amazon.com/Managing-Supply-Chain-Definitive-Professional/dp/0071410317>
7. Jardine A. K. S., Tsang A. H. C. *Maintenance, Replacement, and Reliability: Theory and Applications*. 2nd ed. Boca Raton : CRC Press. 2013. 394 p. DOI: <https://doi.org/10.1201/b14736>
8. Крикавський Є. В., Похильченко О. В. Логістичне управління в умовах невизначеності та воєнних ризиків. *Вісник Національного університету «Львівська політехніка»*. Серія: Менеджмент та підприємництво в Україні: етапи становлення і проблеми розвитку. 2022. Вип. 4, № 2. С. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.23939/smeu2022.02.001>
9. Шквир П. В. Удосконалення логістичних процесів підприємства на основі інтегрованих систем планування ресурсів (ERP). *Науковий погляд: економіка та управління*. 2020. № 2 (68). С. 89–95. DOI: <https://doi.org/10.32836/2521-666X/2020-68-12>
10. Nahmias S., Olsen T. L. *Production and Operations Analysis*. 7th ed. Long Grove : Waveland Press. 2015. 817 p. URL: [https://openlibrary.org/books/OL31871484M/Production\\_and\\_Operations\\_Analysis\\_Seventh\\_Edition?utm\\_source=chatgpt.com](https://openlibrary.org/books/OL31871484M/Production_and_Operations_Analysis_Seventh_Edition?utm_source=chatgpt.com)

11. Ptak C., Smith C. Demand Driven Material Requirements Planning (DDMRP). 3rd ed. South Norwalk : Industrial Press, Inc. 2019. 384 p. URL: <https://www.industrialpress.com/demand-driven-material-requirements-planning-ddmrp/>

**M. Khara, I. Nikolaienko, G. Maslak, N. Semchenko**

## **RISK-ORIENTED MANAGEMENT OF RAILWAY CAR COMPONENT AND PARTS INVENTORIES IN UNCERTAIN CONDITIONS**

*The present-day operating conditions of industrial enterprises are characterised by high uncertainty in the external environment, disruptions in logistics chains and financial constraints, which highlights the need to ensure not only the efficiency but also the resilience of railway depot repair systems to risks. Traditional approaches to regulating the stocks of component assemblies and carriage parts do not sufficiently take into account risk as a factor affecting the rolling stock repair system. In this context, it is particularly important to organise management based on determining an acceptable level of risk for the enterprise. The purpose of the research is to develop conceptual and methodological approaches to risk-oriented management of railway car repair systems, which involve the integration of reliability analysis, scenario modelling, loss assessment, inventory management, and quantitative determination of stability indicators. The research topic lies at the intersection of logistics, reliability theory, and risk management methods. The article studies the theoretical and methodological foundations of risk-oriented inventory management in the repair departments of industrial enterprises in conditions of uncertain demand and unstable supply of component assemblies and parts for railway cars. The repair system for railway cars is considered as an open adaptive production and logistics system, the functioning of which is defined by the interaction of material, information and financial flows. The calculation formula has been developed to quantify the average investment required to maintain the target level of inventories. Test results confirm that a shortage of components creates additional investment needs and reduces the technical readiness of railway cars, while excess inventory limits an enterprise's financial flexibility. Warranty stock optimisation should be carried out taking into account demand variability, rolling stock failure rates and the established risk level. The proposed approach allows a transition from a reactive management model to a proactive one, providing long-term resilience and adaptability for the enterprise.*

**Keywords:** components and parts, logistics chain, demand uncertainty, industrial enterprise, railway car repair system, risk, resilience, safety stock, inventory management.

*Стаття надійшла 02.03.2026*

*Стаття прийнята 06.03.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## УДОСКОНАЛЕННЯ НАУКОВОГО ПІДХОДУ ДО ПРОГНОЗУВАННЯ ТА ПОБУДОВИ МОДЕЛЕЙ ТРАНСПОРТНИХ ПОТОКІВ

*При дослідженні транспортних потоків спостерігаються коливання вантажопотоків, які найчастіше зумовлені сезонністю перевезень. При аналізі таких коливань для наочності застосовують графіки та діаграми, що характеризують зміни обсягів перевезень протягом певного періоду. Таким змінам притаманна календарна циклічність.*

*Сезонні варіації змін обсягів перевезень характеризуються відносно стабільною формою, яка має річну циклічність. Такі зміни можуть бути наслідками впливу природних умов або повторенням календарно залежних подій в різних країнах. Але на коливання інтенсивності вантажопотоків впливають не тільки сезонність, а й різні зовнішні чинники як то квотування, падіння попиту, торговельні й політичні конфлікти тощо.*

*В роботі розглядаються методи дослідження сезонних коливань інтенсивності вантажопотоків на прикладі відвантаження експортного металопрокату.*

*Державні структури, які постійно аналізують сезонні коливання, використовують програмні продукти ЄС з урахуванням різних коригуючих коефіцієнтів. Для більш точних показників коливання вантажопотоків виконують аналіз середньодобових показників, але вони не завжди дозволяють масштабно сприйняти матеріал досліджень.*

*Запропоновано для дослідження інтенсивності коливань вантажопотоків використовувати коефіцієнт, який враховує фактичні дані з виконаних перевезень, кількість календарних днів і за рік і за місяць. Для обробки даних застосовано метод календарного дефлятування, який дозволяє наочно побачити коливання середньодобових обсягів відвантаження експортної металопродукції протягом року.*

*Для досліджень транспортних потоків пропонується двоетапна модель календарної дефляції та поліноміальної апроксимації, яку можна використовувати для планування оперативної роботи, визначення потрібної кількості вагонів для організації перевезень та коригування планів регламентних робіт із рухомим складом.*

*При математичному дефлятуванні часових рядів можливо трансформувати аналітичні дані у предиктивну модель логістики, що дозволить підвищити точність планування на 9% та запобігти дефіциту потужностей у пікові періоди.*

*Запропонована на основі полінома 5-го ступеня модель не статична, а є базовим профілем, який легко адаптувати до прогнозних річних обсягів через коефіцієнти масштабування. У виробничій діяльності це дозволить диспетчерським службам оперативно розраховувати добову потребу в рухомому складі, зберігаючи виявлену структуру сезонного попиту.*

**Ключові слова:** транспортні потоки, дослідження, сезонні коливання, вантажопотік, інтенсивність, методи, коефіцієнти, дефлятування, апроксимація, модель.

**Постановка проблеми.** В процесі дослідження транспортних потоків нерідкою є ситуація пояснення коливань обсягів перевезень певної продукції, обумовлених сезонністю попиту на неї. Поширеним методом аналізу аналітичних матеріалів є представлення даних у вигляді графіків та діаграм, які показують помісячну зміну обсягів цих перевезень.

Сезонними варіаціями є зміни обсягів перевезень з відносно стабільною формою, що має річну циклічність. Сезонні зміни можуть бути наслідками впливу природних умов, або повторення календарно залежних подій в різних країнах.

В якості прикладу показаний фрагмент графіка щомісячного виробництва сталі за даними 65 країн світу [1], на якому кожен рік спостерігаються стрибки інтенсивності у перший місяць, падіння – у другому, подальше наростання та певна стабілізація місячних обсягів з суттєвим їх зниженням наприкінці двох останніх місяців.

Поруч із сезонністю, на процеси виробництва, та, відповідно, інтенсивність вантажопотоків можуть впливати безліч зовнішніх чинників.

У 2019 році спад був обумовлений ескалацією торгового конфлікту США і Китаю, коли лише наприкінці року з'явилися шляхи вирішення проблеми. Запровадження квот на сталь в ЄС призвело до зниження споживання сталі в Європі. Також негативно вплинуло зниження споживання світових автовиробників [2].

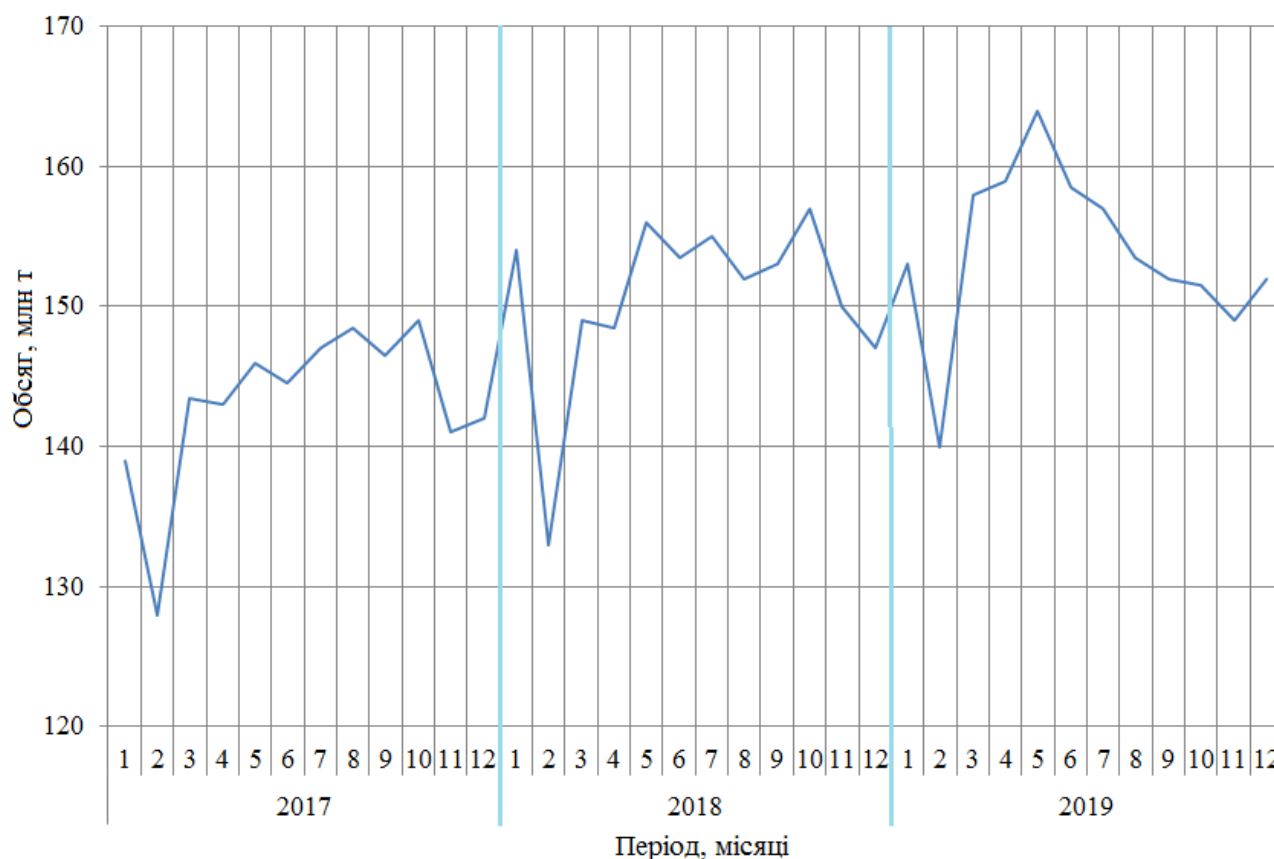


Рисунок 1 – Фрагмент графіка щомісячного виробництва сталі за даними 65 країн світу

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Державна служба статистики України у факторному аналізі сезонних коливань використовує аналітичний пакет Demetra+, який дозволяє виконувати коригування статистичних даних із урахуванням сезонних коливань та яке прийнято за базове програмне забезпечення країнами ЄС. При врахуванні сезонної та іншої специфіки використовують коригуючі коефіцієнти, зокрема, співвідношення усередненої кількості діб у місяці - 30,4375 до їх фактичної кількості [3].

Питання врахування календарних ефектів та сезонної складової у часових рядах є достатньо дослідженими, зокрема доведено необхідність коригування статистичних даних для підвищення точності аналізу та прогнозування [4, 5, 6]. Сучасні підходи до моделювання

часових рядів передбачають використання методів декомпозиції та врахування впливу зовнішніх факторів, що дозволяє підвищити якість прогнозування.

У сфері транспортної логістики значна увага приділяється прогнозуванню вантажопотоків та адаптації моделей до змінних умов функціонування транспортних систем. Теоретичні та прикладні аспекти інтелектуалізації логістичного управління, зокрема використання сучасних методів аналізу та оптимізації потоків, розглянуто у фундаментальних дослідженнях [7]. Окремі наукові дослідження присвячено прогнозуванню транспортно-логістичних потоків із урахуванням змінного контексту функціонування систем, що підтверджує доцільність адаптації моделей до умов невизначеності [8].

Дослідження також підтверджують доцільність урахування сезонних коливань при розподілі рухомого складу та плануванні перевезень [9], а також необхідність застосування інформаційних технологій управління вантажними перевезеннями в умовах невизначеного попиту [10]. Водночас питання підвищення ефективності експлуатаційної роботи залізничного транспорту на основі предиктивної аналітики також знайшли відображення у відповідних наукових працях [11].

Разом з тим, існуючі дослідження недостатньо повно враховують можливості поєднання методів календарного коригування та апроксимаційних підходів для моделювання сезонних коливань транспортних потоків. Це обумовлює актуальність подальших досліджень у напрямі побудови більш точних моделей, здатних враховувати як сезонні, так і випадкові складові динаміки вантажопотоків.

**Мета дослідження.** Метою статті є удосконалення наукового підходу до прогнозування та побудови моделей транспортних потоків на основі двоетапного методу календарної дефляції та поліноміальної апроксимації вантажопотоків для врахування сезонності коливань при плануванні оперативної роботи, визначенні потрібної кількості вагонів для організації перевезень і уточнення планів регламентних робіт із рухомим складом.

**Основний матеріал дослідження.** Для того, щоб уникнути хибних уявлень зміни інтенсивності вантажопотоків, застосовують метод аналізу середньодобових вагонопотоків, але при цьому дещо втрачається масштаб сприйняття досліджуваного матеріалу. Пропонується використовувати переводний коефіцієнт виду:

$$Q_z = \frac{Q_m N_p}{12 N_m}, \quad (1)$$

де  $Q_z$  – обсяг перевезень, який відображається на графіку, т/місяць;

$Q_m$  – фактичні дані перевезень, т/місяць;

$N_p$  – кількість календарних днів у році;

$N_m$  – кількість днів у місяці.

На рисунку 2 показані дані перевезень металопродукції з України на експорт залізничним транспортом у передвоєнний рік.

Червоним кольором показаний вихідний графік фактичних обсягів перевезень, а синім кольором показаний цей же графік, оброблений методом календарного дефлятування за формулою (1). Слід відмітити, що останній, зокрема, наочно показує перевищення середньодобового відвантаження у лютому у порівнянні із січнем.

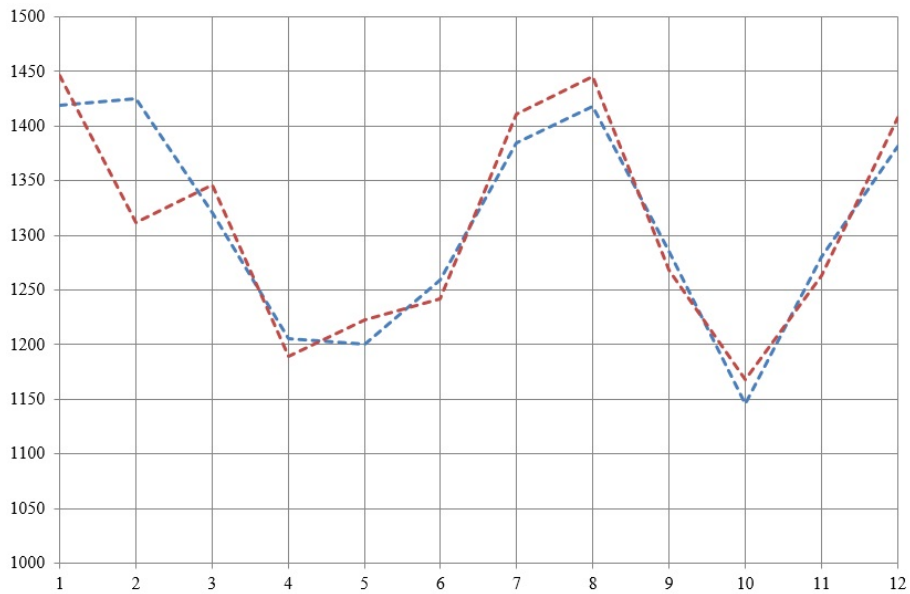


Рисунок 2 – Графіки обсягів місячних перевезень, тис т/міс

Сезонні коливання транспортних потоків пояснюються сезонністю будівництва в ЄС та на Близькому Сході, оскільки пік споживання металопродукції, зазвичай, припадає на літо та ранню осінь. Саме цим більшою мірою пояснюються спади в березні-квітні та вересні-листопаді. Сезонність Близького Сходу визначається не лише погодою, а й релігійним календарем (зокрема, Рамадан у досліджуваному періоді припадав на період з середини квітня по середину травня). На динаміку перевезень впливає також режим квотування в ЄС, яка передбачає квартальні ліміти на ввезення сталі.

При поліноміальній апроксимації високого порядку для графіку фактичних даних отримано функцію, яка показана на рисунку 3:

$$y = 0,1947x^5 - 5,7395x^4 + 58,949x^3 - 243,74x^2 + 327,96x + 1299,1.$$

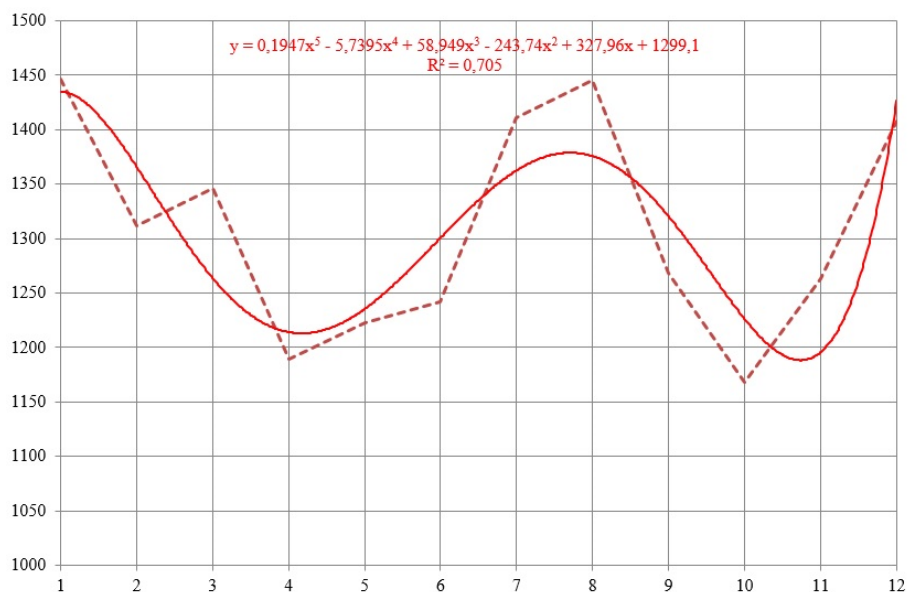


Рисунок 3 – Прогнозна функція для фактичних даних

При поєднанні календарного дефлятування з поліноміальною апроксимацією високого порядку отримано функцію, наведену на рисунку 4:

$$y = 0,2366x^5 - 7,2878x^4 + 79,99x^3 - 370,71x^2 + 645,24x + 1077,7.$$

Обидві функції є поліномами 5-го порядку. Величина достовірності апроксимації для функції на рисунку 3 ( $R^2=0,7711$ ) показує більш тісний зв'язок із вихідними даними, ніж функція на рисунку 2 ( $R^2=0,705$ ), що також підтверджується візуальним аналізом.

Представлені поліноми високого ступеня не доцільно використовувати для прогнозування на наступний період (аргумент обмежуємо значеннями від 1 до 12), але, якщо припускається, що сезонні коливання у наступному році зберігають свою форму при певній зміні загального річного обсягу вантажоперевезень, можна використати дану функцію із відповідним коригуючим коефіцієнтом до її складових.

Для наведеного прикладу похибка в річному обсязі перевезень у порівнянні з фактичними даними складає 0,0277%, що є припустимою математичною похибкою трансформації даних, яка дозволяє виявити приховану динаміку, яку маскує календарний ефект.

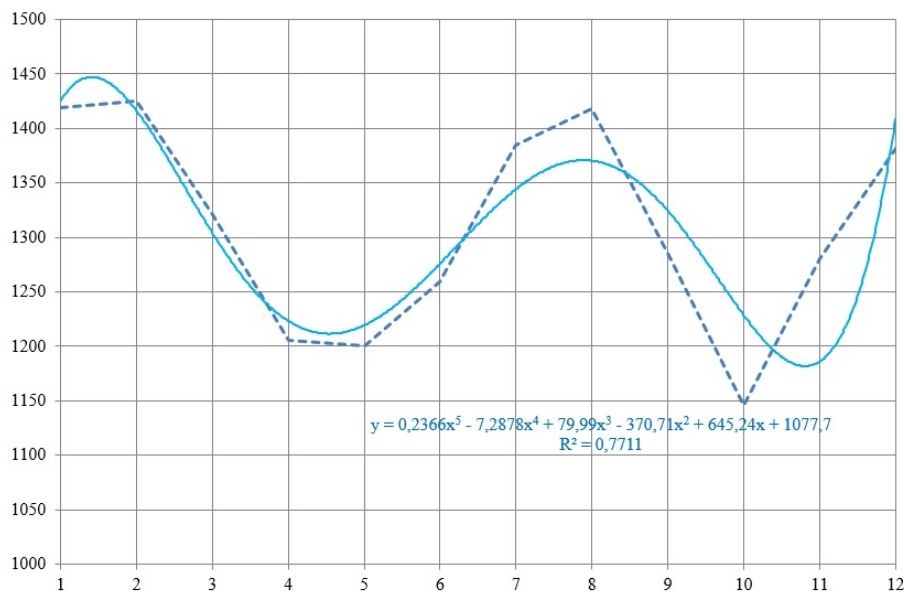


Рисунок 4 – Прогнозна функція для оброблених даних

Для стратегічного планування на 2-3 роки вперед краще використовувати періодичні функції, які дозволяють моделювати інтенсивність залізничних перевезень попри календарні аномалії чи тимчасові кризи.

### ВИСНОВКИ

Запропонована двоетапна модель календарної дефляції та поліноміальної апроксимації транспортних потоків може бути використана для планування оперативної роботи, визначення потрібної кількості вагонів для організації перевезень і уточнення планів регламентних робіт із рухомим складом.

Математичне дефлятування часових рядів дозволяє трансформувати аналітичні дані у предиктивну модель логістики, підвищує точність планування на 9% (згідно з показником  $R^2$ )

та запобігає дефіциту потужностей у пікові періоди.

Запропонована на основі полінома 5-го ступеня модель не є статичною, а служить базовим профілем, який може бути легко адаптованим до прогнозних річних обсягів шляхом коефіцієнтного масштабування. Це дозволить диспетчерським службам оперативно розраховувати добову потребу в рухомому складі, зберігаючи виявлену структуру сезонного попиту.

### Список використаних джерел

1. World Steel in Figures 2021. URL : <https://worldsteel.org/data/world-steel-in-figures/world-steel-in-figures-2021/>
2. Підсумки-2019 : спад на зовнішніх ринках і ревальвація дали металургам мінус. URL : <https://gmk.center/ua/posts/pidsumki-2019-spad-na-zovnishnih-rinkah-i-revalvaciya-dali-metalurgam-minus/>
3. Про затвердження Методики коригування даних щодо обороту роздрібної торгівлі з урахуванням сезонності та робочих днів. URL : <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0042832-13#Text>
4. Findley D. F. Calendar Effects in Economic Time Series. *Handbook of Statistics*. 2005. Vol. 24. P. 205-221.
5. Eurostat. *Methodological Guide on Seasonal Adjustment with JDemetra+*. 2024. URL: <https://ec.europa.eu/eurostat/web/products-manuals-and-guidelines> (дата звернення: 27.03.2026).
6. Hyndman R. J., Athanasopoulos G. *Forecasting: Principles and Practice*. 3rd ed. 2024 update. URL : <https://otexts.com/fpp3/>
7. Григорак М. Ю. Интеллектуализация логистического управления : монографія. Київ : Сік Груп Україна, 2021. 504 с. ISBN 978-617-7457-96-0.
8. Жовнич П. І., Русин-Гриник Р. Р. Прогнозування транспортно-логістичних потоків: адаптація моделей до змінних контекстів для стійкого розвитку. *Економіка та суспільство*. 2025. № 2(12). С. 569–582. DOI: [https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-2\(12\)-569-582](https://doi.org/10.52058/3041-1254-2025-2(12)-569-582)
9. Gomon M., Naumov V. Optimization of Rail Car Distribution Considering Seasonal Fluctuations in Demand. *Transport and Telecommunication Journal*. 2023. Vol. 24(1). P. 45–56. DOI: <https://doi.org/10.2478/ttj-2023-0004>
10. Prokhorchenko A. et al. Information Technology of Cargo Rail Transport Management under Conditions of Uncertain Demand. *Lecture Notes in Networks and Systems*. 2022. Vol. 456. P. 112–124. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-031-04286-7\\_10](https://doi.org/10.1007/978-3-031-04286-7_10)
11. Наумов В. С., Ковальов В. В. Удосконалення методів планування роботи залізничних ділянок на основі предиктивної аналітики. 2023. DOI: <https://doi.org/10.15587/2706-5448.2023.273451>

**Turpak S.M., Liamziin A.O., Ostrohliad O.O., Vasylieva L.O., Olenytsia O.O.**

## IMPROVING THE SCIENTIFIC APPROACH TO FORECASTING AND MODELING TRAFFIC FLOWS

*Research on traffic flows reveals fluctuations in freight volumes, which are most frequently driven by the seasonality of transportation. To visualize these fluctuations, graphs and charts characterizing changes in transport volumes over a specific period are employed. Such variations are inherently characterized by calendar cyclicity.*

*Seasonal variations in transport volumes exhibit a relatively stable pattern with an annual*

cycle. These changes may result from environmental (natural) conditions or the recurrence of calendar-dependent events across different countries. However, freight flow intensity is influenced not only by seasonality but also by various external factors, such as quotas, falling demand, trade disputes, and political conflicts.

*This paper examines methods for investigating seasonal fluctuations in freight flow intensity, using the shipment of exported rolled steel as a case study.*

*Government agencies that continuously monitor seasonal trends typically employ EU software solutions incorporating various correction factors. For more precise results, average daily indicators are analyzed; however, these do not always provide a comprehensive macro-level perspective of the research data.*

*To investigate the intensity of freight flow fluctuations, this study proposes a coefficient that accounts for actual transport data, as well as the number of calendar days per month and per year. Data processing is conducted using the calendar deflation method, which enables a clear visualization of fluctuations in average daily shipment volumes of export steel products throughout the year.*

*For transport flow research, a two-stage model of calendar deflation and polynomial approximation is proposed. This model can be utilized for operational planning, determining the required fleet size for transport organization, and adjusting schedules for rolling stock maintenance.*

*Through the mathematical deflation of time series, it is possible to transform analytical data into a predictive logistics model, capable of increasing planning accuracy by 9% and preventing capacity shortages during peak periods.*

*The proposed model, based on a 5th-degree polynomial, is not static; rather, it serves as a baseline profile that is easily adaptable to projected annual volumes via scaling factors. In industrial operations, this allows dispatch services to rapidly calculate daily rolling stock requirements while maintaining the identified structure of seasonal demand.*

**Keywords:** *transport flows, research, seasonal fluctuations, freight flow, intensity, methods, coefficients, deflation, approximation, model.*

*Стаття надійшла 01.04.2026*

*Стаття прийнята 05.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

Чорнобородова Н. П., Чорнобородов М. П.,  
Бугрова Т. І., Логачова Л. М., Морщавка С. В., Сметанін І. М.

## РОЗБІЖНІСТЬ ТЕОРІЇ Й ПРАКТИКИ СПІРАЛЬНИХ АНТЕН

*Предметом статті були одновиткові та тривиткові об'ємні спіральні антени діапазону 3..6 ГГц для радіоелектронної боротьби з безпілотними літальними апаратами. Метою статті було порівняння результатів тривимірного моделювання в середовищі HFSS з результатами вимірювань характеристик спрямованості та узгодження фізичних прототипів, які були виготовлені відповідно до геометрії та матеріалів моделі. Для досягнення мети було розраховано геометрію антен, створено моделі одновиткових та тривиткових спіральних антен у середовищі проектування мікрохвильових пристроїв HFSS та оптимізовано розміри за критерієм максимальної ширини діаграми спрямованості. Було встановлено частотні залежності характеристик спрямованості та узгодження з лінією живлення в середовищі HFSS, а саме: розраховано величини імпедансу, коефіцієнти стоячої хвилі, коефіцієнти посилення та діаграми спрямованості одновиткових та тривиткових спіралей з металевими екранами. Для порівняння результатів розрахунків та експериментів були виготовлені прототипи антен відповідно до розрахункових розмірів та експериментально досліджені шляхом безпосереднього вимірювання їх діаграм спрямованості на частоті 5,25 ГГц та якості узгодження з лінією живлення у вигляді коаксіального кабелю з хвильовим опором 50 Ом. Якість узгодження спіральних антен оцінювалася за значенням коефіцієнтів стоячої хвилі в діапазоні від 3 до 6 ГГц. Порівняння літературних, розрахункових та вимірних характеристик показало досить великі розбіжності, які виявилися досить суттєвими, особливо щодо ширини діаграм спрямованості. Було встановлено, що ступінь розбіжності результатів залежить від кількості витків об'ємної спіралі та зменшується зі збільшенням кількості витків. Розбіжність між моделюванням та експериментом коливалася від 20 % до 50 % у характеристиках збігу та від 34% до 50% у ширині діаграм спрямованості (38° та 50° для одновиткової спіралі в експерименті та моделі відповідно, та 25° та 36° для тривиткової спіралі), причому конвергенція зростала зі збільшенням кількості витків спіралі.*

**Ключові слова:** спіральна антена; діаграма спрямованості; КСХ; РЕБ; середовище моделювання; HFSS.

**Постановка проблеми.** Поява дронів на полі бою значно розширило номенклатуру радіотехнічних пристроїв, якими мусить бути озброєно бійця або підрозділ.

Для збільшення дальності дії безпілотного літального апарату (БЛА) операторові треба мати спрямовані антени, а для вільного маневрування – широку діаграму спрямованості.

Для захисту від радіокерованих безпілотних літальних апаратів почали масово використовувати бортові й окопні постановники активних шумових завад. Ефективність цих постановників, у тому числі, залежить й від параметрів антен. Для збільшення дальності протидії дронам постановника завад треба обладнувати антенами з великими коефіцієнтами підсилення, а для всебічного захисту – ширину діаграми спрямованості, максимально наближену до 180°.

Антени типу "хвильовий канал", дуже добре відомі, з усіх боків досліджені (від початку ефірного метрового телемовлення), будучи надзвичайно технологічними і забезпечуючи

великі коефіцієнти підсилення, на жаль, мають відносно великі габарити. Тобто вони незручні для переносних застосувань, а для стаціонарних – можуть бути занадто помітні.

Тому постала стала задача пошуку малогабаритних спрямованих антен (з коефіцієнтом підсилення, більшим за 6 дБ) з широкими діаграмами спрямованості: потрібна або розробка нових типів антен, або перерахунок добре відомих (старих) конструкцій на новий частотний діапазон. Враховуючи невинне збільшення асортименту антенної продукції на ринку, можна констатувати актуальність і нерозв'язаність цієї задачі.

Звичайно, для зменшення витрат на розробку нового виробу, спочатку вдаються до моделювання принципу (алгоритму) його роботи у відповідному середовищі проектування, де виконують перевірку працездатності пристрою й наступну оптимізацію параметрів, і лише потім виготовляють дослідний зразок. Якщо для цифрових схем розбіжності в результатах роботи моделі й фізичного пристрою можуть виникати лише через помилки з боку розробника симулятора (що трапляється рідко, але можливо виявити), то у випадку дослідження процесів поширення електромагнітних хвиль чи розробки пристроїв НВЧ, різниця між віртуальністю й дійсністю – велика.

Останній випадок може виникати через наступні причини:

- помилка розробника середовища (що трапляється не так рідко, але дуже складно визначити напевно: користувач можете безрезультатно битись над розв'язанням задачі хоч і довічно, доки усе раптом саме собою не владнається з черговим оновленням версії середовища),

- порушення користувачем правил застосування певного інструменту;

- помилка у розрахунках користувача;

- помилка в інженерних формулах, які використовують за викладу теорії для спрощеного або придатного до практичного використання опису складних процесів у науковій літературі.

Якщо отримання допомоги, наприклад, на вузькофахових форумах, часто дозволяє подолати як другу, так й третю причини, то з рештою причин не усе так просто.

Якщо порівнювати характеристики антен, викладені виробниками на своїх сайтах, з параметрами, які можна знайти у відповідній літературі, то складається враження, що теорія цілковито збігається з практикою. Але нерідкими є випадки, коли ми самостійно виготовляємо антену за тими ж самими розмірами, самостійно вимірюємо параметри і з подивом виявляємо істотну розбіжність у значеннях. Далі ми придбаємо таку ж саму антену у того самого виробника, знову самостійно вимірюємо її характеристики, вкотре пересвідчуємося, що зроблена нами антена і придбана мають однакові параметри (бо виготовлені за однаковими розмірами).

Звісно, перше що спадає на думку – ми не вміємо чи то вимірювати характеристики, чи то виготовляти самі антени, чи то усе разом. Але ми не спостерігаємо вище описаних проблем у випадку "хвильового каналу" (для частот ефірного телемовлення): його конструкції докладно описано і самостійно виготовлені антени мають такі ж самі параметри, як і промислові. І виміряні нами параметри "хвильового каналу" не відрізняються від даних з літературних джерел.

Спіральні антени є неосвоєним масовим виробництвом продуктом, тому вищеописані невідповідності мають місце. Пошуку причин цих розбіжностей і присвячено цю статтю.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Метаспрямовані теоретичні й експериментальні дослідження об'ємних спіральних антенних структур у широкосмуговому діапазоні демонструють їхню високу практичну значущість у сучасних радіотехнічних застосуваннях.

Так, в [1] описано поляризаційний еквівалент аксиально-модової спіральної антени. Проекції спіралі на циліндричну оболонку визначають один або декілька синусоїдальних

випромінювальних елементів. Забезпечено аксиально спрямоване випромінювання однією головною пелюсткою, що дозволяє синтезувати всі типи поляризації: лінійну, колову та подвійну. Шляхом комп'ютерного моделювання отримано ширину діаграми спрямованості не більше  $40^\circ$  за рівня бічних пелюсток не менше  $-12$  дБ й коефіцієнта підсилення  $12$  дБ для випадку 3 витків спіралі (періодів синусоїди). Її екранована модифікація [2] має ліпше узгодження, спрощену конструкцію схеми узгодження, але мало чим відрізняється за цікавими нам параметрами.

У [3] промодельовано й виготовлено компактну ближньопольову резонансну паразитну шпарувату тривиткову спіральну антену з широким осьовим співвідношенням смуги пропускання. Антена складається з однієї напівсферичної металевої поверхні, протравленої подвійними вигнутими спіральними пазами, та одного керованого спірального монополя, розташованого під нею. Результати вимірювань дослідного зразка добре узгоджуються з промодельованими значеннями: для трьох витків спіралі отримано ширину діаграми спрямованості  $120^\circ$  (шляхом моделювання) й  $90^\circ$  (виміряно) за значення коефіцієнта підсилення  $3,5$  дБ. Тому такі характеристики роблять її привабливою для застосування в багатьох ширококутових платформах з обмеженим простором, таких як аерокосмічні та мобільні комунікаційні системи. Аналогічні параметри неспрямованих (з коефіцієнтом підсилення, меншим за  $5$  дБ) спіральних антен для схожих застосувань було отримано шляхом моделювання у [4-7] для 1..3 витків.

У [8-9] розглядаються питання створення антен зі складною геометрією на прикладі переходу з хвилеводу на спіраль для застосувань у діапазонах X та E з центральними частотами  $10$  ГГц й  $66$  ГГц, відповідно. Отримано ширини смуги пропускання  $2,8$  ГГц за рівнем  $-10$  дБ й  $0,28$  ГГц за рівнем коефіцієнта відбиття  $-20$  дБ у X-діапазоні й  $5,2$  ГГц за рівнем коефіцієнта відбиття  $-20$  дБ й  $16$  ГГц за рівнем коефіцієнта відбиття  $-15$  дБ у E-діапазоні. За цього досягнуто ширини діаграм спрямованості до  $30^\circ$  за коефіцієнтів підсилення  $10..12$  дБ для  $10$  витків спіралі.

У [10] досліджується вплив спірального поляризатора, інтегрованого до апертури пірамідальної рупорної антени, призначеного для перетворення лінійно поляризованих полів, що поширюються хвилеводом, на право- або ліво- бічну колову поляризацію у двох різних діапазонах. Інтегрований поляризатор є повністю пасивним і функціонує як паразитний елемент, розташований між хвилеводом та випромінювальною апертурою. Тип поляризації визначається орієнтацією намотування інтегрованого спірального дроту. Досліджено два різні підходи до перетворення поляризації. У першому підході один спіральний дріт вирівнюється вздовж центру апертури рупора та призначений для забезпечення перетворення поляризації з піковим реалізованим коефіцієнтом підсилення  $14,3$  дБ у діапазоні частот від  $26$  ГГц до  $32$  ГГц. Другий метод включає два спіральні дроти як поляризатори: один розташовано у центрі апертури, а другий, намотаний протилежно, розташовано уздовж бічної стінки рупора. Така конфігурація забезпечує перетворення поляризації з максимальним реалізованим коефіцієнтом підсилення  $15,25$  дБ між  $33$  ГГц та  $37$  ГГц. Для обох діапазонів досягається рівень крос-поляризації, що перевищує  $23$  дБ. Експериментальне випробування обох конструкцій демонструє значну узгодженість між змодельованими та вимірними результатами, що підтверджує ефективність запропонованого методу перетворення поляризації за кількості витків спіралі від  $3$  до  $7$  й ширинами діаграми спрямованості до  $40^\circ$ .

В [11] розглядаються характеристики спіральних антен різної довжини (різної кількості витків) для L-діапазону для космічного модуля 3Cat-4, 1U CubeSat, які до виходу на орбіту знаходяться у стисненому стані (до  $26,8$  мм), а для приведення до робочого стану вона розпрямляється до  $506$  мм довжини. За цього антена зберігає стабільні параметри, забезпечуючи ширину діаграми спрямованості  $20^\circ..35^\circ$  за коефіцієнта підсилення  $11..7$  дБ.

В [12-15] теоретично та експериментально досліджено конформні надширококутні спіральні антени (на діелектричній півсфері, надувні циліндричні, тощо). Повідомляється про те, що було розроблено, виготовлено та випробувано велику кількість спіральних антен витікаючої хвилі. Результати вимірювань вказують на досить ширококутну поведінку таких антен, починаючи з 1,7 до 6 ГГц (1,8 октави) по узгодженню вхідних імпедансних характеристик. Кругова поляризація підтримується протягом 1,26 октави. Щодо ширини діаграми спрямованості, то вона варіюється в залежності від особливостей конструкції, робочої частоти та особливо кількості витків, від 26° до 50°.

Таким чином, аналізуючи доступну літературу, можна зробити наступні висновки щодо параметрів спіральних антен:

1. У переважній більшості випадків, для великої кількості витків спіралі, змодельовані й безпосередньо виготовлені зразки мають однакові характеристики, які добре узгоджуються з теорією: чим більша кількість витків, тим більший коефіцієнт підсилення, тим вужча діаграма спрямованості.

2. У переважній більшості випадків, для малої кількості витків спіралі, змодельовані й безпосередньо виготовлені зразки мають певну розбіжність характеристик: для 1..3 витків, змодельовані ширини діаграм спрямованості значно більші за практично отримані (наприклад, 120° проти 90°, відповідно). За цього, значення коефіцієнта підсилення або не вимірювалося, або визначалося лише за підсумками комп'ютерного моделювання: 1,5..3,5 дБ. А такі значення параметрів вже мають певну розбіжність з теорією.

**Мета дослідження.** Метою статті є порівняння ідеалізованих моделей антен НВЧ з їхніми втіленнями у фізичній формі шляхом аналізу основних характеристик. Для досягнення цієї мети необхідно розв'язати наступні задачі:

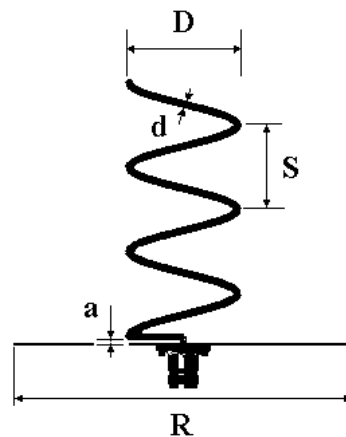
1. Вибрати й розрахувати топологію майбутньої антени.
2. Створити моделі одновиткової та тривиткової спіральних антен у середовищі проектування пристроїв НВЧ HFSS.
3. Здійснити оптимізацію розмірів моделі за критеріями досягнення максимуму ширини діаграми спрямованості й мінімуму коефіцієнта стоячої хвилі.
4. Змодельувати частотні залежності характеристик спрямованості та узгодження з лінією живлення в середовищі HFSS.
5. Виготовити антену за оптимізованими розмірами й виміряти її характеристики спрямованості та узгодження з лінією живлення.
6. Порівняти літературні, розрахункові і вимірні характеристики та знайти ступінь та причини їхньої розбіжності.

**Основний матеріал дослідження.** *Матеріали та методи* Об'єктом дослідження є спіральна циліндрична антена колової поляризації на частоту  $f = 5,2$  ГГц, предметом дослідження – її параметри: ширина діаграми спрямованості, коефіцієнт підсилення й кількість витків.

Методи дослідження: комп'ютерне моделювання й натурний експеримент.

Інструменти: Ansys HFSS, векторний аналізатор LibreVNA й 3D принтер.

Розрахунок топології прототипу спіральної антени (рис. 1) можна виконати за інженерними формулами, наведеними в [16, с. 144-146].



$d$  – діаметр дроту,  $D$  – діаметр спіралі,  $S$  – крок спіралі,  $a$  – відстань між спіраллю й екраном,  $R$  – діаметр екрану

Рисунок 1 – Геометрія спіральної антени

Довжина хвилі:

$$\lambda = \frac{c}{f} = 58 \text{ мм.}$$

Діаметр дроту:

$$d = 0,02 \cdot \lambda = 1,1 \text{ мм.}$$

Діаметр спіралі:

$$D = 0,31 \cdot \lambda = 18 \text{ мм.}$$

Крок спіралі:

$$S = 0,24 \cdot \lambda = 14 \text{ мм.}$$

Діаметр екрану:

$$R = 2 \cdot D = 36 \text{ мм.}$$

Відстань між спіраллю й екраном:

$$a = 0,13 \cdot \lambda = 7,5 \text{ мм.}$$

Розрахунок топології прототипу спіральної антени можна виконати і за допомоги калькулятора (наприклад, [17]). І хоча переважна більшість з них мусить працювати за одними й тими самими інженерними формулами, але відмінності можуть зустрічатись. Так, калькулятор [17] нараховує відстань між спіраллю й екраном у 15 разів меншу за інженерний розрахунок.

За розрахованою топологією прототипу спіральної антени (див. рис. 1) було створено модель у середовищі HFSS. З метою отримання максимально широкої діаграми спрямованості антени, було обрано кількість витків  $N=3$  [16, с. 145] і здійснено оптимізацію розмірів топології засобами HFSS з метою максимізації ширини діаграми спрямованості (первинний критерій) за умови мінімізації коефіцієнта стоячої хвилі (вторинний критерій). Для оцінювання підсумків комп'ютерного моделювання у смузі частот 3..6 ГГц було побудовано діаграму спрямованості (рис. 2), коефіцієнт стоячої хвилі (рис. 3), опір (рис. 4) й коефіцієнт підсилення (рис. 5) моделі спіральної антени. Діаграми спрямованості тут й надалі наведено у логарифмічному масштабі у вертикальному перерізі.

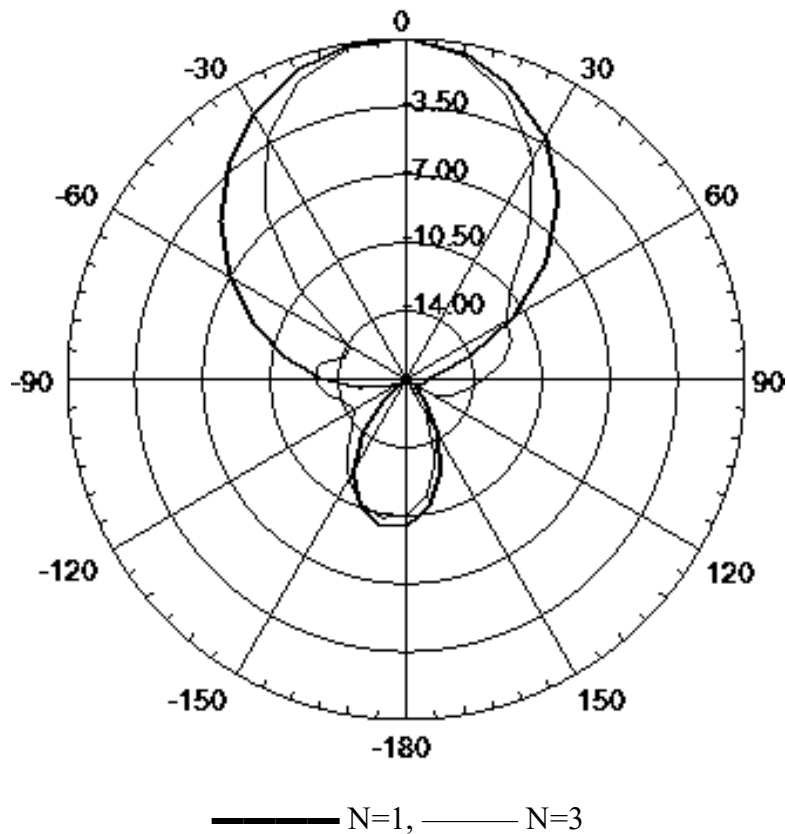


Рисунок 2 – Діаграма спрямованості моделі антени, отриманої засобами HFSS (f = 5,25 ГГц)

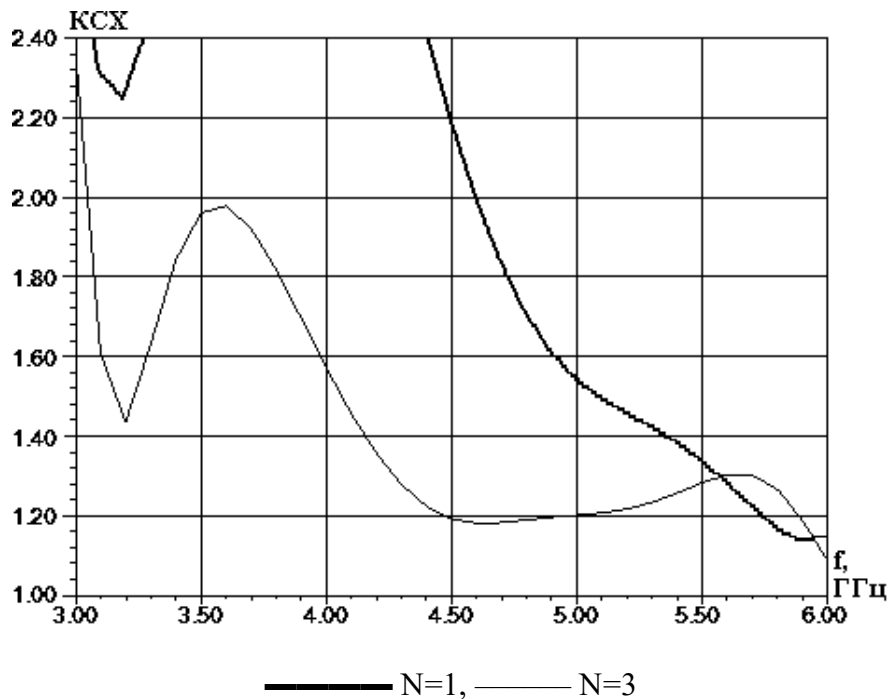


Рисунок 3 – Коефіцієнт стоячої хвилі за напругою моделі антени, отриманої засобами HFSS

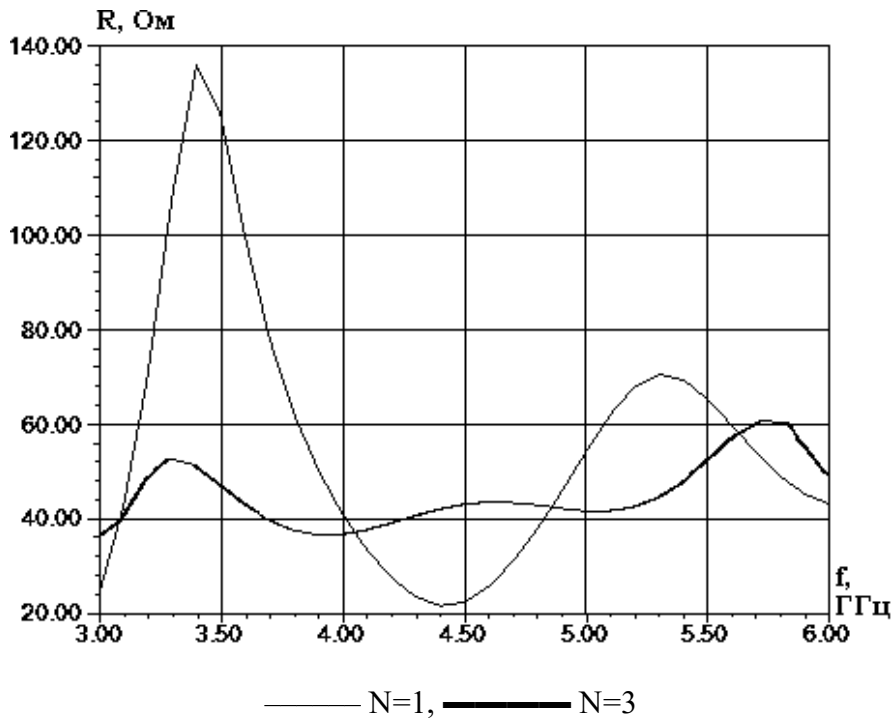


Рисунок 4 – Опір моделі спіральної антени, отриманої засобами HFSS

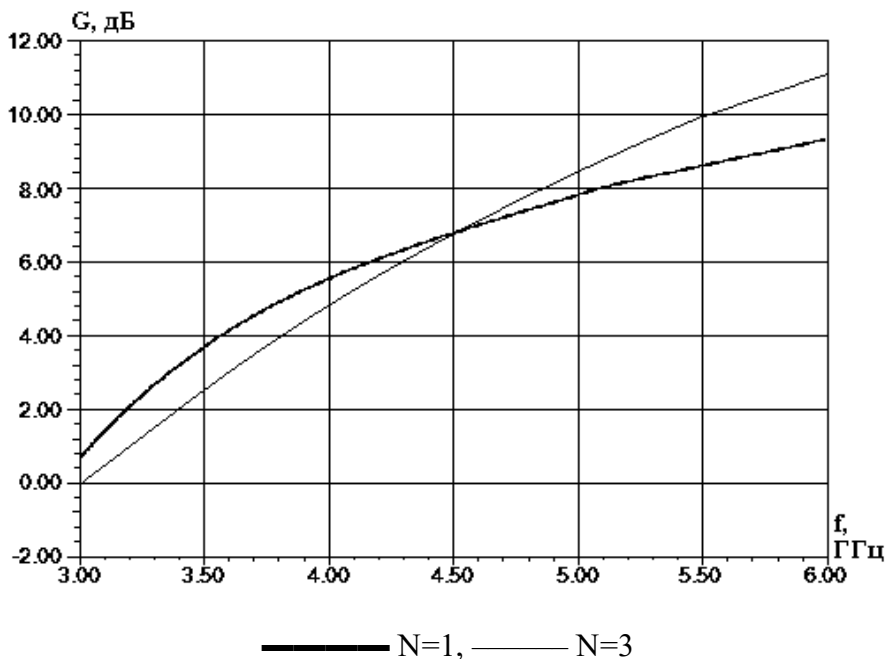


Рисунок 5 – Коефіцієнт підсилення моделі спіральної антени, отриманої засобами HFSS

Оскільки зменшення кількості витків призводить до розширювання діаграми спрямованості, то на рис. 2-5 наведено і результат моделювання одновиткової спіральної антени, яка має ті ж самі розміри (звісно, ж окрім кількості витків  $N$ ), що й тривиткова.

Порівнюючи форми діаграм спрямованості (див. рис. 2) й коефіцієнти підсилення (див. рис. 5), можна побачити, що підсумки комп'ютерного моделювання узгоджуються з теорією: чим більша кількість витків (довжина антени) - тим ліпші її спрямівні властивості. Також, порівнюючи коефіцієнт стоячої хвилі (див. рис. 3) й опір (див. рис. 4), можна побачити, що

чим більша кількість витків - тим ширший діапазон узгодженості, що пояснюється більшою стабільністю значення опору антени).

Для виготовлення спіральних антен за розрахованими розмірами, було використано 3D-принтер для створення оправок для намотування спіралі. На рисунках 6,7 наведено підсумки вимірювання параметрів виготовлених антен.

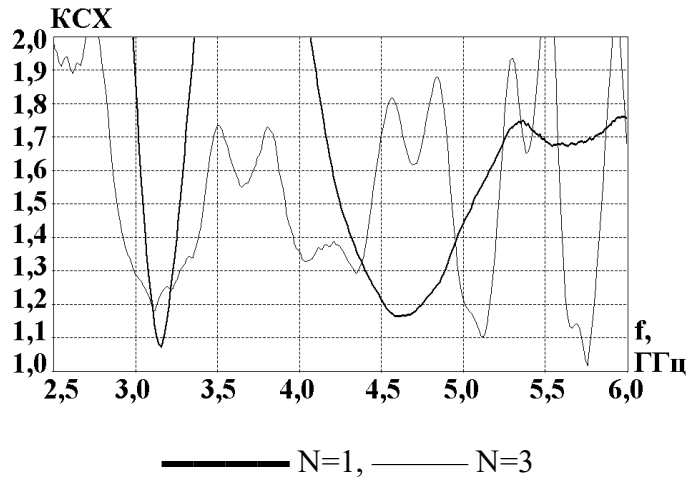


Рисунок 6 – Коефіцієнт стоячої хвилі фізично виготовленої спіральної антени

На рисунку 6 можна побачити, що тривиткова спіральна антена узгоджена у ширшому діапазоні частот, ніж одновиткова. Звісно, відмінності від підсумків моделювання (див. рис. 3) - є, але вони не настільки принципові.

На рисунку 7,а наведено діаграму спрямованості одновиткової спіральної антени в логарифмічному масштабі. Порівнюючи з промодельованими значеннями (див. рис. 2), можна помітити істотну розбіжність у ширинах головних пелюсток: 35° проти 70°. Отримано, що в діапазоні частот 4..5,4 ГГц одновиткова спіральна антена має ширину головної пелюстки 34°..35°. Це - вдвічі менше, ніж теоретично відомо [1, с. 146], тобто, розбіжність складає 100%.

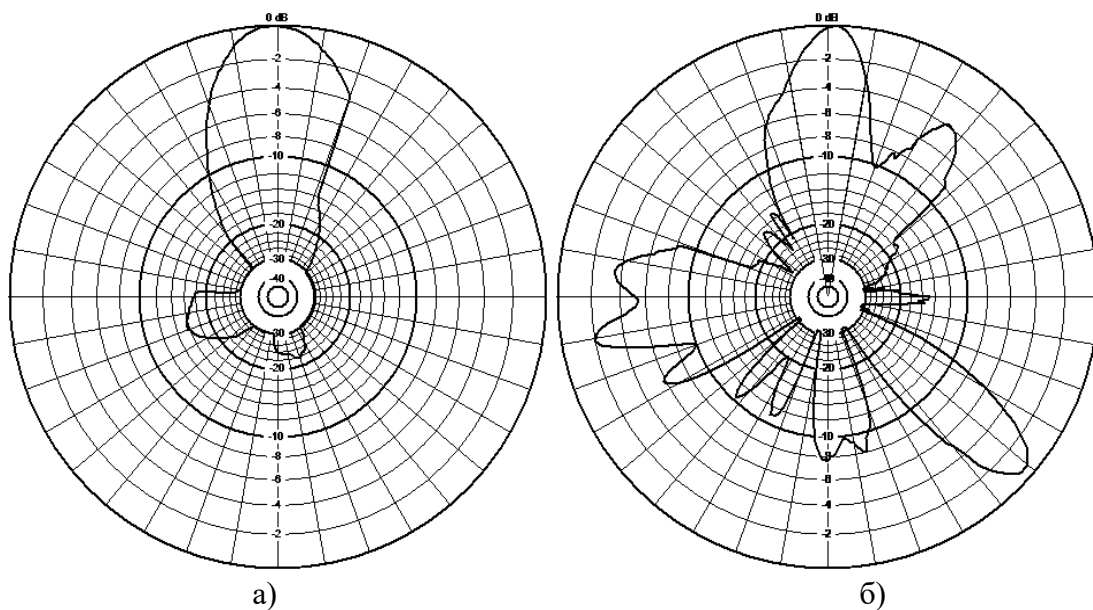


Рисунок 7 – Діаграма спрямованості фізично виготовленої спіральної антени (f=5,25 ГГц): а) – одновиткової; б) - тривиткової

На рис. 7,б наведено діаграму спрямованості тривиткової спіральної антени, виміряну на частоті  $f=5,25$  ГГц. Така багатопелюстковість спостерігалась в діапазоні частот від 4,9 ГГц до 5,6 ГГц, де антену треба вважати непрацездатною. В діапазоні 5,6..6,0 ГГц її ширина діаграми спрямованості становила  $20^\circ$ , а в діапазоні 2,8..3,3 ГГц -  $35^\circ$ .

Для об'єктивності, нами було зроблено контрольні заміри ширини діаграм спрямованості двох примірників спіральних антен, які виготовляються українським дрібносерійним виробником:  $24^\circ..30^\circ$  в діапазоні частот 5,2..5,9 ГГц для семивиткової антени (в [1, с. 146] дають  $40^\circ$ ) й  $20^\circ..22^\circ$  в діапазоні 5..5,3 ГГц для шістнадцятивиткової (в [1] дають  $26^\circ$ ).

## ВИСНОВКИ

В роботі порівняно результати електродинамічного моделювання в програмі HFSS ідеалізованих моделей об'ємних спіральних антен НВЧ з їх фізичними зразками шляхом аналізу основних характеристик.

Шляхом моделювання в HFSS досліджувалися характеристики спрямованості одно- та тривиткової спіралей у вигляді просторових діаграм спрямованості та характеристик узгодження цих антен з лініями живлення. Для цього розраховувались частотні залежності модуля вхідного імпедансу, коефіцієнту стоячої хвилі за напругою та коефіцієнту підсилення в діапазоні частот 3..6 ГГц.

Ширина головної пелюстки діаграми спрямованості одновиткової спіральної антени вдвічі вужча від її моделі:  $35^\circ$  проти  $70^\circ$  в діапазоні робочих частот 4..5,4 ГГц (де  $K_{CX}<2$  і антена мала спрямовані властивості).

За цих же геометричних розмірів (діаметра витка й кроку спіралі) тривиткова спіральна антена виявилась непрацездатною у діапазоні частот від 4,9 ГГц до 5,6 ГГц, оскільки її діаграма спрямованості - багатопелюсткова. В діапазоні частот 5,6..6,0 ГГц (де  $K_{CX}<2$  і антена мала спрямовані властивості) ширина діаграми спрямованості становила  $20^\circ$ , а в діапазоні 2,8..3,3 ГГц -  $35^\circ$  (але тут  $K_{CX}>2$ ). У той час у моделі цієї антени ширина головної пелюстки склала  $45^\circ$  й  $55^\circ$ , відповідно, а теорія дає  $61^\circ$  (для 5,25 ГГц).

Виявлені розбіжності викликають необхідність проведення докладних досліджень щодо сталості ширини діаграми спрямованості спіральних антен з малою ( $N<3$ ) кількістю витків та її розширення, оскільки це питання є дуже важливим для засобів радіоелектронної протидії і мало досліджено у літературі.

### Список використаних джерел

1. Parsche F. The All Polarization Helix Antenna: The Sine Wave Antenna. 2025 *IEEE International Workshop on Antenna Technology (iWAT)*, Cocoa Beach, FL, USA, 2025, pp. 1-4, doi: 10.1109/iWAT64079.2025.10931211.
2. Parsche F. E. A New Axial Mode Helix Antenna: The Archimedean Screw Antenna. 2023 *IEEE Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON)*, Melbourne, FL, USA, 2023, pp. 109-112, doi: 10.1109/WAMICON57636.2023.10124885.
3. He J. and Cao Z. A Low-profile and Wideband Normal Mode Helix Antenna with Parasitic Helical Structure. 2023 *IEEE 11th Asia-Pacific Conference on Antennas and Propagation (APCAP)*, Guangzhou, China, 2023, pp. 1-2, doi: 10.1109/APCAP59480.2023.10469786.
4. Chen Z., Zhang Z., Zhu H. and Hu Z. Circularly Polarized Cross-Helix Antenna With Quasi-Hemispherical 3 dB Axial Ratio Coverage. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 24, no. 10, pp. 3804-3808, Oct. 2025, doi: 10.1109/LAWP.2025.3605606.

5. Attaran A., Mirhassani M., Aloi D. Internal Helix Antennas: A Practical Solution for Miniaturized UHF Wireless Audio Transmitters. *IEEE Transactions on Consumer Electronics*. January 2026 PP(99):1-1. doi: 10.1109/TCE.2026.3667826.
6. Yang X., Xu Y., Dou Y., Zhang M. A Dual-Linearly-Polarized Center-Fed Quadrifilar Helix Antenna Loaded With Reverse Helices. *IEEE Access*, vol. 13, pp. 132146-132154, 2025, doi: 10.1109/ACCESS.2025.3592776.
7. Xu Y., Yang X., Dou Y., Zhang M. Compact Helical Antenna With Counter-Wound Structures for 5G-NR Applications. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 6, no. 5, pp. 1413-1422, Oct. 2025, doi: 10.1109/OJAP.2025.3583933.
8. Panusch D., Hubert F., Bachbauer F., Lomakin K., Gold G. Additively Manufactured Helix Antenna for X-Band Applications. 16th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Madrid, Spain, 2022, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP53622.2022.9769342.
9. Panusch D., Shi J., Lomakin K., Gold G. Additively Manufactured Endfire Bifilar Helix Antenna for E-Band. 17th European Conference on Antennas and Propagation (EuCAP), Florence, Italy, 2023, pp. 1-4, doi: 10.23919/EuCAP57121.2023.10133371.
10. Ajam M. A., Tawk Y., Costantine J. Single and Dual Helical Polarizers for Millimeter-Wave Horn Antennas. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 7, no. 1, pp. 18-25, Feb. 2026, doi: 10.1109/OJAP.2025.3628165.
11. Sureda M. Design and Testing of a Helix Antenna Deployment System for a 1U CubeSat. *IEEE Access*, vol. 9, pp. 66103-66114, 2021, doi: 10.1109/ACCESS.2021.3075660.
12. Meiguni J., Pommerenke D. Theory and Experiment of UWB Archimedean Conformal Spiral Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2019. 67(10), 6371-6377. Article 8753658. <https://doi.org/10.1109/TAP.2019.2925183>
13. Lira-Valdés T., Rajo-Iglesias E., Pizarro F. 3-D-Printed Spiral Leaky Wave Antenna With Circular Polarization. *IEEE Open Journal of Antennas and Propagation*, vol. 4, pp. 427-433, 2023, doi: 10.1109/OJAP.2023.3264739
14. Shemelya C., Zemba M., Liang M., Yu X., Espalin D., Wicker R., Xin H., MacDonald E. Multi-Layer Archimedean Spiral Antenna Fabricated Using Polymer Extrusion 3D Printing. *Microwave and Optical Technology Letters*. Jul. 2016, vol. 58, no. 7, pp. 1662-1666, doi: 10.1002/mop.29881
15. Gupta E, Bonner C, Muhammed F, McParland K, Mirotznik M. Design and fabrication of multi-material broadband electromagnetic absorbers for use in cavity-backed antennas. *Heliyon*. 2023 Mar 6;9(3):e14164, doi: 10.1016/j.heliyon.2023.e14164
16. Ротхаммель К., Кришке А. Антенны: 11-е изд.: пер. с нем.: в 2 т. М.: Данвел, 2007. Т. 2. 416 с.
17. Helix antenna design and construction details. URL: <https://jccoppens.com/ant/helix/calc.en.php> (дата звернення: 20.03.2026)

**Chornoborodova N. P., Chornoborodov M. P., Bugrova T. I., Logacheva L. M.,  
Morshchavka S. V., Smetanin I. M.**

## DISCREPANCY BETWEEN THEORY AND PRACTICE OF HELIX ANTENNAS

*The subject of the article was single-turn and three-turn volumetric spiral antennas in the 3..6 GHz range for electronic warfare against unmanned aerial vehicles. The aim of the article was to compare the results of three-dimensional simulation in the HFSS environment with the results of measurements of directivity characteristics and matching of physical prototypes, which were*

*manufactured in accordance with the geometry and materials of the model. To achieve the goal, the geometry of the antennas was calculated, models of single-turn and three-turn spiral antennas were created in the HFSS microwave device design environment and the dimensions were optimized according to the criterion of maximum width of the directivity diagram. The frequency dependences of the directivity characteristics and matching with the power line in the HFSS environment were established, namely, the impedance magnitudes, standing wave coefficients, gain coefficients and directivity diagrams of single- and three-turn spirals with metal screens were calculated. To compare the results of calculations and experiments, prototypes of antennas were manufactured according to the calculated dimensions and experimentally investigated by directly measuring their radiation patterns at a frequency of 5.25 GHz and the quality of matching with a power line in the form of a coaxial cable with a wave impedance of 50 Ohms. The quality of matching of spiral antennas was estimated by the value of the standing wave coefficients in the range from 3 to 6 GHz. A comparison of the literature, calculated and measured characteristics showed quite large discrepancies, which turned out to be quite significant, especially with respect to the width of the radiation patterns. It was established that the degree of discrepancy of the results depends on the number of turns of the volumetric spiral and decreases with increasing number of turns. The discrepancy between the simulation and the experiment ranged from 20% to 50% in the matching characteristics and from 34% to 50% in the width of the directional patterns (38° and 50° for a single-turn helix in the experiment and in the model, respectively, and 25° and 36° for a three-turn helix), with the convergence increasing with an increase in the number of turns of the helix.*

**Keywords:** *helix antenna; radiation pattern; VSWR; EW; simulation environment; HFSS.*

*Стаття надійшла 05.04.2026*

*Стаття прийнята 07.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

Лещенко В. О., Заболотна Н. І.

## АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ТА БІОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ ДЛЯ ДІАГНОСТИКИ ОНКОПАТОЛОГІЙ ЗА ЦИТОЛОГІЧНИМИ ЗОБРАЖЕННЯМИ

У статті проведено комплексний аналіз сучасних методів та біотехнічних систем для автоматизованої діагностики онкопатологій за цитологічними зображеннями. Актуальність дослідження зумовлена зростанням онкологічної захворюваності у світі – за оцінками GLOBOCAN 2022, щорічно реєструється близько 20 мільйонів нових випадків раку, а в Україні понад 38% випадків діагностується на пізніх стадіях, що підкреслює гостру потребу в ефективних засобах раннього скринінгу. Метою роботи є систематичний аналіз поточного стану методів комп'ютерного аналізу цитологічних зображень, виявлення ключових невирішених проблем та обґрунтування напрямків подальших досліджень у галузі біомедичної інженерії. Розглянуто медико-технічні аспекти формування цитологічних зображень, включаючи типи мікроскопії, методики підготовки препаратів та характерні артефакти. Проаналізовано комерційні CAD-системи для цервікальної цитології, зокрема ThinPrep Imaging System, BD FocalPoint GS та Genius Digital Diagnostics System, а також основні відкриті датасети (SIPaKMeD, Herlev, ISBI 2014/2015, CRIC, Cx22). Виконано порівняльний аналіз класичних методів сегментації клітин (порогова обробка Оцу, метод вододілу, активні контури) та архітектур глибокого навчання (U-Net, Mask R-CNN, Cellpose, StarDist, HoVer-Net), який показав суттєву перевагу нейромережових підходів за точністю та стійкістю. Досліджено методи класифікації від класичних алгоритмів машинного навчання (SVM, Random Forest) до сучасних глибоких нейронних мереж (ResNet, EfficientNet, Vision Transformers). Виявлено три ключові невирішені проблеми: недостатня точність інстансної сегментації перекриваючих клітин у реальних препаратах, значний доменний зсув між лабораторіями, що призводить до суттєвого зниження продуктивності навчених моделей, а також обмеженість та незбалансованість наявних відкритих датасетів. Обґрунтовано напрямки подальших досліджень, спрямований на розробку біотехнічної системи, яка поєднувала б модифікований метод інстансної сегментації з автоматичною класифікацією за морфологічними ознаками та забезпечувала стійкість до доменного зсуву для потреб ранньої діагностики онкопатологій.

**Ключові слова:** цитологічні зображення, комп'ютерна діагностика, сегментація клітин, нейронні мережі, CAD-системи, онкопатологія, біотехнічна система.

**Постановка проблеми.** Онкологічні захворювання залишаються однією з провідних причин смертності у світі. За даними Міжнародного агентства з дослідження раку (IARC), у 2022 році зареєстровано близько 20 мільйонів нових випадків онкологічних захворювань та 9,7 мільйона смертей від раку [1]. Прогнозується, що до 2050 року кількість нових випадків зросте до 35 мільйонів, що зумовлено демографічними змінами та старінням населення [1, 2]. В Україні ситуація є не менш тривожною: за прогнозами, у 2022 році очікувалося близько 179 тисяч нових випадків раку, при цьому рак шийки матки залишається четвертим за поширеністю серед жінок із стандартизованим показником захворюваності 17,5 на 100 000 [3]. Додатковим викликом для української системи охорони здоров'я стала повномасштабна військова агресія, яка призвела до руйнування інфраструктури, дефіциту кадрів та зниження охоплення скринінговими програмами [4].

Цитологічний аналіз є одним із ключових методів ранньої діагностики передракових станів та злоякісних новоутворень. Його переваги порівняно з гістологічним дослідженням полягають у малоінвазивності забору матеріалу, відносній швидкості отримання результатів та значно нижчій вартості процедури. Водночас традиційний (ручний) цитологічний аналіз характеризується значною суб'єктивністю: міжекспертна узгодженість при оцінці препаратів Папаніколау становить лише 50–70% навіть серед досвідчених цитопатологів [5]. Крім того, спостерігається глобальний дефіцит кваліфікованих спеціалістів – за даними американських досліджень, кількість цитотехнологів зменшилася на 38% з 2005 до 2022 року [6].

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У сучасних дослідженнях автоматизованої цитодіагностики основну увагу приділено трьом напрямкам: побудові САД-систем для цифрової патології [7-9], удосконаленню методів сегментації клітин і ядер, зокрема для перекриваючих клітин [10-17], а також застосуванню методів глибокого навчання для класифікації цитологічних зображень [18-23]. Попри суттєвий прогрес, у наукових публікаціях залишаються недостатньо вирішеними питання стійкої інстансної сегментації у складних препаратах, обмеженості відкритих анованих датасетів, доменного зсуву між лабораторіями та перенесення високих експериментальних результатів у реальну клінічну практику.

**Мета дослідження.** Мета статті – систематично проаналізувати сучасні методи комп'ютерного аналізу цитологічних зображень для діагностики онкопатологій, визначити основні невирішені проблеми та обґрунтувати напрями подальших досліджень у біомедичній інженерії.

**Основний матеріал дослідження.** Рання діагностика онкологічних захворювань є вирішальним фактором, що визначає ефективність лікування та прогноз виживаності пацієнтів. За оцінками GLOBOCAN 2022, рак легенів (12,4% усіх нових випадків) та рак молочної залози (11,6%) є найпоширенішими формами онкопатологій у світі, тоді як рак шийки матки залишається четвертим за частотою у жінок із щорічною захворюваністю близько 660 тисяч випадків та 350 тисячами смертей [1, 2]. В країнах з низьким та середнім індексом людського розвитку (HDI) спостерігається непропорційно вища смертність від раку, що пояснюється пізньою діагностикою та обмеженим доступом до якісного лікування [2].

В Україні, за даними Національного канцер-реєстру, понад 38% випадків раку у 2022 році діагностовано на III–IV стадіях, а показник однорічної летальності становив 23,9% [4]. Для раку шийки матки частка пізніх стадій при первинній діагностиці досягала 36% у 2023 році, що вдвічі перевищує показник 2013 року (16,1%) [24]. Ці дані свідчать про критичну потребу у впровадженні ефективних скринінгових програм із залученням сучасних діагностичних технологій.

Біотехнічна система формування цитологічних зображень. Формування якісного цитологічного зображення є першим і визначальним етапом автоматизованого аналізу. Основою біотехнічної системи візуалізації є мікроскоп із цифровою системою реєстрації зображень. Залежно від типу мікроскопії, що застосовується, розрізняють кілька підходів до отримання цитологічних зображень.

Світлова (оптична) мікроскопія є найбільш поширеним методом у рутинній цитологічній практиці. Сучасні моделі дослідницьких мікроскопів, зокрема Olympus BX53, Nikon Eclipse Ni-U, Zeiss Axio Imager.Z2 та Leica DM6 B, забезпечують збільшення до 1000× з роздільною здатністю до 0,2 мкм та оснащені цифровими камерами з роздільною здатністю від 5 до 20 мегапікселів. Ці системи дозволяють формувати зображення у яскравому полі, темному полі, фазовому контрасті та диференційному інтерференційному контрасті (DIC).

Флуоресцентна мікроскопія, зокрема конфокальна лазерна скануюча мікроскопія (CLSM), забезпечує значно вищу контрастність та можливість оптичного зрізування зразка,

що дозволяє отримувати тривимірні реконструкції клітинних структур. Однак висока вартість обладнання та необхідність спеціального фарбування (флуорохроми) обмежують широке клінічне використання цього методу [25].

Електронна мікроскопія (сканувальна та трансмісійна) забезпечує надвисоку роздільну здатність (до нанометрового рівня), проте потребує складної підготовки зразків та не придатна для рутинного скринінгу через тривалість процедури та високу вартість.

*Підготовка цитологічних препаратів.* Якість цитологічного зображення безпосередньо залежить від методики підготовки препарату. Основними етапами є забір матеріалу, фіксація, фарбування та нанесення на предметне скло. Серед методів фарбування найбільш широко використовуються метод Папаніколау (PAP), який є стандартом для цервікальної цитології і забезпечує поліхромне забарвлення клітинних компонентів, та метод Романовського-Гімзи, що застосовується для гематологічних та негінекологічних цитологічних досліджень [5]. Сучасна технологія рідинної цитології (Liquid-Based Cytology, LBC), зокрема системи ThinPrep (Hologic) та SurePath (BD), суттєво покращила якість препаратів шляхом рівномірного розподілу клітин у тонкому шарі та зменшення кількості артефактів порівняно з конвенційними мазками [6, 7].

*Артефакти та проблеми якості зображень.* На етапі формування цитологічних зображень виникає низка типових артефактів, які суттєво ускладнюють подальший автоматизований аналіз. До основних проблем належать: нерівномірне освітлення поля зору, що призводить до варіації інтенсивності фону; розфокусування окремих ділянок зображення через неоднорідну товщину препарату; шум цифрової камери; а також перекриття (злипання) клітин, яке є однією з найбільш складних задач для алгоритмів автоматичної сегментації [10, 11]. Додатково спостерігаються варіації кольорних характеристик між різними партіями реагентів та лабораторіями, що створює проблему доменного зсуву (domain shift) при застосуванні навчених моделей [18].

Системи автоматизованої комп'ютерної діагностики (Computer-Aided Diagnosis, CAD) у цитопатології призначені для допомоги цитотехнологам та патологам у виявленні аномальних клітин, підвищення чутливості діагностики та оптимізації робочого процесу лабораторії. Історично перші CAD-системи для цервікальної цитології з'явилися у 2000-х роках і базувалися на алгоритмах класичного комп'ютерного зору [6, 7].

*Класифікація CAD-систем.* За типом задачі, що вирішується, CAD-системи поділяють на: (1) скринінгові – призначені для первинного сортування препаратів за ступенем підозрілості; (2) діагностичні – спрямовані на класифікацію клітин або ділянок зображення за конкретними діагностичними категоріями (наприклад, за системою Бетесда); (3) прогностичні – оцінюють імовірність прогресії захворювання. За архітектурою розрізняють класичні pipeline-системи, де кожен етап (сегментація, виділення ознак, класифікація) реалізований окремим модулем, та end-to-end системи на основі глибокого навчання, де нейронна мережа безпосередньо пов'язує вхідне зображення з діагностичним висновком [18, 19].

Серед комерційних систем, що отримали регуляторне схвалення, найбільш відомими є ThinPrep Imaging System (TIS) від Hologic (FDA, 2003), яка аналізує 22 поля зору з найбільш підозрілими клітинами; BD FocalPoint GS (FDA, 2008), що додатково категоризує слайди за квантилями імовірності аномалій; та нове покоління – Genius Digital Diagnostics System (Hologic), який отримав FDA-дозвіл у лютому 2024 року і є першою та єдиною схваленою системою цифрової цитології, що поєднує об'ємне сканування (14 Z-площин) з алгоритмом глибокого навчання [6, 8]. За даними ретроспективних досліджень, система Genius продемонструвала чутливість 98,2–100% для виявлення ASC-US+ за 95% довірчого інтервалу, забезпечуючи при цьому скорочення часу перегляду препарату приблизно на 50% [6, 8, 9].

Серед дослідницьких платформ варто відзначити систему BestCyte (CellSolutions, США) для автоматизованого сортування клітин, CytoProcessor (DATEXIM, Франція), а також ряд рішень на базі хмарних обчислень, зокрема від PathAI та Google Health, які активно розвивають алгоритми аналізу цитологічних та гістологічних зображень [18, 19]. Узагальнену порівняльну характеристику основних комерційних CAD-систем наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика комерційних CAD-систем для цервікальної цитології

Система	Виробник	Рік FDA	Метод аналізу	Тип	Ключова особливість	Джерело
ThinPrep Imaging System	Hologic	2003	Класичний CV	Скринінг	22 FoV з підозрілими клітинами	[7], [8]
BD FocalPoint GS	Becton Dickinson	2008	Класичний CV	Скринінг	Квантильна категоризація слайдів	[7]
Genius Digital Diagnostics	Hologic	2024	Deep Learning + Vol. imaging	Скринінг/Діагностика	14 Z-площин, AI-галерея, ~50% менше часу	[6], [8], [9]
BestCyte	CellSolutions	CE (досл.)	Класичний CV + ML	Скринінг	Автоматичне сортування клітин	[18], [19]
CytoProcessor	DATEXIM	CE (досл.)	CNN	Діагностика	Хмарна платформа аналізу	[19]

*Відкриті датасети.* Розвиток алгоритмів комп'ютерного аналізу цитологічних зображень значною мірою залежить від наявності якісних анотованих наборів даних. Серед найбільш відомих відкритих датасетів слід виділити: SIPaKMeD (4049 клітин, 5 класів, Університет Патр), який містить зображення окремих клітин, вирізаних з мазків Папаніколау [26]; Herlev (917 клітин, 7 класів), класичний датасет з ручною анотацією ядра та цитоплазми [27]; ISBI 2014/2015, створені для змагань із сегментації перекриваючих цервікальних клітин, що включають як синтетичні, так і реальні зображення [10]; набір CRIC (400 зображень із різними діагностичними категоріями) [28]; та Cx22 (1320 зображень, із сегментацією ядер та цитоплазми) [29]. Суттєвими обмеженнями існуючих датасетів є їх відносно невеликий розмір, обмежена кількість діагностичних категорій, відсутність стандартизованого протоколу анотації та зміщення, пов'язане з конкретним обладнанням та лабораторією, де зразки були отримані.

Сегментація клітин та їх субклітинних структур (ядер, цитоплазми) є фундаментальним етапом автоматизованого цитологічного аналізу. Точність сегментації безпосередньо впливає на якість подальшої класифікації, оскільки морфометричні параметри клітин (площа ядра, площа цитоплазми, співвідношення ядро/цитоплазма, периметр, еліптичність) є ключовими діагностичними ознаками в цитопатології [5, 18].

*Класичні методи сегментації.* Порогова обробка методом Оцу (Otsu) забезпечує автоматичне визначення оптимального порогу бінаризації на основі максимізації міжкласової дисперсії. Цей метод ефективний при достатньому контрасті між об'єктом та фоном, однак значно втрачає точність при нерівномірному освітленні та низькому контрасті, характерному для цитологічних зображень. Метод вододілу (watershed) базується на топографічній інтерпретації градієнтного зображення і дозволяє розділяти дотичні об'єкти, проте схильний до надлишкової сегментації. Активні контури використовують ітеративну деформацію кривої під впливом внутрішніх та зовнішніх енергій, забезпечуючи плавні межі об'єктів, але потребують вдалої ініціалізації та чутливі до локальних мінімумів [10, 12, 13].

*Методи на основі глибокого навчання.* Архітектура U-Net, запропонована Ronneberger et al. у 2015 році, стала фактичним стандартом для семантичної сегментації медичних зображень

завдяки ефективному енкодер-декодерному дизайну з пропусковими з'єднаннями, що дозволяє зберігати просторову інформацію на різних масштабах. Варіанти U-Net (U-Net++, Attention U-Net, U<sup>2</sup>-Net) демонструють стабільну продуктивність при роботі з невеликими наборами даних, типовими для медичної візуалізації, досягаючи коефіцієнта Dice до 0,91–0,95 для сегментації ядер при достатній кількості навчальних зразків [12–14].

Mask R-CNN, розроблена на базі Faster R-CNN, є архітектурою інстансної сегментації, яка одночасно виконує детекцію, класифікацію та попиксельну сегментацію кожного об'єкта окремо. Дослідження Rettenberger et al. (2023) показало, що Mask R-CNN перевершує U-Net саме при сегментації перекриваючих клітин, що робить її особливо перспективною для цитологічних застосувань [15]. Спеціалізовані архітектури, такі як HoVer-Net (визначення меж через передбачення горизонтальних та вертикальних карт відстаней), StarDist (апроксимація об'єктів зірчастопуклими полігонами) та Cellpose (градієнтне поле потоку для визначення належності пікселів), розроблені саме для задач клітинної сегментації та демонструють конкурентні результати на різноманітних типах мікроскопічних зображень [12, 16].

*Проблема перекриття (злипання) клітин.* Перекриття клітин є однією з найбільш складних задач у цитологічній сегментації, особливо актуальною для конвенційних мазків. За результатами змагань ISBI 2014/2015, навіть найкращі методи того часу демонстрували задовільну точність лише для кластерів з не більше ніж трьома клітинами та коефіцієнтом перекриття до 0,3 [10]. Сучасні підходи до розв'язання цієї задачі включають: використання інстансної сегментації (Mask R-CNN, що досягає DSC 0,92 на даних ISBI); мережі IRNet (Instance Relation Network), яка моделює відношення між перекриваючими екземплярами [17]; методи на основі shape priors, що використовують апріорні знання про форму клітин [18]; а також комбіновані підходи, що поєднують класичну обробку (маркерний watershed) з нейромережевою детекцією [12]. Порівняння класичних і сучасних методів сегментації цитологічних зображень наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння методів сегментації цитологічних зображень

Метод	Тип	Dice/DSC	IoU	Задача	Обмеження	Джерело
Otsu thresholding	Класичний	0,70–0,80	0,55–0,68	Ядра	Чутливість до освітлення, не розділяє кластери	[10, 13]
Watershed	Класичний	0,75–0,85	0,60–0,74	Ядра, клітини	Надлишкова сегментація	[10, 12]
Active contours	Класичний	0,78–0,87	0,65–0,77	Цитоплазма	Потребує ініціалізації, повільний	[10, 12]
U-Net	DL (семант.)	0,91–0,95	0,84–0,91	Ядра, клітини	Не розділяє перекриваючі екземпляри	[12–14]
U-Net++	DL (семант.)	0,92–0,96	0,85–0,92	Ядра	Аналогічно U-Net щодо інстансів	[12–14]
Mask R-CNN	DL (інстансна)	0,88–0,92	0,79–0,86	Клітини, ядра	Потребує більше даних, повільніший	[15]
Cellpose	DL (інстансна)	0,85–0,91	0,75–0,84	Клітини (різні типи)	Узагальнена модель, не спеціалізована	[16]
StarDist	DL (інстансна)	0,83–0,90	0,72–0,82	Ядра (зірчasto-опуклі)	Обмеження на форму об'єктів	[12]
HoVer-Net	DL (інстансна)	0,86–0,93	0,77–0,87	Ядра + класифікація	Складна архітектура, ресурсоємний	[12]

*Комп'ютерна морфометрія.* Після сегментації клітин виконується кількісне визначення їх геометричних параметрів, що є основою для подальшої класифікації. Основними морфометричними ознаками є: площа ядра та цитоплазми; периметр ядра; співвідношення

ядро/цитоплазма (N/C ratio), яке є одним із ключових критеріїв малігнізації; еліптичність (відхилення форми ядра від кола); текстурні характеристики хроматину (ентропія, однорідність за Haralick); а також інтенсивність та розподіл фарбування [5, 18]. Точність визначення цих параметрів безпосередньо залежить від якості попередньої сегментації, що підкреслює критичну роль цього етапу в загальному аналізі.

*Класичні методи машинного навчання.* До появи глибокого навчання класифікація цитологічних зображень базувалася на попередньому виділенні ручних ознак з подальшою класифікацією за допомогою алгоритмів машинного навчання. Серед найбільш ефективних класифікаторів цього покоління – метод опорних векторів (SVM), який демонстрував точність 85–95% на різних датасетах завдяки здатності працювати у високорозмірних просторах ознак; випадковий ліс (Random Forest), стійкий до перенавчання та здатний оцінювати важливість ознак; а також метод k-найближчих сусідів (k-NN), простий в реалізації, але чутливий до вибору метрики та розмірності [18, 19]. Типові набори ознак включали текстурні дескриптори (матриця суміжності Haralick, Local Binary Patterns), геометричні параметри клітин та ядер, а також колірні гістограми у просторах RGB та HSV.

*Глибоке навчання для класифікації.* Згорткові нейронні мережі (CNN) суттєво змінили підхід до класифікації цитологічних зображень, усунувши необхідність ручного виділення ознак. Глибокі архітектури автоматично навчаються ієрархічним представленням зображень – від низькорівневих (краї, текстури) до високорівневих (морфологічні патерни клітин) [18, 19]. Серед найбільш ефективних архітектур для класифікації цитологічних зображень:

ResNet (Residual Network) – використовує залишкові з'єднання (skip connections), що дозволяє навчати дуже глибокі мережі (50–152 шари) без деградації градієнтів. На датасеті SIPaKMeD ResNet-50 досягає точності 95–98% при класифікації 5 класів цервікальних клітин [18, 19, 26].

VGG-16/VGG-19 – класичні глибокі мережі з послідовною архітектурою, що часто використовуються як попередньо навчені екстрактори ознак (transfer learning) для цитологічних задач [18].

EfficientNet – сімейство мереж, оптимізованих за балансом глибини, ширини та роздільної здатності, що демонструє конкурентну точність при значно меншій кількості параметрів [19].

Vision Transformers (ViT) – архітектура, що базується на механізмі самоуваги (self-attention) і дозволяє моделювати глобальні залежності в зображенні. Однак ViT потребує значно більшого обсягу навчальних даних порівняно з CNN і, за результатами досліджень на цитологічних даних, демонструє нижчу точність при обмежених наборах (Dice 0,58 проти 0,67 для U-Net на датасеті HRASPP) [13].

*Класифікація на рівні клітини та на рівні слайда.* Задачу класифікації цитологічних зображень можна розглядати на двох рівнях. Класифікація на рівні клітини (cell-level) передбачає попередню сегментацію та класифікацію кожної клітини окремо. Класифікація на рівні слайда (slide-level або whole-slide image classification) присвоює діагностичну категорію всьому препарату, що більш наближено до реального клінічного робочого процесу [18, 19]. Сучасні end-to-end підходи, зокрема на базі множинного навчання (Multiple Instance Learning, MIL), дозволяють навчати моделі slide-level класифікації без детальної поклітинної анотації, використовуючи лише слабкі мітки на рівні слайда [21]. Узагальнене порівняння методів класифікації цитологічних зображень наведено в табл. 3.

*Ключові проблеми класифікації.* Незважаючи на високі показники точності, продемонстровані на стандартних датасетах, впровадження алгоритмів класифікації в реальну клінічну практику стикається з низкою серйозних проблем.

**Таблиця 3 – Порівняння методів класифікації цитологічних зображень**

Метод/Архітектура	Датасет	Патологія	Accuracy	Sensitivity	AUC	Рік	Джерело
SVM + Haralick	Herlev	Церв. цитологія	92,4%	89,1%	0,94	2019	[18]
Random Forest + LBP	SIPaKMeD	Церв. цитологія	90,5%	87,3%	0,93	2020	[18]
ResNet-50	SIPaKMeD	Церв. цитологія	97,5%	96,8%	0,99	2021	[18, 19]
VGG-16 (transfer)	Herlev	Церв. цитологія	94,8%	92,1%	0,97	2020	[18]
EfficientNet-B3	SIPaKMeD	Церв. цитологія	98,1%	97,4%	0,99	2022	[18, 19]
DeepCervix (гібрид)	SIPaKMeD + Herlev	Церв. цитологія	99,0%	98,7%	0,99	2021	[19]
ViT (Vision Transf.)	SIPaKMeD	Церв. цитологія	95,2%	93,8%	0,98	2023	[13]
Cytologist-in-Loop AI	Клінічний (8000 WSI)	Церв. скринінг	–	81,6%	–	2024	[23]

По-перше, відкриті датасети є відносно невеликими та незбалансованими: патологічні класи зазвичай представлені значно меншою кількістю зразків порівняно з нормальними, що призводить до зміщення класифікатора [18, 19]. По-друге, відсутність стандартизованої розмітки – різні експерти можуть по-різному класифікувати одну й ту ж клітину, а міжекспертна узгодженість при оцінці помірних дисплазій (LSIL/ASC-US) є особливо низькою [5]. По-третє, доменний зсув (domain shift) між лабораторіями, зумовлений відмінностями в обладнанні, протоколах фарбування та підготовки препаратів, призводить до значного зниження точності моделей при застосуванні до даних з нових джерел. Дослідження показують, що метрики на приватних (інституціональних) датасетах часто суттєво нижчі, ніж на публічних: наприклад, DSC найкращої моделі може суттєво знижуватися при застосуванні до даних з нових джерел [18, 22].

## ВИСНОВКИ

Аналіз сучасних методів і біотехнічних систем для діагностики онкопатологій за цитологічними зображеннями свідчить про значний прогрес у цій галузі, особливо завдяки впровадженню технологій глибокого навчання. Комерційні CAD-системи нового покоління, зокрема Genius Digital Diagnostics System, демонструють клінічно значущу ефективність і поступово впроваджуються у лабораторну практику. Архітектури глибокого навчання (U-Net та її модифікації, Mask R-CNN, спеціалізовані мережі для сегментації клітин) значно перевершують класичні методи обробки зображень за точністю та стійкістю.

Водночас аналіз виявив низку суттєвих невирішених проблем, що обмежують впровадження автоматизованих систем у клінічну практику. Задача інстансної сегментації перекриваючих клітин залишається складною: сучасні методи забезпечують прийнятну точність лише при помірному перекритті та невеликих кластерах, тоді як реальні препарати часто мають складніші конфігурації. Доменний зсув між лабораторіями є серйозним бар'єром для впровадження, оскільки моделі, навчені на даних однієї установи, значно втрачають точність на зразках з інших джерел. Також розвиток стримують обмеженість і незбалансованість відкритих датасетів, відсутність стандартизованого протоколу анотації та дефіцит анотованих зразків для рідкісних патологій.

Особливо актуальною є проблема автоматизованого аналізу для окремих нозологій, зокрема гінекологічної цитології. Потреба в ефективному скринінгу раку шийки матки є критичною для України через високу частку пізніх стадій діагностики та обмежене охоплення скринінговими програмами. Розробка біотехнічної системи, що поєднує модифікований метод інстансної сегментації клітин, автоматичну класифікацію за морфологічними ознаками та стійкість до доменного зсуву, є актуальним науковим і практичним завданням біомедицинської інженерії.

Отже, подальші дослідження слід зосередити на розробці удосконаленого методу інстансної сегментації для ефективного розділення кластерів перекриваючих клітин, створенні класифікатора для конкретних нозологій на реальних клінічних зразках, а також розробці інтегрованої біотехнічної системи візуалізації та аналізу для цитологічних лабораторій.

### Список використаних джерел

1. Bray F., Laversanne M., Sung H. et al. Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*. 2024. Vol. 74, no. 3. P. 229-263. DOI: <https://doi.org/10.3322/caac.21834>.
2. Filho A. M., Laversanne M., Ferlay J. et al. The GLOBOCAN 2022 cancer estimates: Data sources, methods, and a snapshot of the cancer burden worldwide. *International Journal of Cancer*. 2025. Vol. 156, no. 7. P. 1336-1346. DOI: <https://doi.org/10.1002/ijc.35278>.
3. Ryzhov A., Bray F., Ferlay J. et al. Recent cancer incidence trends in Ukraine and short-term predictions to 2022. *Cancer Epidemiology*. 2020. Vol. 65. Article 101663. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.canep.2019.101663>.
4. National Cancer Registry of Ukraine. The oncoepidemiological situation and the state of cancer care organization in Ukraine in 2022-2023. *Cancer in Ukraine, 2022-2023: Bulletin of National Cancer Registry of Ukraine*. Kyiv, 2023. Vol. 25. P. 7-29.
5. Nayar R., Wilbur D. C., eds. *The Bethesda System for Reporting Cervical Cytology: Definitions, Criteria, and Explanatory Notes*. 3rd ed. Cham: Springer, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-11074-5>.
6. Murphy K. M., Weatherhead K., Chenault C. et al. Impact of the Genius Digital Diagnostics System on workflow and accuracy compared with the ThinPrep Imaging System for review of ThinPrep Papanicolaou tests. *American Journal of Clinical Pathology*. 2025. Vol. 164, no. 5. P. 746-751. DOI: <https://doi.org/10.1093/ajcp/aqaf099>.
7. Thrall M. J. Automated screening of Papanicolaou tests: a review of the literature. *Diagnostic Cytopathology*. 2019. Vol. 47, no. 1. P. 20-27. DOI: <https://doi.org/10.1002/dc.23931>.
8. Ikenberg H., Lieder S., Ahr A. et al. Comparison of the Hologic Genius Digital Diagnostics System with the ThinPrep Imaging System - a retrospective assessment. *Cancer Cytopathology*. 2023. Vol. 131, no. 7. P. 424-432. DOI: <https://doi.org/10.1002/cncy.22695>.
9. Cantley R. L. et al. Validation of AI-assisted ThinPrep Pap test screening using the Genius Digital Diagnostics System. *Journal of Pathology Informatics*. 2024. Vol. 15. Article 100391. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jpi.2024.100391>.
10. Lu Z., Carneiro G., Bradley A. P. et al. Evaluation of three algorithms for the segmentation of overlapping cervical cells. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*. 2017. Vol. 21, no. 2. P. 441-450. DOI: <https://doi.org/10.1109/JBHI.2016.2519686>.
11. Wan T., Xu S., Sang C. et al. Accurate segmentation of overlapping cells in cervical cytology with deep convolutional neural networks. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 365. P. 157-170. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2019.06.086>.

12. Krikid F., Rositi H., Vacavant A. State-of-the-art deep learning methods for microscopic image segmentation: applications to cells, nuclei, and tissues. *Journal of Imaging*. 2024. Vol. 10, no. 12. Art. 311. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging10120311>.
13. Rasheed A. et al. Techniques and challenges for nuclei segmentation in cervical smear images: a review. *Artificial Intelligence Review*. 2025. Vol. 58. Art. 299. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-025-11207-9>.
14. Ji J., Zhang W., Dong Y. et al. Automated cervical cell segmentation using deep ensemble learning. *BMC Medical Imaging*. 2023. Vol. 23. Art. 137. DOI: <https://doi.org/10.1186/s12880-023-01096-1>.
15. Rettenberger L., Münke F. R., Bruch R., Reischl M. Mask R-CNN outperforms U-Net in instance segmentation for overlapping cells. *Current Directions in Biomedical Engineering*. 2023. Vol. 9, no. 1. P. 335-338. DOI: <https://doi.org/10.1515/cdbme-2023-1084>.
16. Stringer C. et al. Cellpose: a generalist algorithm for cellular segmentation. *Nature Methods*. 2021. Vol. 18. P. 100-106. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41592-020-01018-x>.
17. Zhou Y. et al. IRNet: Instance Relation Network for Overlapping Cervical Cell Segmentation. In: *Medical Image Computing and Computer Assisted Intervention - MICCAI 2019*. 2019. P. 640-648. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-030-32239-7\\_71](https://doi.org/10.1007/978-3-030-32239-7_71).
18. Jiang P., Li X., Shen H. A systematic review of deep learning-based cervical cytology screening: from cell identification to whole slide image analysis. *Artificial Intelligence Review*. 2023. Vol. 56. P. 2687-2758. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10462-023-10588-z>.
19. Fang M., Liao B., Lei X. et al. A systematic review on deep learning based methods for cervical cell image analysis. *Neurocomputing*. 2024. Vol. 610. Article 128630. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2024.128630>.
20. Dosovitskiy A. et al. An image is worth 16x16 words: Transformers for image recognition at scale. In: *International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2021.
21. Campanella G. et al. Clinical-grade computational pathology using weakly supervised deep learning on whole slide images. *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25. P. 1301-1309. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41591-019-0508-1>.
22. Mosquera-Zamudio A., Cancino S., Cárdenas-Montoya G. et al. Deep-learning approaches for cervical cytology nuclei segmentation in whole slide images. *Journal of Imaging*. 2025. Vol. 11, no. 5. Art. 137. DOI: <https://doi.org/10.3390/jimaging11050137>.
23. Wang J. et al. Artificial intelligence enables precision diagnosis of cervical cytology grades and cervical cancer. *Nature Communications*. 2024. Vol. 15. Art. 4369. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-024-48705-3>.
24. Volodko N., Chopyak V., Mazur Y. Barriers to implementing cervical cancer screening in Ukraine: the path forward. *Proceeding of the Shevchenko Scientific Society. Medical Sciences*. 2025. Vol. 77, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.25040/ntsh2025.01.01>.
25. Murphy D. B., Davidson M. W. *Fundamentals of Light Microscopy and Electronic Imaging*. 2nd ed. Hoboken, NJ: Wiley-Blackwell, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1002/9781118382905>.
26. Plissiti M. E. et al. SIPaKMeD: A new dataset for feature and image based classification of normal and pathological cervical cells in Pap smear images. In: *2018 25th IEEE International Conference on Image Processing (ICIP)*. 2018. P. 3144-3148. DOI: <https://doi.org/10.1109/ICIP.2018.8451588>.
27. Jantzen J., Norup J., Dounias G., Bjerregaard B. Pap-smear Benchmark Data for Pattern Classification. In: *Proc. NiSIS 2005: Nature Inspired Smart Information Systems (NiSIS), EU Co-ordination Action*. Albufeira, Portugal: NiSIS, 2005. P. 1-9.

28. Rezende M. T. et al. CRIC searchable image database as a public platform for conventional Pap smear cytology data. *Scientific Data*. 2021. Vol. 8, no. 1. Art. 151. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00933-8>.

29. Liu G. et al. Cx22: A new publicly available dataset for deep learning-based segmentation of cervical cytology images. *Computers in Biology and Medicine*. 2022. Vol. 150. Article 106194. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compbiomed.2022.106194>.

**Leshchenko V. O., Zabolotna N. I.**

## ANALYSIS OF MODERN METHODS AND BIOTECHNICAL SYSTEMS FOR DIAGNOSING ONCOPATHOLOGIES USING CYTOLOGICAL IMAGES

*The article presents a comprehensive analysis of modern methods and biotechnical systems for automated diagnostics of oncopathologies based on cytological images. The relevance of the study is driven by the growing global cancer burden – according to GLOBOCAN 2022 estimates, approximately 20 million new cancer cases are registered annually, while in Ukraine over 38% of cases are diagnosed at advanced stages, highlighting the urgent need for effective early screening tools. The aim of this work is to systematically analyze the current state of computer-aided cytological image analysis methods, identify key unresolved challenges, and substantiate directions for further research in biomedical engineering. The medical and technical aspects of cytological image acquisition are examined, including microscopy types, specimen preparation techniques, and characteristic artifacts. Commercial CAD systems for cervical cytology are analyzed, namely ThinPrep Imaging System, BD FocalPoint GS, and Genius Digital Diagnostics System, along with major publicly available datasets (SIPaKMeD, Herlev, ISBI 2014/2015, CRIC, Cx22). A comparative analysis of classical cell segmentation methods (Otsu thresholding, watershed transform, active contours) and deep learning architectures (U-Net, Mask R-CNN, Cellpose, StarDist, HoVer-Net) is performed, demonstrating a substantial advantage of neural network approaches in terms of accuracy and robustness. Classification methods are investigated, ranging from classical machine learning algorithms (SVM, Random Forest) to modern deep neural networks (ResNet, EfficientNet, Vision Transformers). Three key unresolved problems are identified: insufficient accuracy of instance segmentation for overlapping cells in real clinical specimens, significant domain shift between laboratories leading to substantial degradation of trained model performance, and the limited size and class imbalance of available open datasets. The direction for further research is substantiated, aimed at developing a biotechnical system that would combine a modified instance segmentation method with automatic morphological feature-based classification and ensure robustness to domain shift for the purposes of early oncopathology diagnostics.*

**Keywords:** *cytological images, computer-aided diagnosis, cell segmentation, neural networks, CAD systems, oncopathology, biotechnical system.*

*Стаття надійшла 09.04.2026*

*Стаття прийнята 11.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## СТРУКТУРНО-АЛГОРИТМІЧНИЙ МЕТОД АНАЛІЗУ ЕКГ-СИГНАЛІВ ДЛЯ РАНЬОГО ВИЯВЛЕННЯ АРИТМІЇ НА ОСНОВІ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

У роботі розроблено структурно-алгоритмічний метод аналізу електрокардіографічних сигналів для ранньої діагностики аритмій на основі методів машинного навчання. Запропонований підхід орієнтований на підвищення надійності автоматизованого аналізу ЕКГ у біотехнічних системах медичного призначення та враховує особливості реєстрації реальних сигналів, зокрема наявність шумів, артефактів та міжіндивідуальної мінливості параметрів серцевої діяльності. В рамках дослідження розроблено багаторівневий комплекс попередньої обробки сигналів, який включає адаптивну фільтрацію компенсації, дрейф ізолінії, придушення мережевого шуму та зменшення впливу високочастотного шуму. Це дозволило забезпечити належну якість вхідних даних для подальшого аналізу та підвищити стабільність алгоритмів. Було застосовано алгоритм розпізнавання комплексу QRS, а також процедури вибору інформативних часових, частотних та морфологічних ознак, які найповніше характеризують стан серцевого ритму та можуть бути використані для виявлення патологічних змін. На основі отриманих результатів побудовано структурну модель системи біотехнічного аналізу ЕКГ, яка відображає послідовність основних етапів обробки сигналу: від реєстрації та попередньої фільтрації до класифікації та формування діагностичного висновку. Було проведено порівняльний аналіз ефективності класифікації аритмій за допомогою алгоритмів Random Forest, Support Vector Machine та багатозарової нейронної мережі. За результатами моделювання було виявлено, що найкращу продуктивність продемонструвала багатозарова нейронна мережа, для якої точність класифікації досягла 96,8%. Запропонований метод забезпечує підвищену стійкість системи до шуму, артефактів та індивідуальних варіацій сигналу, що свідчить про його практичну придатність для використання в системах раннього виявлення аритмій та підтримки прийняття діагностичних рішень.

**Ключові слова:** електрокардіограма, аритмія, машинне навчання, цифрова фільтрація, QRS-комплекс, біотехнічна система.

**Постановка проблеми.** Серцево-судинні захворювання залишаються провідною причиною смерті у світі, а значна частина ускладнень пов'язана з порушеннями серцевого ритму. Рання діагностика аритмій має критично важливе значення для зниження ризику серйозних наслідків, включаючи раптову серцеву смерть.

Електрокардіографія є основним неінвазивним методом оцінки електричної активності серця. Автоматизований аналіз ЕКГ дозволяє підвищити точність діагностики, мінімізувати суб'єктивний фактор та забезпечити тривале спостереження за пацієнтом. Основними етапами комп'ютерної обробки є попередня фільтрація сигналу, виявлення комплексу QRS та вилучення інформативних ознак.

Разом з тим реальні ЕКГ-сигнали містять мережеві завади, дрейф ізолінії та артефакти руху, що знижує ефективність традиційних алгоритмів обробки. Перспективним напрямом є застосування методів машинного навчання, які забезпечують багатовимірний аналіз ознак та підвищують точність класифікації аритмій. Однак ефективність таких підходів значною мірою

залежить від якості попередньої обробки сигналу та структури формованого вектора ознак [1-5].

У зв'язку з цим актуальною є розробка структурно-алгоритмічного методу аналізу ЕКГ-сигналів, який поєднує стійку до перешкод фільтрацію, комплексне вилучення часових, частотних та морфологічних ознак, а також оптимізовану систему класифікації на основі машинного навчання.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Сучасні підходи до автоматизованого аналізу електрокардіографічних сигналів базуються на поєднанні методів цифрової обробки сигналів та алгоритмів інтелектуального аналізу даних. Залежно від рівня складності та обчислювальних ресурсів системи застосовуються різні концепції побудови алгоритмів.

Класичні методи цифрової обробки сигналів передбачають використання смугових та режекторних фільтрів для придушення шумів, алгоритмів детекції QRS-комплексів на основі диференціювання, інтегрування та порогової обробки, а також аналізу часових інтервалів (RR, QT, QRS). Такі методи характеризуються простотою реалізації та можливістю використання у системах реального часу. Проте вони часто використовують фіксовані порогові значення та демонструють зниження точності при значних завадах або зміні морфології сигналу [6].

Вейвлет-перетворення застосовується для багатомасштабного аналізу ЕКГ як нестационарного сигналу. Воно дозволяє одночасно досліджувати часові та частотні характеристики, що підвищує точність виділення QRS-комплексів і патологічних змін. Незважаючи на високу інформативність, ефективність методу залежить від вибору базисної функції та рівня декомпозиції, що ускладнює універсалізацію алгоритму.

Методи глибокого навчання забезпечують автоматичне формування інформативних ознак без явного їх задання. Згорткові нейронні мережі здатні досягати високої точності класифікації аритмій при використанні великих навчальних вибірок. Разом із тим такі моделі характеризуються значною обчислювальною складністю, потребують значних ресурсів пам'яті та не завжди придатні для реалізації у вбудованих біотехнічних системах.

Гібридні системи поєднують попередню цифрову обробку сигналу з подальшою класифікацією на основі методів машинного навчання (SVM, Random Forest, нейронні мережі). Такий підхід дозволяє зменшити розмірність простору ознак, підвищити стійкість до шумів та покращити узагальнювальну здатність системи [7].

Незалежно від обраної концепції, автоматизований аналіз ЕКГ зазвичай включає такі основні етапи: попередню обробку сигналу (фільтрація, нормалізація, компенсація дрейфу ізолінії), детекцію QRS-комплексів, виділення інформативних часових, частотних та морфологічних ознак та класифікацію серцевих ритмів.

Аналіз існуючих рішень показує, що вони мають низку суттєвих обмежень. По-перше, алгоритми залишаються чутливими до мережових завад (50 Гц) та артефактів руху. По-друге, багато моделей недостатньо адаптовані до індивідуальних особливостей морфології ЕКГ різних пацієнтів. По-третє, спостерігається обмежена узагальнювальна здатність моделей при зміні умов реєстрації сигналу або використанні інших баз даних [8].

**Мета дослідження.** Розробка структурно-алгоритмічного методу аналізу ЕКГ-сигналів для раннього виявлення аритмій, який забезпечує:

- підвищену завадостійкість за рахунок адаптивної попередньої обробки сигналу;
- комплексне виділення інформативних часових, частотних та морфологічних ознак;
- оптимізовану структуру класифікації на основі методів машинного навчання;
- можливість інтеграції алгоритму у біотехнічні системи кардіомоніторингу та портативні діагностичні пристрої.

Таким чином, подальші дослідження спрямовані на формування узгодженої структури алгоритму, що поєднує ефективну цифрову фільтрацію, надійну детекцію QRS-комплексів та адаптивну систему класифікації аритмій із високою точністю та стійкістю до завад.

**Основний матеріал дослідження.** Розроблена біотехнічна система аналізу електрокардіографічних сигналів має ієрархічну структуру, що поєднує апаратні та програмні модулі. Її функціональна схема включає блок реєстрації сигналу, аналого-цифрове перетворення, цифрову обробку, виділення ознак та модуль класифікації. Реєстрація біопотенціалів здійснюється за допомогою стандартної електродної системи з інструментальним підсилювачем високого коефіцієнта придушення синфазної складової (CMRR > 100 дБ) [9]. Основні вимоги:

- вхідний імпеданс  $\geq 10$  МОм;
- коефіцієнт підсилення 500–1000;
- смуга пропускання 0,05–100 Гц.

Дискретизація виконується з частотою:

$$f_s = 250 - 500 \text{ Гц}$$

що задовольняє теорему Найквіста для спектра ЕКГ. Розрядність АЦП – 12–16 біт.

Вхідний сигнал можна представити у вигляді:

$$x(t) = s(t) + n_{PL}(t) + n_{BW}(t) + n_{EMG}(t)$$

де

$s(t)$  – корисний сигнал;

$n_{PL}(t)$  – мережева завада;

$n_{BW}(t)$  – дрейф ізоляції;

$n_{EMG}(t)$  – міографічні шуми.

Після фільтрації:

$$x_f(t) = x(t) - n_{PL}(t) + n_{BW}(t)$$

Фільтр високих частот (видалення дрейфу)

Передаточна функція цифрового фільтра першого порядку:

$$H_{HP}(z) = \frac{1 - z^{-1}}{1 - \alpha z^{-1}},$$

де

$$\alpha = e^{-2\pi f_c/f_s},$$

$f_c = 0,5$  Гц – гранична частота

Дискретне рівняння:

$$y[n] = x[n] - x[n - 1] + \alpha y[n - 1]$$

Режекторний фільтр 50 Гц

Передаточна функція:

$$H_{notch}(z) = \frac{1 - 2 \cos(\omega_0) z^{-1} + z^{-2}}{1 - 2r \cos(\omega_0) z^{-1} + r^2 z^{-2}},$$

Де

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot 50}{f_s},$$

$r \approx 0,95 - 0,98$  – коефіцієнт ширини смуги

Смуговий фільтр (0,5–40 Гц)

Передаточна функція реалізується як послідовне з'єднання:

$$H_{BP}(z) = H_{HP}(z) \cdot H_{LP}(z),$$

де  $H_{LP}(z)$  – фільтр низьких частот із граничною частотою 40 Гц [10,11].

Модифікований алгоритм детекції QRS

Оброблений сигнал подається на блок детекції QRS-комплексів.

Диференціювання

$$y_1[n] = x_f[n] - x_f[n - 1],$$

Квадратування

$$y_2[n] = (y_1[n])^2,$$

Інтегрування ковзним вікном

$$y_3[n] = \frac{1}{N} \sum_{k=0}^{N-1} y_2[n - k],$$

де  $N = 0,15f_s$

Адаптивна порогова детекція

Порогове значення:

$$T[n] = \beta \cdot \text{mean}(y_3[n]),$$

Де  $\beta = 0,5 - 0,7$

RR-інтервал:

$$RR_i = t_{R(i)} - t_{R(i-1)},$$

Інтеграція у біотехнічну систему

Розроблений алгоритм може бути реалізований:

- у мікроконтролерах ARM Cortex-M;
- у системах на кристалі (SoC);
- у FPGA-платформах для паралельної обробки;
- у портативних кардіомоніторах [12].

Ефективність автоматизованого виявлення аритмій безпосередньо залежить від якості сформованого простору ознак. Оскільки електрокардіографічний сигнал є складним нестационарним біомедичним процесом, жодна окрема група параметрів не може повністю відобразити всі патологічні зміни. Тому доцільним є комплексний підхід, що поєднує часові, частотні та морфологічні характеристики. Такий підхід дозволяє сформувавши багатовимірний простір ознак, який описує як динаміку серцевого ритму, так і геометричні особливості електрокардіограми [13, 14].

Часові ознаки є базовими показниками варіабельності серцевого ритму (HRV) та відображають стан автономної регуляції серця.

RR-інтервал

$$RR_i = t_{R(i)} - t_{R(i-1)}$$

Аналіз послідовності  $RR_i$  дозволяє виявити як регулярні, так і хаотичні зміни ритму, характерні для екстрасистолії або фібриляції передсердь.

Середнє значення RR

$$\overline{RR} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N RR_i$$

Цей параметр пов'язаний із середньою частотою серцевих скорочень:

$$HR = \frac{60}{\overline{RR}}$$

SDNN

$$SDNN = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N (RR_i - \overline{RR})^2}$$

SDNN відображає загальну варіабельність серцевого ритму.

RMSSD

$$RMSSD = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (RR_{i+1} - RR_i)^2}$$

Показник характеризує короткочасні коливання ритму та є чутливим до парасимпатичної активності.

QT-інтервал

$$QT = t_{T_{end}} - t_{Q_{start}}$$

Подовження QT може свідчити про ризик розвитку шлуночкових тахіаритмій.

Тривалість QRS

$$QRS = t_{S_{end}} - t_{Q_{start}}$$

Збільшення тривалості QRS пов'язане з порушенням внутрішньошлуночкової провідності [15].

Частотний аналіз дозволяє оцінити розподіл енергії сигналу у спектральній області. Для цього використовується дискретне перетворення Фур'є.

$$X(f) = \sum_{n=0}^{N-1} RR[n] e^{-\frac{j2\pi f n}{N}},$$

$$PSD(f) = |X(f)|^2.$$

Інтегральні характеристики:

$$PSD_{LF} = \int_{0.04}^{0.15} PSD(f) df,$$

$$PSD_{HF} = \int_{0.15}^{0.4} PSD(f) df.$$

Співвідношення:

$$K_{LF/HF} = \frac{PSD_{LF}}{PSD_{HF}}$$

є індикатором балансу симпатичної та парасимпатичної регуляції.

Частотні параметри особливо інформативні при оцінці функціонального стану пацієнтів із вегетативними порушеннями.

Морфологічні ознаки характеризують форму та амплітуду комплексу QRS, що відображає електричну активність шлуночків.

Амплітуда R

$$AR = \max(x_f[n])$$

Співвідношення R/S

$$K_{RS} = \frac{A_R}{|A_S|}$$

Площа під QRS

$$S_{QRS} = \sum_{t_{Qstart}}^{t_{Qend}} |x_f[n]|$$

Для підвищення інформативності можуть використовуватися асиметрія комплексу QRS, крутизна фронту R-піку, коефіцієнт кореляції поточного комплексу з еталонним шаблоном.

Морфологічні характеристики є особливо важливими для виявлення блокад та екстрасистол [16, 17].

Нехай множина ознак:

$$F \in R^m$$

Необхідно побудувати відображення:

$$f: R \rightarrow \{C_1, C_2, \dots, C_k\}$$

Оптимальні параметри моделі визначаються з умови мінімізації функції втрат:

$$\theta^* = \arg \min L(y, f(F; \theta))$$

У випадку багатосарової нейронної мережі:

$$f(F) = \sigma(W_2 \sigma(W_1 F + b_1) + b_2).$$

Комплексне формування простору ознак забезпечує багатовимірний опис сигналу, підвищену чутливість до ранніх змін ритму, зменшення впливу окремих шумових компонентів та підвищення стабільності класифікатора.

Таким чином, запропонований підхід створює формалізовану основу для побудови інтелектуальної системи раннього виявлення аритмій як частини біотехнічного комплексу [18]. Ефективність запропонованого структурно-алгоритмічного методу оцінювалася за допомогою відкритої бази даних MIT-BIH Arrhythmia Database, яка є стандартом для тестування алгоритмів автоматизованого аналізу ЕКГ. База даних містить анотовані записи різних типів аритмій, що дозволяє коректно навчати та тестувати моделі класифікації.

Для оцінювання якості класифікації використовувалися такі метрики:

Точність (Accuracy)

$$Acc = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN}$$

Чутливість (Sensitivity)

$$Se = \frac{TP}{TP + FN}$$

Специфічність (Specificity)

$$Sp = \frac{TN}{TN + FP}$$

Де

TP – істинно позитивні результати,

TN – істинно негативні,

FP – хибнопозитивні,

FN – хибнонегативні.

У межах дослідження було протестовано три алгоритми машинного навчання:

- Support Vector Machine (SVM);
- Random Forest (RF);
- Багатошарова нейронна мережа (MLP).

Отримані результати наведено у таблиці.

Таблиця 1 – Алгоритми машинного навчання

Метод	Точність	Чутливість	Специфічність
SVM	94,2%	92,8 %	95,1 %
RF	95,6%	94,3 %	96,0 %
MLP	96,8%	95,7 %	97,2 %

Найвищі показники продемонструвала модель MLP, що свідчить про ефективність нелінійного відображення у багатовимірному просторі ознак. Порівняно з SVM, точність зросла на 2,6 %, що є суттєвим при задачах медичної діагностики [19, 20].

Отримані результати підтверджують доцільність комплексного формування простору ознак. Підвищення точності класифікації пояснюється:

- використанням багатогрупового набору ознак (часових, частотних та морфологічних);
- адаптивною попередньою фільтрацією сигналу;
- стабільною детекцією R-піків;
- нормалізацією та оптимізацією структури вектора параметрів.

Зниження шуму забезпечується послідовною цифровою обробкою, що мінімізує накопичення помилок до етапу класифікації. Підвищена стабільність виявлення R-піків безпосередньо вплинула на точність розрахунку RR-інтервалів та показників варіабельності ритму. Комплексна оцінка морфологічних змін дозволила покращити роздільну здатність між класами аритмій, особливо при екстрасистолії та порушеннях провідності.

Запропонований метод демонструє високу здатність до узагальнення при роботі з різними типами сигналів у базі даних МІТ-ВІН. Завдяки використанню нормалізації та багатовимірного простору ознак зменшується залежність від індивідуальної морфології пацієнта. Алгоритм має лінійну обчислювальну складність та не потребує надмірних ресурсів,

що дозволяє його впроваджувати в портативні кардіомонітори, телемедичні системи та вбудовані біотехнічні комплекси.

Таким чином, результати моделювання підтверджують ефективність запропонованого структурно-алгоритмічного методу раннього виявлення аритмій та його придатність для практичної інтеграції в системи кардіомоніторингу.

## ВИСНОВКИ

У результаті виконаного дослідження розроблено структурно-алгоритмічний метод аналізу електрокардіографічних сигналів для раннього виявлення аритмій, який поєднує завадостійку цифрову обробку сигналу, стабільну детекцію QRS-комплексів та багатовимірну систему класифікації на основі методів машинного навчання.

Запропоновано комплексну систему формування інформативного простору ознак, що включає часові показники варіабельності серцевого ритму, частотні характеристики спектральної щільності потужності та морфологічні параметри комплексу QRS. Поєднання декількох груп ознак дозволило підвищити діагностичну інформативність моделі та забезпечити стійкість до шумів і міжіндивідуальної варіабельності сигналу.

За результатами моделювання з використанням бази MIT-BIH Arrhythmia Database досягнуто точності класифікації до 96,8 %, при чутливості 95,7 % та специфічності 97,2 % для багатошарової нейронної мережі. Отримані показники підтверджують ефективність запропонованого підходу та його конкурентоспроможність порівняно з класичними методами (SVM, Random Forest).

Розроблений метод характеризується лінійною обчислювальною складністю та не потребує значних апаратних ресурсів, що забезпечує можливість його реалізації у складі біотехнічних систем раннього виявлення аритмій, портативних кардіомоніторів та телемедичних комплексів. Запропонована структурна модель може бути адаптована до вбудованих мікропроцесорних платформ та інтегрована у системи дистанційного моніторингу пацієнтів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на розширення набору ознак, використання методів глибокого навчання з автоматичним виділенням характеристик сигналу, а також апробацію алгоритму на клінічних вибірках реальних пацієнтів з метою підвищення його діагностичної надійності та узагальнювальної здатності.

### *Список використаних джерел*

1. World Health Organization. Cardiovascular diseases (CVDs).
2. Moody G. B., Mark R. G. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database. IEEE Eng Med Biol, 2001.
3. Pan J., Tompkins W. A real-time QRS detection algorithm. IEEE Trans. Biomed. Eng., 1985.
4. Smisek R. et al. Adaptive filtering in ECG processing. Biomedical Signal Processing, 2013.
5. Rajpurkar P. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection with deep neural networks. Nature Medicine, 2019.
6. Тимчик С. В. Біотехнічна система для визначення і моніторингу стану здоров'я студентів // Оптико-електронні інформаційно-енергетичні технології. 2019. № 2. С. 62–70. URL: [oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/553](http://oeipt.vntu.edu.ua/index.php/oeipt/article/view/553) Daubechies I. Ten Lectures on Wavelets. SIAM, 1992.

7. Acharya U. R. et al. Deep convolutional neural network for automated detection of arrhythmia. *Information Sciences*, 2017.
8. Zhang Z. et al. ECG feature extraction and classification methods: a review. *IEEE Reviews in Biomedical Engineering*, 2020.
9. Pan J., Tompkins W. A real-time QRS detection algorithm // *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*. 1985. Vol. 32, No. 3. P. 230–236. DOI: 10.1109/TBME.1985.325532.
10. Proakis J. G., Manolakis D. G. *Digital Signal Processing: Principles, Algorithms, and Applications*. 4th ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2007. 1100 p.
11. Oppenheim A. V., Schaffer R. W. *Discrete-Time Signal Processing*. 3rd ed. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2010. 1120 p.
12. Widrow B., Stearns S. D. *Adaptive Signal Processing*. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1985. 474 p.
13. Rangayyan R. M. *Biomedical Signal Analysis: A Case-Study Approach*. 2nd ed. IEEE Press, 2015. 720 p. DOI: 10.1002/9780470459467.
14. Daubechies I. *Ten Lectures on Wavelets*. Philadelphia: SIAM, 1992. 357 p.
15. Clifford G. D., Azuaje F., McSharry P. *Advanced Methods and Tools for ECG Data Analysis*. Artech House, 2006. 338 p.
16. Moody G. B., Mark R. G. The impact of the MIT-BIH Arrhythmia Database // *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*. 2001. Vol. 20, No. 3. P. 45–50. DOI: 10.1109/51.932724.
17. Acharya U. R. et al. Automated detection of arrhythmias using different intervals of tachycardia ECG segments with convolutional neural network // *Information Sciences*. 2017. Vol. 405. P. 81–90. DOI: 10.1016/j.ins.2017.04.012.
18. Rajpurkar P. et al. Cardiologist-level arrhythmia detection with deep neural networks // *Nature Medicine*. 2019. Vol. 25. P. 65–69. DOI: 10.1038/s41591-018-0268-3.
19. Lyons R. G. *Understanding Digital Signal Processing*. 3rd ed. Prentice Hall, 2011. 992 p.

**Mateush V.S.**

## **STRUCTURAL-ALGORITHMIC METHOD FOR ECG SIGNAL ANALYSIS FOR EARLY ARRHYTHMIA DETECTION BASED ON MACHINE LEARNING**

*The study develops a structural-algorithmic method for the analysis of electrocardiographic signals aimed at the early diagnosis of arrhythmias based on machine learning methods. The proposed approach is focused on improving the reliability of automated ECG analysis in biomedical systems and takes into account the specific features of real signal acquisition, including the presence of noise, artifacts, and inter-individual variability in cardiac activity parameters. Within the framework of the research, a multilevel signal preprocessing complex was developed, encompassing adaptive filtering, baseline wander compensation, suppression of power-line interference, and reduction of high-frequency noise. This made it possible to ensure an adequate quality of the input data for further analysis and to improve the stability of the algorithms. An algorithm for QRS complex detection was applied, along with procedures for extracting informative time-domain, frequency-domain, and morphological features that most fully characterize the condition of the cardiac rhythm and can be used to identify pathological changes. Based on the obtained results, a structural model of a biomedical ECG analysis system was constructed, reflecting the sequence of the main stages of signal processing, from acquisition and preliminary filtering to classification and the generation of a diagnostic conclusion. A comparative analysis of the effectiveness of arrhythmia classification was*

*carried out using the Random Forest, Support Vector Machine, and multilayer neural network algorithms. According to the simulation results, the multilayer neural network demonstrated the best performance, achieving a classification accuracy of up to 96.8%. The proposed method provides increased system robustness to noise, artifacts, and individual signal variations, which indicates its practical suitability for use in early arrhythmia detection systems and decision-support systems for medical diagnosis.*

**Keywords:** *electrocardiogram, arrhythmia, machine learning, digital filtering, QRS detection, biomedical system.*

*Стаття надійшла 09.04.2026*

*Стаття прийнята 11.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

183 – Технології захисту навколишнього середовища

УДК 504.064.4:66.097

doi.org/10.31498/2522-9990312026359388

Бєлоконь К.В.

## ДОСЛІДЖЕННЯ ДЕЗАКТИВАЦІЇ ТА РЕГЕНЕРАЦІЇ ІНТЕРМЕТАЛІДНИХ КАТАЛІЗАТОРІВ У СИСТЕМАХ ОЧИЩЕННЯ ГАЗОВИХ ВИКИДІВ

У роботі розглянуто основні питання дезактивації та регенерації інтерметалідних каталізаторів у системах очищення відхідних газових викидів промислових підприємств та автотранспорту. Дано класифікацію явищ, що викликають зміни властивостей каталізаторів. Показано, що явища які викликають зміни властивостей каталізаторів, поділяються на два великі класи. До першого класу віднесено явища зміни хімічного складу активної поверхні каталізаторів, що призводять до зміни питомої активності або селективності каталізатора. До другого класу віднесено явища зміни структури каталізаторів, що спричиняють зміни спостережуваної активності через зміну величини робочої поверхні або її доступності. Ця класифікація систематизує та групує всі явища за спільною їхньою природою, розкриває загальні закономірності у межах кожного класу явищ. Запропоновано для використання в системах очищення газових викидів скелетні каталізатори на основі інтерметалідів  $FeAl_3$  та  $NiAl_3$  зі структурою Ренея, вивчено основні причини їх дезактивації у системах очищення газових викидів. До них відносяться: рекристалізація, спікання контактної маси та завуглецювання. Встановлено, що оптимальним режимом термічної регенерації для повного видалення вуглецевих сполук є випалювання при  $600^\circ C$  протягом 60 хв, або при зниженій до  $580^\circ C$  температурі за умови подрібнення каталізатора до розміру часток 500 мкм. Експериментально доведено, що ефективність очищення гранул від вуглецю безпосередньо залежить від ступеня їх подрібнення, оскільки у фракціях  $<0,5$  мм процес завершується значно швидше, ніж у цілих гранулах. Розроблено комплексну методику регенерації залізо-алюмінієвого каталізатора, яка включає розчинення відпрацьованої маси в азотній кислоті, осадження гідроксидів аміачною водою та подальше таблетування під тиском  $7000 \text{ кг/см}^2$ , що забезпечує високу міцність і активність контакту. Впровадження запропонованих методів регенерації дозволить підприємствам мінімізувати накопичення відходів, забезпечити автономність за сировиною та значно посилити захист навколишнього середовища.

**Ключові слова:** інтерметалідний каталізатор, дезактивація, регенерація, хімічний склад, питома поверхня, спікання, очищення газових викидів, каталітична активність, структура Ренея.

**Постановка проблеми.** Основною проблемою економічного і соціального розвитку України в цілому є охорона навколишнього природного середовища, раціональне використання природних ресурсів та збереження екологічної безпеки життєдіяльності населення. Стан атмосферного повітря Запорізької області формується обсягами викидів забруднюючих речовин від пересувних та стаціонарних джерел забруднення. До стаціонарних джерел забруднення атмосферного повітря слід віднести викиди крупних промислових підприємств, особливо, металургійного, машинобудівних, коксового та хімічного виробництв. Основними чинниками інтенсивного забруднення атмосфери автотранспортом є: постійно зростаюча кількість автотранспорту; експлуатація технічно застарілого автомобільного парку; низька якість паливно-мастильних матеріалів; недостатня пропускна спроможність дорожньо-транспортної мережі; незадовільний стан дорожнього покриття проїзної частини доріг [1].

Значна кількість розташованих у м. Запоріжжі промислових підприємств, а також збільшення числа транспортних засобів, що експлуатуються тривалий час, призводять до значного забруднення атмосферного повітря. Внаслідок цього, в окремих районах міста спостерігаються підвищені концентрації речовин забруднюючих атмосферне повітря, таких як оксид вуглецю (II), оксиди азоту, діоксид сірки, дрібнодисперсний пил, вуглеводні (фенол, формальдегід та ін.), про що свідчать дані щорічних спостережень за забрудненням повітряного басейну [1].

Джерелами забруднення атмосфери оксидом вуглецю (II) та вуглеводнями є технологічні процеси – виробництво електродів, отримання коксу, високотемпературного пеку, асфальтобетону та інші. Вуглеводні та оксид вуглецю (II) надходять в атмосферу також при роботі двигунів внутрішнього згоряння і спалюванні палива в енергоблоках.

Знешкоджування і очистка газових викидів здійснюється різноманітними методами, вибір яких визначається особливостями викидів – складом і концентрацією газових домішок.

Найбільше розповсюдження отримали каталітичні методи очистки. Застосування каталізаторів у системах очищення газових викидів промислових підприємств та автотранспорту постійно розширюється [2].

Однак, більшість гетерогенних каталізаторів під час експлуатації втрачають свою початкову активність. Час, протягом якого активність знижується до низького рівня та потребує заміни каталізатора або його регенерації, залежить від типу процесу та умов його проведення. Відмінності в тривалості ефективного використання каталізаторів впливають на проектування та способи експлуатації промислових реакторів і нейтралізаторів.

Якщо час, протягом якого каталізатор повністю дезактивується, є малим, то виникає потреба у його безперервній регенерації, що, своєю чергою, призводить до використання реакторів або з псевдозрідженим, або з рухомими шарами каталізатора. З іншого боку, якщо час життя каталізатора становить рік і більше, то доцільно використовувати реактор із нерухомим шаром каталізатора. Якщо при цьому каталізатор недорогий, то його вивантажують і замінюють на новий, в іншому разі необхідна його регенерація.

Стабільність та тривалість роботи каталізаторів вирішальним чином впливають на економічні показники процесів знешкодження газових викидів промислових підприємств. У зв'язку з цим проблема дезактивації каталізаторів у системах очищення відхідних газів при великому обсязі виробництва промислових підприємств набула першочергового значення. Вирішення цієї проблеми лежить на шляху розкриття природи та закономірностей безлічі явищ, що викликають зниження активності, селективності та терміну служби каталізаторів.

Розглянемо два приклади роботи каталізаторів у системах очищення відхідних газів. У першому випадку каталізатор працює безперервно – без регенерації. Тут втрати виникають через поступове зниження активності та іноді селективності. Зі зниженням активності для підтримки очищення на плановому рівні нерідко доводиться відповідно підвищувати температуру в каталітичному реакторі до допустимих меж. Це призводить не тільки до підвищення енергетичних витрат, але в ряді випадків спричиняє зниження селективності каталізатора. При цьому настає такий період, коли ніякі додаткові способи не можуть забезпечити прийнятну роботу каталізатора. Тоді каталітичний реактор або все виробництво доводиться зупинити для заміни каталізатора, що призводить до зниження виробництва основного продукту [3]. У другому випадку на повільне й необоротне погіршення характеристик каталізатора накладаються швидкі та оборотні зміни. Оборотні в тому сенсі, що каталізатор можна повернути в активний стан шляхом регенерації [4]. Регенерація каталізатора призводить до того, що виробництво стає періодичним, циклічним, таким, що складається з фази основного процесу та фази регенерації каталізатора з продувками між ними. Перетворення виробництва на періодичне, циклічне призводить до різкого збільшення

капітальних та енергетичних витрат, ускладнює апаратне оформлення та обслуговування, у більшості випадків підвищує собівартість продукту.

Багато авторів [5-8] виділяють додаткові фактори, які також призводять до зменшення продуктивності каталізаторів у системах знешкодження газових викидів. Йдеться про фактори, відповідальні за розуцільнення (руйнування) гранул каталізаторів. Часто на практиці саме таке розуцільнення, а не втрата активності каталізатора, є причиною виходу каталізатора з ладу. Іноді каталізатори вивантажують із каталітичного реактора внаслідок їх часткового руйнування, оскільки це призводить до неприпустимого зростання опору шару каталізатора та утворення каналів у щільному шарі контакту, зниження продуктивності реактора, ступеня знешкодження та небезпечних перегрівів. Водночас вивантажені у такому стані каталізатори під час випробування їх у лабораторних умовах зазвичай проявляють досить високу активність.

Таким чином, розв'язання проблеми стабільності та довговічності роботи каталізаторів є одним із найважливіших економічних і наукових завдань у галузі каталітичного очищення газових газів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** У роботі [7] розглядається дезактивація цеолітних каталізаторів за рахунок утворення коксових відкладень. Коксоутворення є основним фактором, який спричинює дезактивацію цеолітних каталізаторів кислотної природи в результаті блокування активних центрів і заповнення пористої структури цеоліту. Для вивчення процесу утворення коксу, хімічного складу останнього та процесу окиснення використовують десятки фізичних, хімічних, фізико-хімічних і математичних методів дослідження, які передбачають, як правило, попереднє відділення коксу від каталізатора, що має цілу низку недоліків. Останнім часом на основі хроматографічної техніки запропоновано високопрецизійний метод дискретно-послідовного мікроокиснення коксу, який дає змогу дезактивувати цеолітні каталізатори на будь-яку, в тому числі дуже малу глибину, а також вивчати *in situ* динаміку поступового окиснення коксу з одночасним визначенням поточної кількості CO<sub>2</sub> та H<sub>2</sub>O без утворення CO серед продуктів окиснення. Застосування гнучкого і високопрецизійного методу дискретно-послідовного мікроокиснення коксу уявляється вельми перспективним для дослідження коксоутворення на цеолітних каталізаторах.

### **Основними методами регенерації каталізаторів є [9]:**

- термічна регенерація – найпоширеніший метод, що полягає у нагріванні каталізатора в присутності повітря або інертного газу для випалювання вуглецевих відкладень та інших органічних забруднень;

- хімічна регенерація – використання хімічних розчинів (наприклад, кислот або лугів) для вимивання домішок, що спричинили отруєння;

- механічна регенерація – використання фізичних методів, таких як струминна обробка або вібрація, для видалення поверхневих відкладень без пошкодження структури каталізатора.

У роботі [6] розглянуто заходи для збільшення терміну служби і відновлення активності відпрацьованих каталізаторів, а саме застосування газоповітряної і паро-повітряної регенерації при високих температурах і тиску. Однак регенерація не призводить до повного відновлення активності каталізатора внаслідок неповного випалювання коксу та незворотних змін фазового і структурного складу: зменшення активної поверхні і обсягу пор. Регенерація каталізатора також вимагає зміни технологічного режиму апарату або використання додаткового обладнання для регенерації поза реактором. При термопаровій регенерації утворюються вологі гази, які відходять із високою температурою з умістом важких металів, що вимагає додаткового обладнання для їх знешкодження і погіршує екологічну обстановку. У результаті капітальні й експлуатаційні витрати на регенерацію перевищують витрати на проведення основних стадій каталітичного процесу. Крім того, навіть при застосуванні

регенерації відбувається виведення частини каталізаторів із технологічного циклу, що призводить до необхідності вирішення проблеми їх переробки.

У роботі [5] знешкоджували відпрацьовані гази, що містять  $0,5 \text{ г/м}^3$  ПАВ у суміші з чотирихлористим вуглецем ( $\text{CCl}_4$ ), на каталізаторі, який становив собою  $0,3 \%$  суміші паладію та платини (1:0,3) на керамічному носії із зв'язуючим – фосфатом натрію (1:0,12) і був пропечений при  $1350^\circ\text{C}$ . Термообробка каталізатора при його виготовленні знижує температуру роботи каталізатора. Температура запалювання каталізатора складала  $380^\circ\text{C}$  замість  $470^\circ\text{C}$ . При роботі каталізатора протягом 100 годин спостерігалось незначне зниження ступеня очищення від ПАВ –  $95 \%$ , від  $\text{CCl}_4$  –  $97 \%$ . Регенерацію каталізатора виконували шляхом продування сумішшю повітря та пари у співвідношенні 1:(2÷3), переважно 2,75, при температурі  $450\text{--}500^\circ\text{C}$  протягом 3,5 годин. Ступінь знешкодження знову повертався до високих показників і складав щодо ПАВ –  $98 \%$ , щодо  $\text{CCl}_4$  –  $99,9 \%$ . Запропонований спосіб дає можливість з високим ступенем знешкоджувати відпрацьовані гази, що мають у своєму складі ПАВ, сажисті, органічні речовини, які містять хлор, фтор, фосфор, сірку. При цьому ступінь очищення практично не змінюється залежно від часу, і лише після 100 годин роботи каталізатор потребує регенерації, продування гарячим повітрям та парою. Пару кислот, які утворюються при цьому, вловлюють лужним реагентом.

**Метою роботи** є дослідження процесів дезактивації та регенерації каталізаторів у системах очищення відхідних газів промислових підприємств та автотранспорту для забезпечення стабільності їхньої роботи, підвищення техніко-економічної ефективності знешкодження викидів та реалізації принципів ресурсозбереження.

**Основний матеріал дослідження.** Каталізатори, що застосовуються для знешкодження відхідних газів промислових підприємств та автотранспорту, працюють у винятково жорстких температурних умовах ( $700\text{--}1100^\circ\text{C}$ ) і належать до розряду високотемпературних.

Розглянемо зміни, що можуть відбуватися в гетерогенних високотемпературних каталізаторах і призводити до їхньої дезактивації. Каталітична активність і селективність є найтоншим індикатором усіх змін у каталізаторі. Зміни каталітичної активності каталізатора пов'язані зі зміною величини питомої активності, питомої поверхні та ступеня використання внутрішньої поверхні зерна. Усі явища зміни властивостей каталізаторів поділено на два великі класи. До першого класу віднесено явища зміни хімічного складу активної поверхні каталізаторів, що призводять до зміни питомої активності або селективності [10] (рис. 1); до другого класу – явища зміни структури каталізаторів, що спричиняють зміни спостережуваної активності через зміну величини робочої поверхні або її доступності [10] (рис. 2).

Перший клас охоплює шість загальних явищ. Серед них найбільш поширеною причиною змін каталітичної активності та селективності є зміни поверхневого та фазового складу каталізатора під впливом реакційного середовища та умов процесу, оскільки хімічно взаємодіючі системи «каталізатор-реакційне середовище» повинні знаходитися в рівновазі.

У більшості випадків каталізатори готують у середовищах, що відрізняються від робочих середовищ цільового каталітичного процесу знешкодження. При завантаженні в реактор свіжого каталізатора рівновага досягається в період так званого розроблення каталізатора. Тривалість і глибина взаємодії каталізатора з робочим середовищем залежать від їхньої хімічної природи та умов процесу очищення, і це визначає відповідний період нестабільної роботи каталізатора за активністю. При цьому хімічний склад багатьох каталізаторів може змінюватися і за висотою шару, і за радіусом зерна.

Другою суттєвою причиною змін каталітичної активності та селективності є взаємодія активного компонента з носієм каталізатора. Наприклад, під час каталітичного очищення вуглеводнів нікелеві каталізатори працюють у жорстких температурних умовах та щодоби зазнають великої кількості стрибків температури.

Екологічна безпека

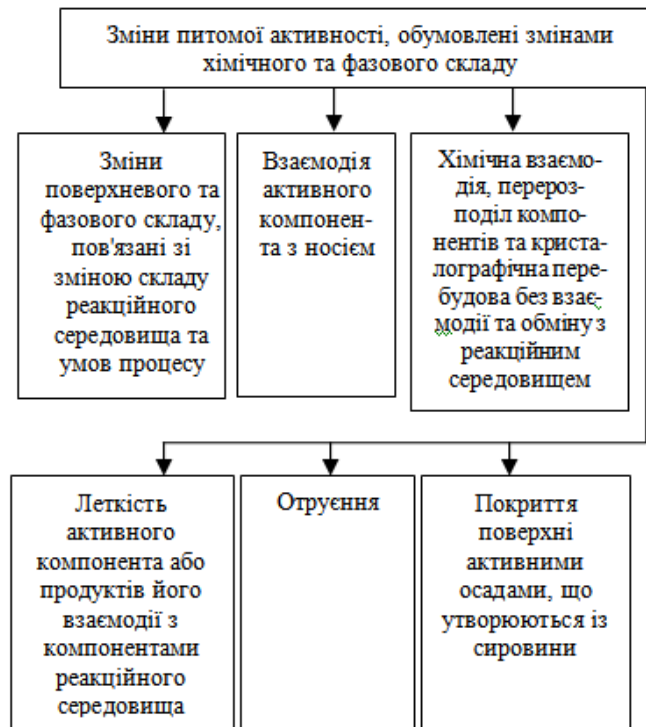


Рисунок 1 – Зміни питомої активності каталізатора, обумовлені змінами хімічного та фазового складу

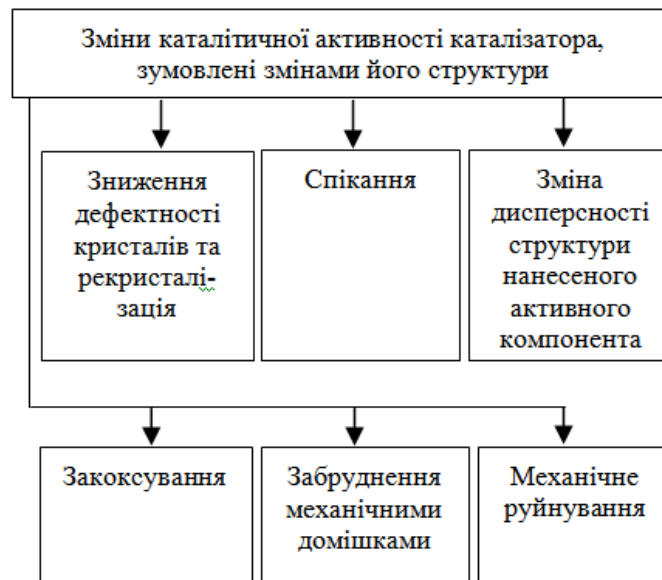


Рисунок 2 – Зміни каталітичної активності каталізатора, зумовлені змінами його структури

У результаті через 5–10 тис. годин роботи їхня активність починає знижуватися через утворення в окиснювальному середовищі сполук активного компонента з носієм. При використанні  $\text{Al}_2\text{O}_3$  як носія, утворюється шпінель  $\text{NiAl}_2\text{O}_4$ . На силікатному носії утворюються силікати нікелю, на оксидно-магнієвому – змішаний оксид  $\text{MgNiO}_2$ .

Зміна каталітичних властивостей може спричинитися змінами хімічних, фазових і кристалохімічних властивостей внаслідок хімічної взаємодії та перерозподілу компонентів, а

також кристалографічної перебудови й поліморфних перетворень у каталізаторі без хімічної взаємодії та обміну з реакційним середовищем.

У роботі [9] описано, що перегрів залізного каталізатора, промотованого калієм, кальцієм та алюмінієм, призводить до його дезактивації. Це пояснюється порушенням рівномірного розподілу промоторів, головним чином калію, через їхню коагуляцію з утворенням нової фази. Внаслідок цього відбувається збіднення активної фази калієм, змінюється хімічний склад її поверхні, що призводить до зміни питомої каталітичної активності в кілька разів.

Відомо, що в певних випадках при зміні термодинамічних, головним чином температурних умов, можуть відбуватися енантіотропні поліморфні переходи фазових модифікацій. Усі дані свідчать про те, що якщо має місце зміна кристалічного стану, то повинні спостерігатися зміни в каталітичних властивостях.

Поширеною причиною зниження активності каталізаторів є леткість активного компонента або продуктів його взаємодії з компонентами реакційного середовища.

До явища отруєння каталізаторів отрутами слід відносити дезактивацію каталізаторів у результаті їхньої взаємодії з домішками, що містяться у відхідних газах, з утворенням каталітично неактивних або менш активних у цій реакції хімічних поверхневих або об'ємних сполук. У найпростішому випадку однорідної поверхні при поглинанні отрути зменшуватиметься кількість активних місць на одиниці поверхні (частка активної поверхні). Істинна питома активність вільної від отрути поверхні (активність одного місця) та енергія активації при цьому не змінюються. Не змінюється і форма кінетичного рівняння реакції, а спостережувана активність лінійно залежить від кількості поглиненої отрути.

При неоднорідній поверхні або у тих випадках, коли продукти взаємодії каталізатора з отрутою також мають певну активність щодо цільової реакції, може спостерігатися зміна форми кінетичного рівняння, енергії активації та, відповідно, істинної питомої активності. Широко розповсюдженим є явище отруєння каталізаторів, особливо металевих (Fe, Ni, Pt та ін.), сірчистими сполуками, що містяться в реакційному середовищі.

Покриття поверхні каталізатора активними осадами, що утворюються із сировини, частково або повністю екранує активну поверхню каталізатора, змінюючи вимірювану каталітичну активність і селективність.

Найбільш поширеними причинами змін каталітичної активності є зниження дефектності кристалів і кристалізація, а також спікання каталізаторів.

Промислові каталізатори, як правило, являють собою пористі високодисперсні тіла з розвиненою поверхнею, наявністю мікроспотворень решітки кристалів – зміщень атомів із регулярних положень у решітці, надлишкових вакансій тощо. Тому вони є системами, віддаленими від термодинамічної рівноваги. У зв'язку з цим каталізатори в процесі експлуатації поступово зазнають необоротних структурних змін: скорочується питома поверхня, зменшується загальна пористість і в низці випадків об'єм каталізатора тощо.

Кристалізація та спікання є хоча й спорідненими, але, тим не менш, різними процесами. При кристалізації каталізаторів відбувається ріст кристалів та упорядкування всієї структури з усуненням дефектів і спотворень у решітці кристалів. Процес зумовлений переважно поверхневою дифузією. У результаті зникають найдрібніші частинки, збільшується розмір пор, скорочується поверхня. Однак загальний об'єм пор, розміри та удавана щільність гранул каталізатора при цьому змінюються незначно. При кристалізації формується відносно стійка і більш однорідна упорядкована структура, що характеризується певними розмірами кристалів.

Процес спікання також веде до зникнення дрібних пор. При спіканні велику роль відіграє об'ємна дифузія, при якій дрібні кристалики неупорядковано зростаються один з одним. Спікання – це процес безладного ущільнення системи з усадкою структури та утворенням

агломератів різних розмірів. При цьому утворюється малостійка структура, схильна до подальшого ущільнення за рахунок кристалізації, яка в такому разі може протікати в процесі експлуатації каталізаторів.

Енергії активації процесів кристалізації та спікання є різними. Тому в області нижчих температур відбуваються переважно процеси кристалізації та упорядкування структури. З підвищенням температури переважно прискорюється спікання. Питання про співвідношення цих процесів і, особливо, про їхню кількісну оцінку мало розроблене: проте навіть суто якісні уявлення в цьому плані дозволили отримати вельми суттєві результати щодо створення більш термостійких каталізаторів. На основі таких уявлень було зроблено висновок, що у тих випадках, коли дисперсні каталізатори потребують попереднього розроблення, необхідно обирати такий режим, який би спричиняв переважно протікання процесу кристалізації та упорядкування структури, а не спікання. Такий попередньо окристалізований каталізатор значною мірою втратить схильність до спікання і матиме підвищену термостійкість та довговічність.

Наступною причиною зміни структури каталізаторів є зміна дисперсної структури нанесеного активного компонента. Тут мається на увазі переважно поведінка каталітично активних металів на поверхні носіїв (Ni, Pt, Fe, Ag та ін.). Питома поверхня нанесеного активного компонента, а відповідно і активність одиниці його ваги, зростають зі збільшенням дисперсності. Проте у зв'язку з цим одночасно помітно зменшується стійкість системи щодо рекристалізації та спікання. Саме ця обставина зумовлює велику кількість досліджень. Укрупнення нанесених частинок активного компонента відбувається переважно під дією високих температур. Стійкість нанесеного компонента залежить не тільки від його фізичних властивостей, а й значною мірою від природи носія та міцності зв'язку з ним.

Найбільш поширеною причиною зміни активності, а іноді й селективності, є закоксовування каталізаторів [11]. При закоксовуванні каталізаторів зазвичай проводять їхню регенерацію. Однак зрозуміло, що необхідність у регенерації каталізаторів робить процес або періодичним, або викликає потребу в циркуляції каталізатора між реактором і регенератором. І те, і інше різко збільшує всі витрати на газоочищення. При цьому каталізатор піддається величезному додатковому хімічному, термічному та механічному навантаженню, тому як наслідок виникають і багато з вищевикладених причин необоротної втрати активності каталізатора через рекристалізацію, зміни фазового складу тощо.

Ще однією причиною дезактивації каталізаторів є забруднення механічними домішками, які можуть міститися у сировині. Механічні домішки осідають на поверхні каталізаторів, забивають гирла їхніх пор, блокують активну поверхню і тим самим зменшують її доступність для реагуючих речовин.

Ще одним явищем, що призводить до погіршення роботи каталізатора, є механічне руйнування каталізатора. Механічна міцність і стійкість до стирання – одна з характеристик, що регламентуються технічними умовами на каталізатори. У низці випадків ця характеристика стає вирішальною і визначає долю каталізаторів.

Дана класифікація розкриває багатогранність явищ, що призводять до зміни властивостей каталізаторів, у їхній єдності та зв'язку з конкретними каталізаторами, систематизує та групує ці явища за спільністю їхньої природи, розкриває загальні закономірності в межах кожної групи явищ і орієнтує на вивчення кожного такого явища для того, щоб надавати цілеспрямовані рекомендації для будь-якого промислового каталізатора.

Перспективним способом виготовлення каталізаторів нейтралізації відхідних газів промислових підприємств та двигунів внутрішнього згоряння є розробка поліметалевих каталізаторів на основі інтерметалідів перехідних металів [12]. Численні літературні дані свідчать, що легування поліметалевих каталізаторів сприяє збільшенню каталітичної

активності і, певною мірою, термічної стійкості [13, 14]. В якості основи для отримання каталізаторів інтерметалідного типу можуть бути використані Fe, Ni, Co, Cu, Cr, Mo, Si, Al, Mg та інші метали.

Для дослідження можливості використання в каталітичних реакторах чи нейтралізаторах більш дешевих контактів були розроблені інтерметалідні каталізатори на основі заліза та нікеля з добавками кобальту, хрому, марганцю та міді. Вибір цих систем ґрунтувався на низці міркувань, таких як виключення використання дорогоцінних металів; висока активність у процесах глибокого окиснення, що використовуються у системах очищення промислових газів; високі міцність та термостійкість, що дуже важливо для контактів, що працюють у каталітичних нейтралізаторах; широке використання в різних галузях промисловості та гарна виробнича база для масового виробництва поліметалевих каталізаторів.

У зв'язку з цим, було вирішено досліджувати системи на основі інтерметалідів Ni-Al та Fe-Al стехіометричного складу  $NiAl_3$  та  $FeAl_3$ , синтезовані методом теплового самозаймання [15], при використанні в якості каталізаторів повного окислення вуглеводнів і вуглекислого газу (II), що містяться у відхідних газах промислових підприємств та двигунів внутрішнього згоряння. З метою збільшення каталітичної активності інтерметаліди були модифіковані різними кількостями перехідних металів.

Отримання каталізаторів методом теплового самозаймання включало дозування, змішування, заповнення форми та пресування циліндричної заготовки. Дисперсність порошків становила 100-150 мкм. Зусилля пресування змінювали в діапазоні 30-100 кН. Отриману заготовку поміщали в матрицю гарячого пресування, заповнювали інертним середовищем, де рівномірно нагрівали. При рівномірному нагріванні йде саморозігрів заготовки. При тепловому самозайманні за рахунок саморозігріву практично одночасно в повному обсязі заготівлі досягаються високі температури зразка. Після проходження хвилі горіння проводиться витримка заготовки при температурі 390-460°C протягом 0,5-1 год. На стадії термічної обробки проводиться допресування отриманого продукту.

Отримані металеві зливки піддавали дробленню з наступною класифікацією до потрібної фракції 0,1-0,3 мм. На наступному етапі класифіковані частинки сплаву передавали для проведення хімічної обробки (лужне травлення).

Скелетний каталізатор отримували шляхом вилуговування отриманого інтерметаліду 20% водним розчином NaOH або KOH, з подальшим видаленням залишкового водню розчином перекису водню. Потім каталізатор промивався на фільтрі дистильованою водою до нейтральної реакції. Після чого зразки сушилися в сушильній шафі при температурі 120°C.

Каталізатори, отримані з інтерметалідних прекурсорів на основі заліза та нікеля, виявили досить високу каталітичну активність. Ці каталізатори мають більш високу питому поверхню і, згідно з даними рентгенофазового аналізу, складаються з оксидів.

Старіння та дезактивація інтерметалідних каталізаторів типу Ренея при зберіганні обумовлені кількома процесами - окисненням найбільш енергонасичених ділянок поверхні, рекристалізацією, коагуляцією та коалесценцією металевих, оксидних і гідроксидних фаз, сегрегацією компонентів та ін.

Дезактивація інтерметалідних каталізаторів під дією високих температур обумовлена головним чином їх рекристалізацією. Найінтенсивніше вона протікає в атмосфері водню, меншою мірою в інертному та окислювальному середовищах.

Термообробка інтерметалідних каталізаторів внаслідок зменшення числа центрів з високою координаційною ненасиченістю, зміни орієнтації кристалографічних граней та деформації ґрат за рахунок дифузії газів в об'єм металу, як правило, супроводжується зміною характеру енергетичної неоднорідності їхньої поверхні.

Питома каталітична активність каталізаторів при цьому зростає внаслідок переважної анігіляції мікро- та супермікропор, які не вносять помітного внеску до сумарної активності каталізатора. Справжня константа швидкості реакції на одиницю рівнодоступної поверхні залишається незмінною, а спостережувана, за величиною якої розраховується питома каталітична активність, симбатна фактору ефективності.

Ступінь рекристалізації інтерметалідних каталізаторів однакового хімічного складу пропорційний частці мікропор. Найбільш стійкими при тривалій експлуатації є мезопористі скелетні каталізатори.

Еволюція гетерогенних каталізаторів під дією реакційної системи є наслідком утворення та розпаду лабільних адсорбційних комплексів, що призводять до реконструкції поверхневих шарів твердого тіла, зміни їх хімічного складу, фазових перетворень та сегрегації компонентів. У вакуумі поверхня каталізатора збагачується компонентами з мінімальними теплотами сублімації, а у реакційному середовищі - з максимальними теплотами хемосорбції. Кожному складу реакційної суміші та температурі відповідає певний стаціонарний стан каталізатора, що не залежить від його початкового стану. Кінетика дезактивації гетерогенних каталізаторів та час релаксації залежать від механізму реконструкції поверхневих шарів та умов здійснення процесу. Кінетика дезінтеграції агломерованих структурних елементів гетерогенних каталізаторів залежить від теплоти реакції.

Незважаючи на складність явищ дезактивації в реальних каталітичних процесах, зміна морфології та структури інтерметалідних каталізаторів в ході експлуатації у багатьох випадках відіграє вирішальну роль. Так, наприклад, всебічне дослідження інтерметалідного нікелевого каталізатора, який пропрацював 2400 годин, показало, що зниження його активності обумовлено виключно зростанням кристалів нікелю і зменшенням величини доступної поверхні. Всі інші фактори (завуглецювання, отруєння, зміна хімічного складу та ін.) не надають помітного впливу.

Серед багатьох причин, що спричиняють дезактивацію інтерметалідних каталізаторів на носіях, особлива роль належить ефекту сильної взаємодії активної фази з носієм. Воно супроводжується зміною валентності металу, зсувом електронної щільності у системі, а у граничних випадках - утворенням нових хімічних сполук.

До отруєння інтерметалідних каталізаторів призводить також деструкція ряду органічних сполук з утворенням міцно адсорбованих частинок або вуглецевих відкладень. Регенерація таких каталізаторів заснована на видаленні шарів коксу, що блокують активну поверхню, окисленням при високих температурах. Продукти розпаду органічних речовин можна також видалити анодною або катодною поляризацією каталізаторів.

При розробці інтерметалідних каталізаторів, стійких при тривалій експлуатації, проводили легування добавками кобальту, хрому, марганцю та міді, що локалізуються у вигляді тонких прошарків на міжзеренних межах. Такі прошарки гальмують рекристалізацію ультрадисперсних каталізаторів. Ni та Fe з  $\text{NiAl}_3$  та  $\text{FeAl}_3$ , які майже не містять гідроксидів алюмінію, інтенсивно рекристалізуються вже при відносно низьких температурах (рис. 3). Інтерметалідні каталізатори, у яких утворюється значна кількість оксидів і гідроксидів алюмінію та легуючих добавок, зберігають високорозвинену поверхню навіть у найжорсткіших умовах вилуговування.

В інтерметалідних каталізаторах типу Ренея, що вилужені у м'яких умовах,  $\text{Al}(\text{OH})_3$  найбільш аморфна і розкладається при низьких температурах. Такі каталізатори інтенсивно спікаються (рис. 4). Зі зростанням ступеня кристалічності гідроксидної фази вони стають набагато стабільнішими.

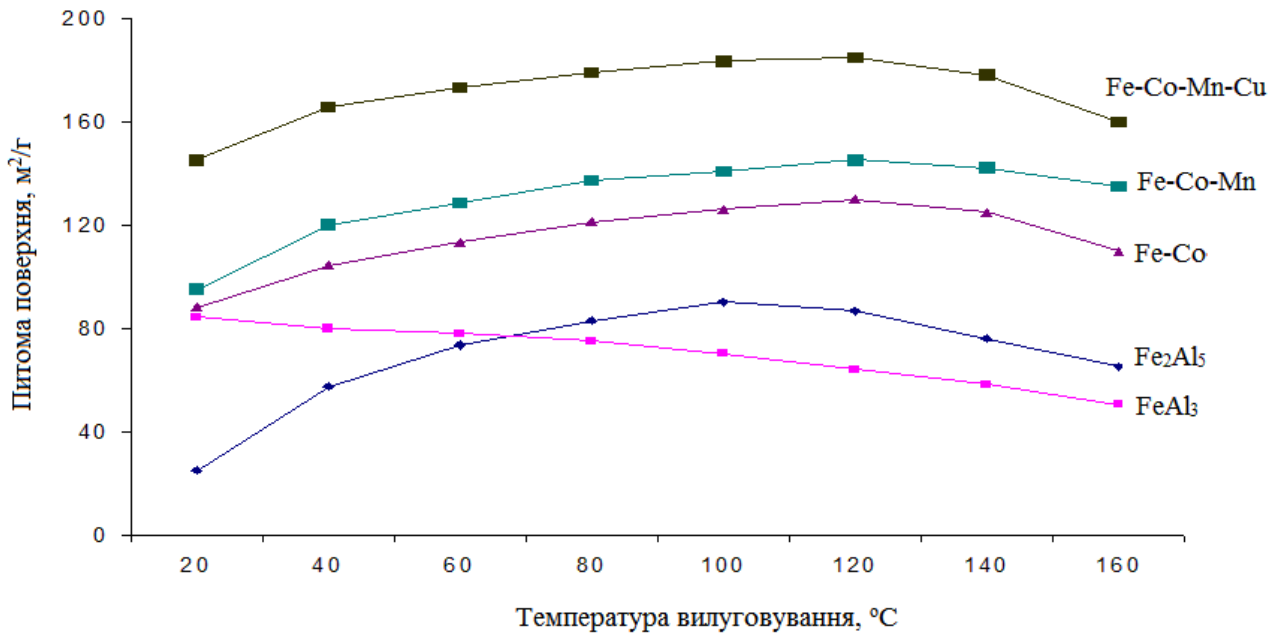


Рисунок 3 – Залежність між питомою поверхнею інтерметалідних скелетних залізних каталізаторів та температурою вилуговування

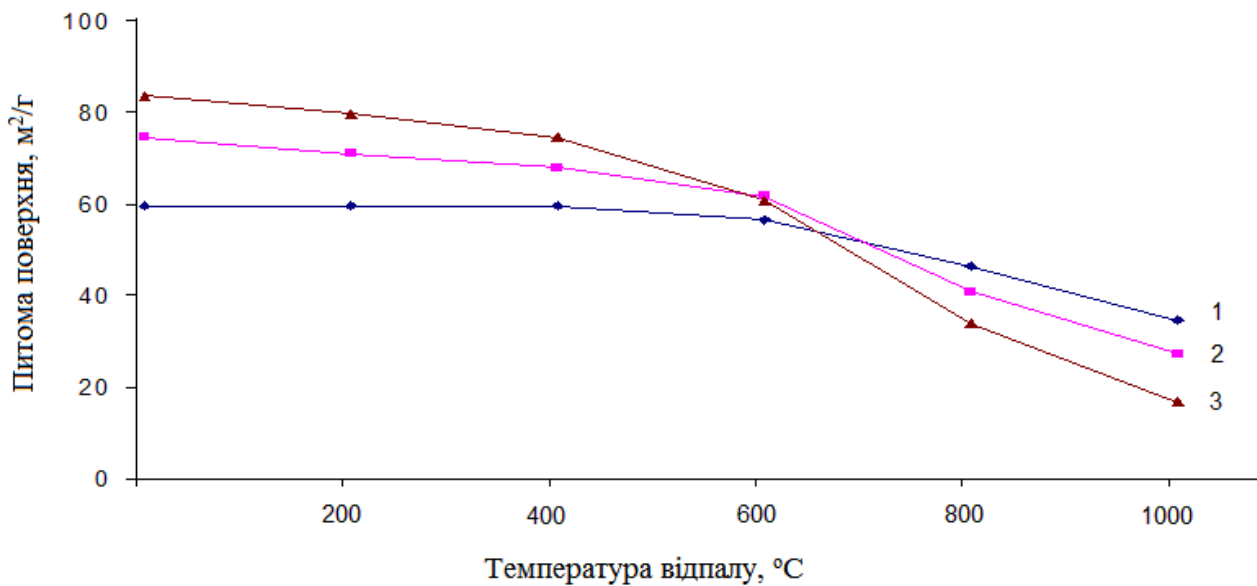


Рисунок 4 – Зміна питомої поверхні інтерметалідних Fe-Al каталізаторів під час відпалу. Умови вилуговування: 1 – 96°C, 20% NaOH, 1 година; 2 – 20°C, 20% NaOH, 1 година; 3 – 20°C, 2% NaOH, 2 години

Представлені приклади демонструють лише основні типи дезактивації. На практиці руйнування та втрата активності каталізаторів відбуваються через синергічну дію багатьох факторів, що ускладнює прогнозування терміну їхньої експлуатації.

Диференційоване з'ясування їхньої ролі за допомогою комплексу сучасних методів дослідження та знання загальних принципів стабілізації ультрадисперсних металів є раціональною основою для створення каталізаторів, стійких при тривалій експлуатації.

Встановлено, що основною причиною дезактивації інтерметалідних каталізаторів унаслідок старіння є перебіг процесів рекристалізації, спікання контактної маси та завуглецювання. З урахуванням необоротної термічної деградації каталізатора в процесі знешкодження газових викидів, метод регенерації відпрацьованого контакту має передбачати його радикальну переробку.

Для відновлення активності інтерметалідного каталізатора його періодично регенерують безпосередньо в реакторах шляхом термічної або термопарової обробки. Для визначення оптимального часу термічної обробки було поставлено дві серії експериментів. У першій серії гранули каталізатора піддавали обробці протягом 60 хв при температурах 400, 500 та 600 °С. Після цього методом оптичної мікроскопії досліджували поверхню зразка, а також його внутрішню структуру, що дозволило визначити оптимальну температуру та діаметр зерна для процесу регенерації. У другій серії експериментів гранули зразка попередньо подрібнювали, і термічній обробці піддавали фракції різного розміру при 580 °С.

Для вибору оптимального ступеня подрібнення каталізатора було проведено випалювання гранул при температурах 400, 500 та 600 °С протягом 30 та 60 хв.

У результаті досліджень встановлено, що підвищення температури з 400 до 600 °С при часі випалювання 30 хв призводить до збільшення товщини шару, що змінив свій фазовий склад. Збільшення часу випалювання до 60 хв при 600 °С дозволяє практично повністю видалити сполуки вуглецю з гранул, що вказує на завершення процесу випалювання каталізатора за розміру частинок до 500 мкм.

Для визначення кількісних показників кінетики випалювання були проведені дослідження для фракцій каталізатора <0,25 мм, 0,25–0,5 мм та гранул. Встановлено, що для фракцій 0,25–0,5 мм та <0,25 мм при температурі 580 °С достатньо 60 хв для видалення з каталізатора вуглецю. При цьому втрати маси у цих фракцій є практично однаковими, що дозволяє зробити висновок про можливість зниження температури випалювання до 580 °С за умови подрібнення каталізатора до розміру зерна близько 500 мкм. Випалювання без подрібнення каталізатора при цій температурі не завершується навіть протягом 2 год.

Надалі відпрацьований каталізатор можна піддавати утилізації у двох напрямках: вилучення нікелю з каталізатора методом обробки різними розчинниками або використання відпрацьованого каталізатора для повторного приготування нових носіїв та контактів.

Утилізація відпрацьованого каталізатора здійснюється переплавленням у печі, під час якого органічні домішки вигоряють, а над розплавом збирається шлак, що містить оксиди Ni та Al. Шляхом внесення сухого каталізатора в тигель із розплавленим Al можна отримати Ni-Al сплав заданого складу. Для зменшення втрат порошкоподібний каталізатор попередньо брикетується.

Розроблено метод регенерації залізо-алюмінієвого каталізатора, який полягає в розчиненні відпрацьованого контакту в слабкій азотній кислоті з подальшим відокремленням його нерозчиненої частини та осадженням гідроксидів заліза з отриманих нітратних розчинів аміачною водою. Подальші операції – фільтрування гідроксидів, їх сушіння та прожарювання, таблетування оксидів і заключне прожарювання готового контакту.

Розчинення відпрацьованого каталізатора проводили в азотній кислоті (10-50 %) при температурі 80-100 °С, коефіцієнті надлишку кислоти від стехіометрії 0,9-1,2, середньому діаметрі частинок розмеленого відпрацьованого контакту 200 мкм, турбулентному режимі перемішування та часі розчинення 30-120 хв. Осадження гідроксидів здійснювали в аміачній воді (5-25 % аміаку) при температурі 35-95 °С, швидкості зливання рідин 3-15 л/год, часі старіння осаду гідроксидів 0-90 хв та рН 7,2–7,5. Розрідження при фільтруванні становить 0,43 кг/см<sup>2</sup>. Температура сушіння на відкритому повітрі – 120-130 °С до вологості 2-5 %, прожарювання протягом 2-3 год при температурі 400-450 °С. Таблетування каталізатора

здійснювали під тиском 1800-7000 кг/см<sup>2</sup> із додаванням близько 0,5 % сполучної речовини. Таблетки прожарювали протягом 2 год. Активність регенованого контакту порівнювали з активністю свіжоприготовленого каталізатора. Вибір режиму термообробки здійснювали з умови отримання міцного та активного каталізатора. Було виявлено ендоефект при температурі 150 °С та екзоєфект при 218 °С.

Дослідження впливу тиску пресування на активність та фізичні властивості регенованого каталізатора показали, що активний і міцний каталізатор можна отримати при тиску 7000 кг/см<sup>2</sup>. При цьому уявна питома вага каталізатора дорівнює 2,4 кг/см<sup>3</sup>. Заключне прожарювання таблеток сприяє збільшенню міцності контакту в 1,5–2 рази.

Впровадження запропонованих методів регенерації дозволить підприємствам мінімізувати накопичення відходів, забезпечити автономність за сировиною та значно посилити захист навколишнього середовища.

## ВИСНОВКИ

1. В даний час проблема дезактивації каталізаторів у системах очищення відпрацьованих газів промислових підприємств та автотранспорту набула першочергового значення. Вирішення цієї проблеми лежить на шляху розкриття природи та закономірностей безлічі явищ, що викликають зниження активності, селективності та терміну служби каталізаторів. Зниження активності каталізатора фактично є еквівалентним зниженню потужності установок, зниження селективності - еквівалентно перевитраті енергії.

2. Розроблено класифікацію явищ, що викликають зміни властивостей каталізаторів. Явища, що викликають зміни властивостей каталізаторів, розділені на два класи. До першого класу віднесено шість явищ зміни хімічного складу активної поверхні каталізаторів, що призводять до зміни питомої активності чи селективності. До другого класу віднесено також шість явищ зміни структури каталізаторів, що викликають зміни спостережуваної активності через зміну величини працюючої поверхні або її доступності.

3. У першому класі найбільш поширеними причинами змін каталітичної активності та селективності є: зміни поверхневого та фазового складу каталізатора під впливом реакційного середовища та умов процесу, взаємодія активного компонента з носієм каталізатора, зміни хімічних, фазових та кристалохімічних властивостей внаслідок хімічної взаємодії та перерозподілу компонентів, а також кристалографічної перебудови та поліморфних перетворень у каталізаторі без хімічної взаємодії та обміну з реакційним середовищем, леткість активного компонента або продуктів його взаємодії із компонентами реакційного середовища, отруєння, покриття поверхні активними осадами, що утворюються з сировини.

4. Основними причинами зміни структури каталізаторів є: зміна дисперсної структури нанесеного активного компонента, закоксування, спікання, зниження дефектності кристалів і рекристалізація, забруднення механічними домішками, механічне руйнування.

5. Розроблено для використання в системах очищення газових викидів скелетні каталізатори на основі інтерметалідів NiAl<sub>3</sub> та FeAl<sub>3</sub> із структурою Ренея, синтезовані методом теплового самозаймання. Скелетний каталізатор одержували шляхом вилуговування отриманого інтерметаліду різними кислотами та лугом з подальшим видаленням залишкового водороду розчином перекису водороду. Каталізатори, отримані з інтерметалідних прекурсорів на основі заліза та нікелю, виявили досить високу каталітичну активність. Вони мають більш високу питому поверхню і, згідно з даними рентгенофазового аналізу, складаються з оксидів.

6. Встановлено, що основною причиною дезактивації інтерметалідних каталізаторів унаслідок старіння є перебіг процесів рекристалізації, спікання контактної маси та завуглецювання. З урахуванням необоротної термічної деградації каталізатора в процесі

експлуатації, метод регенерації відпрацьованого контакту має передбачати його радикальну переробку.

7. Встановлено, що оптимальним режимом термічної регенерації для повного видалення вуглецевих сполук є випалювання при 600°C протягом 60 хв, або при зниженій до 580 °C температурі за умови подрібнення каталізатора до розміру часток 500 мкм. Експериментально доведено, що ефективність очищення гранул від вуглецю безпосередньо залежить від ступеня їх подрібнення, оскільки у фракціях <0,5 мм процес завершується значно швидше, ніж у цілих гранулах. Розроблено комплексну методику регенерації залізо-алюмінієвого каталізатора, яка включає розчинення відпрацьованої маси в азотній кислоті, осадження гідроксидів аміачною водою та подальше таблетування під тиском 7000 кг/см<sup>2</sup>, що забезпечує високу міцність і активність контакту.

### Список використаних джерел

1. Белоконь К. В., Тулушев Є. О. Аналіз впливу технологій промислових підприємств та автотранспорту на стан екологічної безпеки атмосферного повітря (на прикладі м. Запоріжжя). Запоріжжя : ВД «Гельветика», 2020. 230 с.
2. Ратушняк Г. С., Лялюк О. Г. Засоби очищення газових викидів : навч. посіб. Вінниця : УНІВЕРСУМ-Вінниця, 2008. 207 с.
3. Черненко Я. М., Волошин М. Д., Ларичева Л. П. Каталізатори та сорбенти : навч. посібник. Кам'янське : ДДТУ, 2017. 317 с.
4. Процес регенерації каталізатора парофазного окиснення метанолу. Особливості вилучення срібла / А. М. Бутенко та ін. *Хімічна промисловість України*. 2013. № 5. С. 18-21.
5. Крот О. П., Ровенський О. І., Конев В. В. Експериментальні дослідження методів зменшення викидів від процесів термічного знешкодження побутових відходів. *Збірник наукових праць Українського державного університету залізничного транспорту*. 2016. Вип. 166. С. 78-86.
6. Утилізація і переробка відпрацьованих молібденових каталізаторів / Г. І. Гринь та ін. *Екологічні науки*. 2020. № 1 (28). С. 159-164. <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2020.eco.1-28.25>.
7. Патриляк Л. К., Охріменко М. В. Коксоутворення на цеолітних каталізаторах. *Каталіз и нефтехимия*. 2006. № 14. С. 22-32.
8. Методи очищення газових викидів від хімічно-небезпечних речовин для підвищення ефективності фільтрувальних систем / О. В. Галак та ін. *Вісник Національного технічного університету «ХПИ»*. 2018. № 18 (1294). С. 89-93.
9. Хімічна технологія каталізаторів та каталітичних процесів: Конспект лекцій з розділу «Технологія каталізаторів». Лабораторний практикум : навч. посіб. для студ. спец. 161 «Хімічні технології та інженерія» / уклад.: Т. І. Обушенко, Ю. М. Феденко ; КПП ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського, 2018. 300 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/18e31823-b378-4c0a-bae3-1fe73452ad82/content>.
10. Bielokon K. V. Deactivation Of Intermetallide Catalysts In Gas Emission Neutralisation Processes Generated By Industrial Plants And Vehicles. *Chemical technologies for reconstructing Ukraine in the war and post-war periods : Scientific monograph*. Riga : Baltija Publishing, 2023. P. 2-24. <https://doi.org/10.30525/978-9934-26-329-3-2>.
11. Белоконь К. В., Вагін А. В., Румянцев М. В. Дезактивація інтерметалідних каталізаторів у системах очищення токсичних речовин газових викидів промислових підприємств та автотранспорту. *Геостратегічні трансформації та траєкторія національної*

безпеки в контексті відбудови і сталого розвитку України : матеріали міжнар. наук.-практ. конф. (м. Запоріжжя, 2023 р.). Запоріжжя : ЗНУ, 2023. С. 410-413.

12. Белоконь К. В. Розробка інтерметалічних каталізаторів для знешкодження вуглецевмісних компонентів газових викидів в атмосферу : монографія. Херсон : Видавничий дім «Гельветика», 2019. 174 с.

13. Belokon K., Belokon Y. The study of catalysts based on intermetallic NiAl alloys. *Ceramic Transactions*. 2018. Vol. 262. P. 219-225.

14. Raney-nickel catalysts produced by mechanical alloying / B. Zeifert et al. *Rev. Adv. Mater. Sci.* 2008. Vol. 18. P. 632-638.

15. Пат. 107101 Україна, МПК С22С 1/05 (2006.01), С22С 19/03 (2006.01). Жароміцний інтерметалічний сплав / Белоконь Ю. О., Белоконь К. В. ; заявник ЗДІА. № у 2015 10428 ; завял. 26.10.2015 ; опубл. 25.05.2016, Бюл. № 10.

**Belokon K.V.**

## STUDY OF DEACTIVATION AND REGENERATION OF INTERMETALLIC CATALYSTS IN GAS EMISSION PURIFICATION SYSTEMS

*The paper examines the fundamental issues of deactivation and regeneration of intermetallic catalysts within systems for purifying waste gas emissions from industrial enterprises and motor vehicles. A classification of phenomena causing changes in catalyst properties is provided. It is shown that these phenomena are divided into two broad classes. The first class includes phenomena involving changes in the chemical composition of the catalyst's active surface, leading to shifts in specific activity or selectivity. The second class comprises structural changes in catalysts that cause variations in observable activity due to changes in the size or accessibility of the working surface. This classification systematizes and groups all phenomena based on their common nature, revealing general patterns within each class. Skeletal catalysts based on FeAl<sub>3</sub> and NiAl<sub>3</sub> intermetallics with a Raney structure are proposed for use in gas emission purification systems, and the main causes of their deactivation in such systems have been investigated. These include recrystallization, sintering of the contact mass, and carbon fouling (coking). It was established that the optimal thermal regeneration regime for the complete removal of carbon compounds is roasting at 600 °C for 60 min, or at a reduced temperature of 580 °C provided that the catalyst is ground to a particle size of 500 μm. It has been experimentally proven that the efficiency of carbon removal from the granules directly depends on the degree of their grinding, as the process is completed significantly faster in fractions <0.5 mm than in whole granules. A comprehensive methodology for the regeneration of the iron-aluminum catalyst has been developed, which involves dissolving the spent mass in nitric acid, precipitating hydroxides with ammonia water, and subsequent tableting under a pressure of 7000 kg/cm<sup>2</sup>, ensuring high strength and contact activity. The implementation of the proposed regeneration methods will allow enterprises to minimize waste accumulation, ensure raw material autonomy, and significantly strengthen environmental protection.*

**Keywords:** intermetallic catalyst, deactivation, regeneration, chemical composition, specific surface area, sintering, gas emission purification, catalytic activity, Raney structure.

Стаття надійшла 06.04.2026

Стаття прийнята 10.04.2026р.

Стаття опублікована 30.04.2026р

263 – Цивільна безпека  
УДК 669.15-194:620.92

[doi.org/10.31498/2522-9990312026359392](https://doi.org/10.31498/2522-9990312026359392)

Нестеров О.В., Капустян О.Є., Рубан В.Т.

## ПІДТРИМАННЯ СТАБІЛЬНОСТІ РОБОТИ ПІДПРИЄМСТВ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПІД ЧАС ВОЄННОГО СТАНУ

У роботі розглянуто актуальну проблему забезпечення стійкості функціонування об'єктів критичної інфраструктури України в умовах збройної агресії. На тлі повномасштабного вторгнення російської федерації особливої ваги набуває захист промислових підприємств, зокрема термічних цехів машинобудівної галузі, які відіграють ключову роль у підтриманні обороноздатності держави. Проаналізовано нормативно-правові засади у сфері захисту критичної інфраструктури та визначено основні завдання державної політики щодо попередження кризових ситуацій, мінімізації ризиків і ліквідації наслідків надзвичайних подій. Досліджено особливості технологічних процесів термічної та хіміко-термічної обробки, а також склад і функціонування відповідного обладнання. Встановлено, що вразливість таких об'єктів зумовлена використанням вибухонебезпечних газових середовищ, складних автоматизованих систем управління та високих температурних режимів. Розглянуто вплив сучасних засобів ураження, зокрема ракетного озброєння, на промислові об'єкти, а також проаналізовано фактори ураження – ударну хвилю, уламкову дію та вторинні наслідки, такі як пожежі та хімічне забруднення. Виконано розрахунки параметрів ударної хвилі при застосуванні ракети типу «Кинжал», а також визначено масштаби можливого хімічного забруднення при витокі аміаку. Отримані результати свідчать про високий рівень ризику для персоналу та значні руйнування будівель і технологічного обладнання. Обґрунтовано, що вторинні фактори ураження можуть призводити до масштабних аварій і людських втрат. Запропоновано комплекс організаційних та інженерно-технічних заходів, спрямованих на забезпечення безперервної роботи підприємств, зокрема використання підземних виробничих приміщень, підвищення надійності систем енергопостачання, водопостачання та вентиляції, а також впровадження резервних джерел ресурсів. Реалізація запропонованих рішень дозволить підвищити рівень захищеності об'єктів критичної інфраструктури та зменшити негативні наслідки в умовах воєнних загроз.

**Ключові слова:** *вражаючі фактори, критична інфраструктура, стабільність функціонування.*

**Постановка проблеми.** У Зверненні Верховної Ради України до парламентів і урядів держав світу та міжнародних організацій з нагоди річниці повномасштабного вторгнення російської федерації в Україну зазначено: 24 лютого 2022 року російська федерація перейшла до відкритої збройної агресії проти України, що супроводжується безпрецедентними за своїм цинізмом і жорстокістю воєнними злочинами, злочинами проти людяності, злочинами геноциду та ядерним шантажем, внаслідок якої порушено загальновизнані норми та принципи міжнародного права, територіальна цілісність і непорушність кордонів суверенної держави, принципи незастосування сили чи погрози силою проти територіальної цілісності чи політичної незалежності держави.

У відповідності до статті 5 Закону України «Про критичну інфраструктуру» від 05.12.2022 р. зі змінами внесеними згідно із Законом № 2684-IX від 18.10.2022, метою державної політики у сфері захисту критичної інфраструктури є забезпечення безпеки об'єктів

критичної інфраструктури, запобігання проявам несанкціонованого втручання в їх функціонування, прогнозування та запобігання кризовим ситуаціям на об'єктах критичної інфраструктури.

До основних завдань у сфері захисту критичної інфраструктури належать:

- попередження кризових ситуацій, що порушують безпеку критичної інфраструктури;
- розроблення комплексу заходів з контролю за ризиками безпеки, виявлення, запобігання та ліквідації наслідків інцидентів безпеки на об'єктах критичної інфраструктури;
- встановлення обов'язкових вимог із забезпечення безпеки об'єктів критичної інфраструктури, їх захищеності на всіх етапах життєвого циклу, у тому числі під час створення, прийняття в експлуатацію, модернізації;
- аналіз викликів та загроз, що впливають на стійкість критичної інфраструктури, оцінка стану її захищеності.

Історично Україна є державою з найбільш розвинутим та сучасним промисловим комплексом, де частка інноваційних технологій та процесів є досить суттєвою. Українське авіабудування, проектування та виробництво ракетної техніки, радіоприладобудування, виготовлення спеціалізованого обладнання для машинобудівного та металургійного комплексів вважаються у світі одними з провідних галузей. Безперервне функціонування підприємств цих галузей і є запорукою підтримання обороноздатності нашої країни.

Кричущою проблемою залишається захист цивільного населення, промислових підприємств в урбанізованих районах, які не є дотичними до бойових дій.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Вплив факторів вогневого ураження на стабільність функціонування основного технологічного обладнання термічного цеху.

Термічні цехи є невід'ємною частиною виробничого циклу машинобудівних підприємств. В структурі сучасних термічних цехів повинно передбачити наявність технологічного обладнання для виконання усіх необхідних операцій термічної або хіміко-термічної обробки на будь яких стадіях виготовлення виробів. Як приклад, оснащення термічного цеху двигунобудівного підприємства передбачає застосування камерних, шахтних, прохідних печей без функції утворення захисних атмосфер для виконання нормалізації або відпалу литих та деформованих заготовок. Печі такого ж типу, але в яких є можливість створення захисних атмосфер на базі азоту або аргону для виконання операцій гартування та відпускання або печі для вакуумної термічної обробки. Для виконання операцій хіміко-термічної обробки потрібно спеціалізоване обладнання для створення насичувальних атмосфер при виконанні подальших операцій азотування, цементації, нітроцементації [1]. Крім основного технологічного обладнання є потреба у допоміжному обладнанні, до якого можна віднести камери для очищення поверхні деталей до та після оброблення, комплекс обладнання для нанесення гальванічних покриттів, обладнання для виконання контрольних операцій, в тому числі електронне обладнання для управління технологічними параметрами пірометричного супроводу технологічних операцій.

Особливістю процесів термічної та хіміко-термічної обробки є те, що сталість режимів та параметрів може бути забезпечена тільки при використанні елементів автоматичного управління без будь-якого зовнішнього втручання.

Найбільш показовим прикладом є термічна або хіміко-термічна обробка у вакуумних печах, зокрема, для підтримки температурних режимів використовуються основні та контрольні термопари типу ТПП, для створення необхідних значень вакууметричного тиску використовують датчики магнітоелектричного типу, а для вимірювання надлишкового тиску охолоджуючих газів - датчики мембранного типу. В сучасних вакуумних термічних печах відомих світових виробників усі ці функції поєднуються у програматорах, в яких використовуються доволі складні комп'ютерні програми.[2]

Наприклад, для приготування вуглецевмісних насичувальних атмосфер використовуються природній газ та аміак. Технологічним процесом передбачена подача еногазу безпосередньо в робочу камеру. Для доведення насиченості середовища у відповідності технологічним параметрам цементування деталей з певної марки сталі додатково подається природний газ у чистому вигляді до значень вуглецевого потенціалу від 0,4 % до 1,2 % по вуглецю. В реальному процесі повна дисоціація не відбувається, тому в складі насичувальної атмосфери завжди примутні залишки метану. У двокамерних печах по закінченню стадії цементування садка переміщується з робочої камери у форкамеру. Основною небезпекою при цьому є виток залишків вибухонебезпечного насичувального середовища у форкамеру, що може призвести до вибуху при потраплянні в неї зовнішнього повітря [3].

Таким чином, при втраті герметичності робочого простору печі, у разі прямого влучання того чи іншого боєприпасу безпосередньо по території термічного цеху, ризик виникнення масштабних пожеж внаслідок вибуху газо-повітряних сумішей критично підвищується. Крім цього виникає забруднення виробничого середовища небезпечними речовинами, зокрема аміаком.

Що стосується термічної обробки у вакуумних печах, дія ударної хвилі при вибуху боєприпасів призводить до неповоротної втрати працездатності електронних елементів управління параметрами технологічного процесу в печі.

**Мета роботи.** Визначення заходів щодо можливості безперервної роботи об'єктів критичної інфраструктури під час агресії супротивника та оцінка їх ефективності.

**Виклад основного матеріалу.** *Застосування засобів ураження в сучасних воєнних конфліктах.* За інформацією з відкритих джерел [4] до звичайних засобів ураження прийнято відносити боєприпаси, вражаючи дія яких ґрунтується на використанні вибухових речовин, наприклад, тротилу, вуглеводнів і запалювальних речовин. Вражаючи дія звичайних засобів ураження залежить здебільшого від кількості речовини, яка використовується, її виду, теплофізичних властивостей і конструктивних особливостей боєприпасів. Залежно від призначення та виду вибухової речовини, звичайні засоби ураження поділяються на осколково-фугасні, запалювальні боєприпаси та боєприпаси об'ємного вибуху.

Наприклад, осколково-фугасні снаряди ЗВОФ39 мають масу вибухової речовини 6,42 кг, боєприпаси призначені переважно для руйнування промислових і адміністративних об'єктів, техніки та ураження людей. Вражаючи властивості осколково-фугасних боєприпасів та їхніх різновидів зумовлені дією ударної хвилі, що утворюється внаслідок дії вибухової речовини, і осколків, що розлітаються в різні боки. Радіус руйнування об'єктів і ураження людей залежить від калібру боєприпасу, міцності споруд, захищеності людей і становить здебільшого десятки метрів.

Бетонобійні боєприпаси призначені для руйнування злітно-посадкових смуг аеродромів, міцних споруд та інших об'єктів, що мають бетонне покриття. Бойова частина бетонобійного снаряда виконана у вигляді комбінації двох зарядів - кумулятивного і фугасного. Кумулятивний заряд забезпечує пропалювання шару бетону до 30 см і додаткове проникнення в ґрунт до 7 м. Ефективність боєприпасу в 10 разів перевищує ефективність звичайної фугасної бомби того ж калібру. Кумулятивні боєприпаси призначені для ураження броньованих цілей. Принцип дії цих боєприпасів ґрунтується на пропалюванні перешкоди потужним струмом продуктів детонації вибухових речовин з температурою 6 - 7 тис. градусів і тиском  $5 \cdot 10^5$  -  $6 \cdot 10^5$  кПа. Сфокусовані продукти детонації здатні пропалювати отвори в броньованих плитах завтовшки кілька десятків сантиметрів і спричинити пожежі. Наприклад, 152-мм бетонобійно-фугасний снаряд 53-Г-530 до гаубиці М-10 зразка 1938 року під час стрільби вилітає з

початковою швидкістю 457 м/с та пробиває залізобетонну стінку, на відстані 1 км і забезпечує пробиття 114 см залізобетону.

Касетні боєприпаси - це звичайні авіаційні бомби великого калібру, що оснащені малогабаритними боєприпасами різних видів, наприклад, осколковими з детонаторами миттєвої дії для ураження техніки та людей поза укриттями. Касетні боєприпаси з готовими елементами дозволяють у десятки разів збільшити площу ураження.

Ще більшу загрозу несе застосування ракетної зброї. Росія обстрілює українські міста з різних напрямків та за різними траєкторіями різними типами ракет, намагаючись вирахувати прогалини в обороні й обійти українську ППО. Спочатку йдуть масовані атаки безпілотників, а потім комбіновані атаки із застосуванням крилатих і балістичних ракет.

Наприклад, «Іскандер» - це оперативно тактичний ракетний комплекс, який може використовувати як крилаті, так і квазібалістичні ракети. На озброєнні РФ має «Іскандер-М» з двома квазібалістичними ракетами 9М723. Вага такої ракети 3,8 тони, з яких 480 кг – бойова частина.

"Кинжал" (у ряді джерел Х-47М2 "Кинжал") - російський гіперзвуковий авіаційний ракетний комплекс. Гіперзвукові ракети 9-С-7760 (близько 10 М) комплексу здатні вражати як стаціонарні об'єкти, так і надводні кораблі. Маса боєвої частини 500 кг.

Наступним етапом роботи було визначити параметри зон ураження при вибуху газоповітряних сумішей, хімічного забруднення при витокі аміаку та значень ударної хвилі під час застосування того чи іншого боєприпасу.

*Розрахунки зон ураження від дії ударної хвилі, визначення параметрів зон хімічного забруднення та оцінка можливих втрат та руйнувань.* При проведенні розрахунків використовувалась методика розроблена Г.П. Деміденком [5].

Розрахунок значень надлишкового тиску та радіусу зони руйнувань при вибуху гіперзвукової ракети 9-С-7760 «Кинжал»(Х-47М2).

Вихідні дані: маса вибухової речовини  $Q = 0,5$  т, можливий розліт при прицілюванні за координатами –  $r = 20$  м, прогнозований надлишковий тиск ударної хвилі в залежності від маси вибухової речовини та радіусу розльоту боєприпасу – 390 кПа,  $r = r_1 = 20$  м

$$\Delta P = 390 \cdot \sqrt{\frac{Q(\text{кг})}{r^3}} = 390 \cdot \sqrt{\frac{0,5 \cdot 10^3}{20^3}} = 97,5 \text{ кПа} .$$

Розрахунок параметрів зони хімічного забруднення внаслідок витокі аміаку при розгерметизації ємностей для зберігання в термічному цеху. Зріджений аміак – бінарна неорганічна сполука  $\text{NH}_3$ , ПДК 20 мг/м<sup>3</sup>, 4-й клас безпеки).

Вихідні дані: маса аміаку, який зберігається в балонах на аміачній рампі при повній її заповненості (в одному балоні 60 кг аміаку, при стандартній заповненості рампи – 3 балони) -  $Q = 540$  кг, густина аміаку  $d = 0,681$  т/м<sup>3</sup>, товщина шару при витокі аміаку  $h = 0,05$  м, місце знаходження рампи – у спеціальному приміщенні цеху.

Визначення площі ( $S_p$ ) та радіусу розливу ( $R_p$ ) аміаку

$$S_p = \frac{Q}{hd} = \frac{540}{0,681 \cdot 0,05} = 5294 \text{ м}^2,$$

$$R_p = \sqrt{\frac{S_p}{\pi}} = \sqrt{\frac{5294}{3,14}} = 41,06 \text{ м}$$

З огляду на те, що аміак є речовиною, яка легко зріджується і при порушенні герметичності балонів має здатність до миттєвого випаровування, тому зона хімічного забруднення стосується як площини цеху, так і прилеглих територій (табл. 1, 2).

Таблиця 1 – Оцінка впливу ударної хвилі на персонал цеху при вибуху боєприпасу-ракети "Кинжал" Х-47М2

Ступень негативного впливу	Величина $\Delta P_{ф}$ , кПа
Для людини безпечно	<10
Легке ураження (забиті місця, вивихи, тимчасова втрата слуху, загальна контузія)	20...40
Середнє ураження (контузія головного мозку, ушкодження органів слуху, розриви барабаних перетинок, кровотеча з носа та вух)	40...60
Сильне ураження (сильна контузія всього організму, втрата свідомості, переломи кінцівок, ушкодження внутрішніх органів)	60...100
Поріг смертельного ураження	100
Летальний вихід у 50% випадків	250...300
Безумовна смертельне ураження	>300

Таблиця 2 – Оцінка ступеню руйнувань при розрахованих значеннях надлишкового тиску ( $\Delta P$ , кПа)

Об'єкт	Нормативний ступінь руйнувань		
	Повне	Сильне	Середнє
Будівлі промислові			
Цеглові малоповерхові споруди з важким металевим або залізобетонним каркасом	60...100	50...60	40...50
Цеглові багатоповерхові споруди з легким металевим каркасом або без каркасні	60...80	40...50	30...50
Промислові об'єкти			
Трубопроводи наземні	130	50	20
Трансформаторні підстанції	100	40...60	20...40

Проведені розрахунки дають досить впевнений прогноз щодо можливих негативних наслідків дії вражаючих факторів при застосуванні потужного ракетного озброєння по цивільному сектору та промисловим об'єктам критичної інфраструктури. Прогнозувалися наслідки впливу ударної хвилі на людські ресурси та ступінь стійкості промислових об'єктів. При максимальних значеннях надлишкового тиску в зоні руйнувань (згідно розрахункам  $\Delta P = 97,5$  кПа) та користуючись даними, наведеними у довіднику Г.П. Димиденка, загроза для людей полягає в тяжких контузіях, чисельних переломах опорно-рухового апарату, ушкодженні внутрішніх органів та, в окремих випадках, смертельному ураженні. Відносно загроз до збереження цілісності елементів промислових об'єктів існує вірогідність повних руйнувань конструкцій будівель, систем енергопостачання та часткових руйнувань комунікацій для постачання рідинних або газоподібних ресурсів по трубопроводах.

У разі витоку газоподібного аміаку з балонів, в зоні його розповсюдження утворюються небезпеки для персоналу у вигляді гострих хімічних отруень, хімічних опіків органів зору та дихання, можливі летальні випадки.

*Запропоновані організаційні та інженерно-технічні заходи щодо забезпечення безперервної роботи цеху під час загрози вогневого ураження.* Інженерний захист територій та об'єктів критичної інфраструктури передбачає віднесення конгломерацій до відповідних груп цивільного захисту а суб'єктів господарювання до певних категорій цивільного захисту. Розміщення об'єктів критичної інфраструктури повинно здійснюватися з урахуванням наслідків агресивних дій стосовно таких об'єктів. Будівництво споруд, будівель, інженерних

мереж і транспортних комунікацій має відповідати заданим рівням безпеки та надійності з метою безаварійного функціонування об'єктів критичної інфраструктури.

В умовах реальної агресії потрібно негайно брати на облік існуючі споруди подвійного призначення та найпростіші укриття, об'єкти іншого призначення, зокрема підземні і наземні будівлі, гірські та інші підземні порожнини, будувати в особливий період швидко споруджувані захисні споруди та завчасно виготовляти конструкції блок-модульного типу, готових до монтажу та використання.

Затягування бойових дій зі сторони росії і висока вірогідність нових агресивних закидів на незалежність України ставить за мету розміщення найбільш значущих об'єктів промислового виробництва поза зоною досяжності засобами ураження. Одним із можливих організаційно-технічних рішень може бути розміщення промислових потужностей або у підвальних приміщеннях, об'єм яких та облаштування потрібними комунікаціями дозволяє організувати технологічний процес у повному обсязі, або у окремо розташованих поза зонами можливого ураження спеціально побудованих підземних захисних спорудах.

Для вирішення цієї задачі необхідно визначити доцільність використання підземних просторів, створювати технічні проекти по забезпеченню технологічного обладнання усім необхідним з урахуванням вимог охорони праці, санітарних умов, екологічної безпеки та інше [7].

Обов'язковими заходами з практичної реалізації цієї задачі мають бути:

- проведення районування територій за наявністю потенційно небезпечних об'єктів і небезпечних геологічних, гідрогеологічних та метеорологічних явищ і процесів, а також ризику виникнення надзвичайних ситуацій, пов'язаних з ними;
- розроблення та включення вимог інженерно-технічних заходів цивільного захисту до відповідних видів містобудівної і проектною документації та реалізація їх під час будівництва і експлуатації;
- розміщення об'єктів підвищеної небезпеки з урахуванням наслідків аварій, що можуть статися на таких об'єктах як у надзвичайних ситуаціях техногенного походження, так і в умовах збройної агресії.

Таке розміщення виробництва ставить додаткові вимоги до систем енергопостачання, водопостачання та повітрообміну.

Порушення нормальної подачі електроенергії на об'єкт або окремі ділянки виробництва може привести до повного припинення роботи об'єкта. Тому для забезпечення надійного електропостачання в умовах воєнної надзвичайної ситуації при його проектуванні і будівництві повинні бути враховані наступні основні вимоги:

- електропостачання повинне здійснюватися від енергосистем, до складу яких входять електростанції, що працюють на різних видах палива;
- трансформаторні підстанції необхідно надійно захищати від впливу вражючих факторів, їх стійкість повинна бути не нижче стійкості самого об'єкта;
- електроенергію до ділянок виробництва слід подавати незалежними електрокабелями, прокладеними у землі на глибині 0,8...1,2 м;
- при електропостачанні об'єкта від одного джерела повинне бути не менше двох введів з різних напрямків;
- необхідно створювати автономні, резервні джерела електропостачання, наприклад, потужні автономні електрогенератори;
- система водопостачання повинна базуватися не менше ніж на двох незалежних джерелах, одне з яких доцільно влаштовувати природним;
- на підприємствах слід передбачати оборотне використання води для технічних цілей (це зменшує загальну потребу у воді, а отже, підвищує надійність водопостачання);

- лінії водопроводу всіх мереж водопостачання повинні бути заглиблені в ґрунт на 1...2 м бути закільцьованими;

- резервуари питної води слід обладнати герметичними люками;

Газопостачання в підземних спорудах повинно здійснюватись від газобалонних рамп з виконанням усіх вимог вибухопожежної безпеки.

Повітрообмін створюється як системами подачі зовнішнього повітря, так і засобами механічного примусового повітрообміну. Обов'язково треба передбачати наявність систем регенерації повітря в аварійних випадках [6].

## ВИСНОВКИ

1. Було визначено ступінь ураженості термічних цехів машинобудівних підприємств при зовнішньому впливі, що може бути пов'язано з вогневим ураженням під час агресивних дій військових формувань рф.

2. Розглянуто наслідки від використання тих чи інших видів озброєння з точки зору масштабу руйнувань об'єктів критичної інфраструктури та людських втрат.

3. Визначені складові технологічних процесів в термічній та хіміко-термічній обробки, де наслідки застосування засобів вогневого ураження полягають не тільки в безпосередньому руйнуванні, а й призводять до вторинних чинників в розвитку надзвичайної ситуації, зокрема вибухів технологічних газових сумішей, масштабних пожеж та хімічного забруднення зон ураження небезпечними речовинами, які використовуються в технологічних процесах.

4. Виконані розрахунки впливу ударної хвилі при застосуванні найбільш потужного виду озброєння – балістичної ракети X-47M2 «Кинжал» на ступінь руйнувань промислових будівель та об'єктів і, як наслідок, спрогнозовані чисельні загрози для персоналу на межі смертельного ураження, а також небезпеки для персоналу у вигляді гострих хімічних отруєнь, хімічних опіків органів зору та дихання, можливі летальні випадки при витоку небезпечних та небезпечних та отруйних речовин, які використовуються в технологічному процесі.

5. Обґрунтовано доцільність організації виробництва на підприємствах оборонно-промислового комплексу в підземних спорудах за умови виконання усіх вимог будівельних технологій, можливості виконання технологій, зокрема, термічної та хіміко-термічної обробки в повному обсязі, забезпечення безпечних умов праці, екологічності та надійності постачання технологічних та енергетичних ресурсів, що надасть можливість виключити або мінімізувати вірогідність руйнувань та ушкоджень при використанні засобів вогневого ураження ворогом.

## Список використаних джерел

1. Нестеров О.В., Рубан В.Т., Кузьменко В.Г. Впровадження сучасних технологій азотування з метою поліпшення умов праці та підвищення екологічності процесів. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудування*. 2023. № 3. С. 81-84. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2023-3-2>.

2. Головка Д.Б., Реґо К.Г., Скрипнік Ю.О. Автоматика і автоматизація технологічних процесів. Підручник. Київ: Либідь. 1997. 232 с.

3. Нестеров О.В., Рубан В. Т., Повзло В. М. Дослідження ефективності вибухопожежобезпечної захисної атмосфери при виконанні операцій цементації. *Нові матеріали і технології в металургії та машинобудуванні*. 2024. № 1. С. 92-95. <https://doi.org/10.15588/1607-6885-2024-1-13>.

4. Сучасне озброєння і військова техніка Збройних сил Російської Федерації. Довідник учасника ООС / С.П. Корнійчук, О.В. Турінський, Г.В. Пєвцов та ін. / за заг. ред. С.П. Корнійчука. Х.: ДІСА ПЛЮС. 2020. 1220 с.
5. Защита объектов народного хозяйства от оружия массового поражения. Справочник / Под ред. Г.П. Демиденко. – К: Вища шк. Головное изд-во, 1987. 256 с.
6. Навчальний посібник для самостійного вивчення дисципліни «Цивільний захист» : частина перша – теоретична : навч. посіб. для студентів усіх спеціальностей / Укл. : М. О. Журавель, С. М. Журавель, М. І. Лазуткін, Ю. В. Якімцов. Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка». 2021. 235 с.
7. Білецький В.С. Підземні споруди / Велика українська енциклопедія. URL: <https://vue.gov.ua> (дата звернення: 01.04.2026).

Nesterov O.V., Kapustian O.Ye., Ruban V.T.

## MAINTAINING THE STABILITY OF THE OPERATION OF CRITICAL INFRASTRUCTURE ENTERPRISES DURING MARTIAL ARTS

*The paper considers the urgent problem of ensuring the stability of the functioning of critical infrastructure facilities of Ukraine in conditions of armed aggression. Against the backdrop of the full-scale invasion of the Russian Federation, the protection of industrial enterprises, in particular thermal workshops of the machine-building industry, which play a key role in maintaining the defense capability of the state, is of particular importance. The regulatory and legal framework in the field of critical infrastructure protection is analyzed and the main tasks of state policy regarding the prevention of crisis situations, minimizing risks and eliminating the consequences of emergency events are identified. The features of the technological processes of thermal and chemical-thermal treatment, as well as the composition and functioning of the relevant equipment are studied. It is established that the vulnerability of such facilities is due to the use of explosive gas environments, complex automated control systems and high temperature regimes. The impact of modern means of destruction, in particular missile weapons, on industrial facilities is considered, and the factors of destruction are analyzed - shock wave, fragmentation effect and secondary consequences, such as fires and chemical contamination. The parameters of the shock wave when using a Kinzhal type missile are calculated, and the scale of possible chemical contamination in the event of an ammonia leak is determined. The results obtained indicate a high level of risk for personnel and significant destruction of buildings and technological equipment. It is substantiated that secondary factors of destruction can lead to large-scale accidents and human losses. A set of organizational and engineering and technical measures is proposed to ensure the continuous operation of enterprises, in particular the use of underground production facilities, increasing the reliability of power supply, water supply and ventilation systems, as well as the introduction of reserve sources of resources. The implementation of the proposed solutions will allow to increase the level of protection of critical infrastructure facilities and reduce negative consequences in conditions of military threats.*

**Keywords:** *damaging factors, critical infrastructure, stability of operation.*

*Стаття надійшла 05.04.2026*

*Стаття прийнята 09.04.2026р.*

*Стаття опублікована 30.04.2026р.*

## МЕТАЛУРГІЯ УКРАЇНИ: БОРОТЬБА, МОДЕРНІЗАЦІЯ ТА ЕКСПОРТ НА НОВИЙ РІВЕНЬ

Українська металургія перебуває на перехресті кризи та можливостей. Останні півроку показали: галузь не просто намагається вижити, вона активно трансформується, впроваджує інновації та шукає нові ринки.

Три новини останніх місяців яскраво демонструють цю динаміку: дефіцит металобрухту, масштабна модернізація «Запоріжсталі» та нова стратегія експорту до Європи. Всі три події тісно пов'язані між собою, формуючи цілісну картину стану української промисловості.

### ДЕФІЦИТ МЕТАЛОБРУХТУ: ВИКЛИК ДЛЯ ВСІЄЇ ГАЛУЗІ

Металургійні компанії країни зіткнулися з критичним обмеженням сировини. Група «Метінвест», найбільший гравець української металургії, прогнозує, що вже у 2026 році на внутрішньому ринку **буде дефіцит металобрухту** — ключового ресурсу для виробництва сталі.

«Ми бачимо, що внутрішні ресурси обмежені, тому доводиться шукати альтернативні джерела та оптимізувати виробництво», — заявляють у компанії.

#### Причини дефіциту

Дефіцит спричинений комбінацією факторів:

- Руйнування інфраструктури та логістичних ланцюгів через війну.
- Зростання внутрішнього споживання металобрухту для ремонту та будівництва.
- Обмежені можливості імпорту через нестабільність транспортних маршрутів.

#### Наслідки для галузі

Економічний ефект відчутний для всіх учасників ринку:

- Зростання вартості металопрокату на внутрішньому ринку.
- Підвищення собівартості виробництва сталі.
- Посилення конкуренції за сировину.

Водночас компанії шукають рішення. Частина підприємств переходить на **ефективніші технології переробки металобрухту**, включно з електросталеплавильними печами, що дозволяє зменшити залежність від дорогої руди.

Джерело: <http://thepage.ua/ua/news/rinok-metalobruhtu-u-2026-bude-deficitnim-metinvesti>

### «ЗАПОРІЖСТАЛЬ» ВКЛАДАЄ СОТНІ МІЛЬЙОНІВ У МОДЕРНІЗАЦІЮ

В умовах обмежених ресурсів «Запоріжсталь» не просто зберігає виробництво, а активно **інвестує в модернізацію заводських потужностей**. У 2025–2026 роках на капітальний ремонт ключових агрегатів було витрачено близько **370 млн грн**.

#### Що модернізують

Модернізація охоплює:

- Доменні печі — серце виробництва, де важливо підтримувати стабільну температуру та мінімізувати простой.
- Прокатні стани — для забезпечення якості готової продукції.
- Енергетичні системи — із акцентом на зниження споживання електроенергії.

- Вспоміжні механізми — рольганги, електроприводи та транспортні системи всередині комбінату.

## Цілі та ефекти

Головна мета — підвищити надійність виробництва та зменшити екологічний слід.

Завдяки цьому:

- Скоротяться викиди, що покращить екологічну ситуацію в регіоні.
- Знизиться кількість браку, підвищивши прибутковість продукції.
- З'явиться можливість розширювати експорт без додаткових простоїв.

Як зазначив представник заводу:

«Ми інвестуємо не просто в обладнання — ми інвестуємо у стабільність і майбутнє нашої галузі».

Модернізація особливо важлива в умовах війни: старе обладнання швидше виходить з ладу, а перебої з енергопостачанням потребують більш гнучких та енергоефективних рішень.

Джерело: <https://gmk.center/ua/news/zaporizhstal-z-pochatku-roku-vklala-370-mln-grn-u-kapremonti-osnovnih-agregativ/>

## НОВИЙ МАРШРУТ ЕКСПОРТУ: ЄВРОПА СТАЄ ПРІОРИТЕТОМ

Ще однією важливою подією стала активна переорієнтація української металургії на ринок ЄС. У 2026 році «Запоріжсталь» почала постачання продукції на трубний завод у Румунії. Перша партія — понад **20 тис. тон**, а річний план — до **180 тис. тон сталі**.

### Чому це важливо

Після блокування морських портів Україна зіткнулася з логістичною проблемою: експорт через звичні маршрути став неможливим. Рішення — використовувати сухопутні маршрути та європейську інфраструктуру.

### Вимоги до продукції

Поставки здійснюються за європейськими стандартами EN. Це означає:

- Виробництво адаптується під міжнародні норми.
- Продукція стає конкурентоспроможною на закордонних ринках.
- Компанія зміцнює свої позиції серед європейських партнерів.

### Економічний та геополітичний ефект

Експорт до ЄС забезпечує:

- Валютні надходження, критично важливі для економіки.
- Підтримку робочих місць та збереження виробничих потужностей.
- Можливість інтеграції України у європейський промисловий контур.

«Це не просто експорт, це стратегічне рішення для інтеграції України у промислову ланцюжок Європи», — зазначають експерти галузі.

Джерело: <https://metinvestholding.com/ua/media/news/zaporzhstalj-vd-vantazhila-persh-part-prokatu-na-trubnij-zavod-metnvestu>

## ВИМОГИ ДО ПУБЛІКАЦІЙ

**До відома авторів,  
які надсилають статті у міжвузівський тематичний  
збірник наукових праць «Наука та виробництво»**

У збірнику публікуються статті за наступними напрямками:

- 1. Машинобудування і зварювальне виробництво.**
- 2. Будівництво та архітектура.**
- 3. Біоінженерія.**
- 4. Металургія.**
- 5. Ремонт та відновлення деталей машин.**
- 6. Матеріалознавство.**
- 7. Транспортні технології.**
- 8. Енергетичні системи та обладнання.**
- 9. Екологічна безпека.**

Усі статті повинні відповідати вимогам Постанови Президії ВАК України №7-05/1 від 15.01.2003. Вартість публікації однієї статті в збірнику 45 грн. аркуш в разі дотримання авторами таких вимог до оформлення:

- текст статті набирається на комп'ютері в текстовому редакторі Microsoft Word (шрифт 12-й Times New Roman, міжрядковий інтервал 1,0; поля: верхнє і нижнє – по 20 мм, бічні – по 20 мм);

- ілюстративний матеріал монтується в текст. Креслення і графіки виконуються в будь-якому графічному редакторі. Ілюстративний матеріал повинен бути придатний для безпосереднього відтворення розмножувальними пристроями;

- підписи і перелік посилань оформляються відповідно до стандарту ДСТУ ГОСТ 7.1:2006;

- на першій сторінці статті напівжирним шрифтом набираються: класифікаційний індекс УДК – у лівому верхньому куті; прізвища та ініціали авторів – на один рядок нижче, у правому верхньому куті; назва статті – посередині сторінки (великими літерами);

- анотації додаються двома мовами (обсяг анотації українською мовою не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова; для статей не українською мовою обсяг анотації українською мовою – не менш як 1800 знаків, включаючи ключові слова), першою наводиться анотація на мові статті (відступ зліва і справа по 1 см, курсивом) та ключові слова (від трьох до восьми). Анотації, що надруковані іншими мовами розташовуються у наприкінці статті;

- на останній сторінці статті після переліку посилань у правому нижньому куті курсивом друкується «*Стаття надійшла...*» і проставляється дата подання статті у редколегію. У лівому нижньому куті друкується «Рецензент: д-р техн. наук ...» і П.І.Б. Рецензента.

Редакція звертається до авторів з проханням при підготовці статей враховувати вимоги, в відповідності з яким, стаття повинна містити такі необхідні елементи, як:

- постановка проблеми в узагальненому вигляді і її зв'язок з важливими науковими чи практичними завданнями;

- аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми і на які спираються автори виділення невирішених раніше частин загальної проблеми, котрим присвячена означена стаття;

- формулювання цілей статті (постановка завдання);

- виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів;

– висновки з даного дослідження і перспективи подальшого розвитку даного напрямку.

Увага! Зазначені елементи статті повинні бути виділені відповідними заголовками: **Постановка проблеми; Аналіз останніх досліджень і публікацій; Мета (завдання) дослідження; Основний матеріал дослідження; Висновки.**

Статті подаються в двох примірниках (з яких один повинен бути першим, видрукованим на лазерному принтері) **на одному боці аркуша формату А4. До рукопису статті додаються:**

- експертний висновок про можливість опублікування у відкритому друці;
- рецензія доктора технічних наук, у якій повинна бути відбита наукова новизна результатів, їх цінність і значимість;
- рекомендація кафедри чи організації, що представляє дану статтю до публікації;
- анотації російською, українською, англійською мовами з ключовими словами;
- відомості про авторів: прізвище, ім'я, по батькові, учений ступінь, звання, місце роботи, посада, адреса, робочий телефон.

До перерахованих матеріалів необхідно додавати CDз текстом статті (Word 2010 або формат **.rtf**).

## ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ CD

- експертний висновок про можливість опублікування –*файл* **expert.doc**;
- рецензія доктора технічних наук –*файл* **recenz.doc**;
- рекомендація кафедри чи організації –*файл* **recomend.doc**;
- відомості про авторів –*файл* **sved\_avt.doc**;
- анотація українською, англійською мовою –*файл* **an.doc**;
- текст статті –*файл* **article.doc**;

Ініціали і прізвища авторів, вчені ступені, назва організації, місто, країна, назва, анотація статті та ключові слова наводяться, **українською, англійською** мовами.

Повністю оформлені статті та додані до них матеріали надсилаються в редакцію збірника на адресу: 87500, Україна, м. Маріуполь, вул. Університетська, 7, ДВНЗ «ПДТУ». *Фактичне місце розміщення:* Україна, м. Дніпро, вул. Гоголя, 29, ауд. 314. Приймання статей проводить відповідальний секретар редколегії збірника, канд. техн. наук, доцент кафедри Зварювання та споріднені технології, **Зусін Антон Михайлович**.

E-mail: [zusin\\_a\\_m@pstu.edu](mailto:zusin_a_m@pstu.edu) Тел. +38(097)477-54-93.

Підписано до друку 30.04.2026 р.  
Папір тип №2. Умов. друк. ар. 10,69. Тираж 400. Формат 60x84 1/8.  
Замовлення №110. Матеріали збірника друкуються мовою оригіналу.  
Ціна договірна.